

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA-BEJAIA
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique



Mémoire de Magister

Filière : Electrotechnique
Option : Systèmes Electro-Energétiques

Thème

Etude Des Machines Asynchrones A Double Etoile En Pompage

Soutenu le :

12/12/2012

présenté par :

ADJATI Arezki

Membres du jury

Nom et Prénom	Grade		
Mr AOUZELLAG Djamel	M.C.A	Université de Bejaia	Président
Mr REKIOUA Toufik	Professeur	Université de Bejaia	Rapporteur
Mr SAOU Rachid	M.C.A	Université de Bejaia	Examineur
Mr IDJDARENE Kassa	M.C.A	Université de Bejaia	Examineur

Année Universitaire : 2011/2012

Remerciements

J'adresse mes remerciements les plus sincères,
A mon promoteur, Mr Toufik REKIOUA, Professeur à
l'université A.MIRA de Bejaïa, pour son aide et sa patience,
A Mme REKIOUA et Mr AZIB, pour leurs recommandations,
A mon père ADJATI Hachemi, pour avoir révisé mon manuscrit,
A tous les membres du jury, Mr AOUZELLAG, Mr SAOU, Mr
IDJDARENE et Mr SELLAMI, pour avoir accepté de juger ce
modeste travail,
A tous mes Enseignants, depuis mes quatre ans à ce jour.
A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation
de ce mémoire.

Arezki ADJATI

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :
A tous les valeureux martyrs de l'Algérie.
A mes parents Hachemi et Sassa,
A mes sœurs, Dalila, Nadia, Naïma, Bahia et Ouarda,
A mes frères, Samir et Faouzi,
A mes belles-sœurs et mes beaux-frères,
A mes nièces et mes neveux,
A tous mes élèves et à tous mes collègues de travail, du
Technicum « salhi » d'El Kseur, du Technicum de Sidi-aïch, du
Technicum d'Ighzer Amokrane, du Lycée « Debih Cherif »
d'Akhou, du Lycée de Tichy et du Lycée « Anani Ihadaden »,
A tous les enseignants de la filière génie électrique.
A Sonya, ma compagne de toujours,
A tous mes amis (es).

Arezki ADJATI

SOMMAIRE

SOMMAIRE

NOTATIONS ET ABRÉVIATIONS	i
LISTE DES FIGURES	iv
LISTE DES TABLEAUX	viii

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
------------------------------------	----------

CHAPITRE I : LES MACHINES MULTIPHASÉES

1 INTRODUCTION	4
2 Caractéristiques des Machines Multiphasées	4
2.1 Machines Multiphasées de « Type 1 »	5
2.2 Machines Multiphasées de « Type 2 »	6
3 Domaine d'application	6
4 Avantages de la machine multiphasée	7
4.1 La segmentation de puissance	7
4.2 La fiabilité	7
4.3 Elimination d'harmonique d'espace	7
4.4 Minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques	8
4.5 Amélioration du facteur de puissance	8
5 Inconvénients de la machine multiphasée	8
5.1 Les courants harmoniques de circulation	8
5.2 Le coût	8
5.3 La commande	8
6 Conclusion	9

CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MASDE

1 Introduction	10
2 Description de la machine asynchrone à double étoile	10
3 Modélisation de la machine asynchrone à double étoile	11
3.1 Hypothèses Simplificatrices	11
3.2 Modèle de la machine asynchrone à double étoile	12
3.2.1 Equations électriques de la machine	12
3.2.2 Equations magnétiques	13
3.2.3 Equation magnétique développée de la MASDE	15
3.2.4 Schéma électrique équivalent de la MASDE	15
3.2.5 Energie magnétique	15
3.2.6 Couple électromagnétique	15
3.2.7 Equation mécanique	16
3.3 Modèle biphasé de la machine asynchrone à double étoile	16
3.3.1 Transformation de PARK directe	16
3.3.2 Conventions	17
3.3.3 Transformation de PARK inverse	17
3.3.4 CHOIX DU REFERENTIEL	18

3.3.5 Application de la transformation de PARK à la MASDE.....	19
3.3.6 Mise sous forme d'équation d'état	24
4 Simulation numérique et interprétation de résultat.....	26
4.1 Présentation des blocs de simulation	26
4.2 Simulation de la MASDE alimentée par le réseau électrique	28
4.3 Alimentation de la MASDE par des onduleurs de tension.....	32
4.3.1 Modélisation de l'onduleur	33
4.3.2 Commande par modulation des largeurs d'impulsions sinus-triangle.....	34
Exemple de MLI.....	36
4.3.3 Association « Onduleurs – MASDE »	38
5. Conclusion.....	42

CHAPITRE III : ÉTUDE DE LA MASDE EN MODE DÉGRADÉ

1 Introduction.....	43
2 Description du mode « dégradé »	43
3 Causes de fonctionnement en mode « dégradé »	44
3.1 Dégradation au niveau du réseau	44
3.2 Dégradation au niveau du moteur	44
3.3 Dégradation au niveau des connectiques	45
3.4 Dégradation au niveau de l'alimentation de la machine.....	45
4 Etude des éventuels défauts.....	45
4.1 Défaut d'ouverture d'un transistor de puissance.....	45
4.1.1 Annulation de la commande du transistor sain	46
4.1.2 Utilisation d'un fusible de protection.....	46
4.2 Défaut de fermeture d'un transistor de puissance ou fusion d'un fusible.....	46
5 Stratégies d'isolation du défaut	47
6 Conséquences d'un défaut	48
7 Stratégie de commande en mode dégradé	48
7.1 Action sur le courant d'une seule phase encore saine par chaque phase ouverte	48
7.1.1 Définition.....	48
7.1.2 Présentation de la méthode.....	48
7.1.3 Cas particulier.....	49
7.2 Action sur chacun des courants dans les phases encore saines.....	50
7.2.1 Définition.....	50
7.2.2 Présentation de la méthode.....	50
7.3 Comparaison des deux méthodes.....	51
8 Fonctionnement de la MASDE en mode dégradé	51
8.1 Modèle de la MASDE dans le repère « α - β »	51
8.2 Equations électriques de la MASDE.....	52
8.3 Matrice de transformation.....	52
8.4 Cas d'un défaut de la première phase « Sa1 »	53
8.5 Equation dans le repère « α - β »	54
8.5.1 Equations des tensions.....	54
8.5.2 Equations des flux.....	54
8.6 Equation dans l'espace « Z »	54
8.7 Equation mécanique.....	55
9 Réduction des oscillations du couple.....	55
9.1 Application de la première méthode.....	55
9.2 Application de la deuxième méthode	55

10 Simulation numérique de la MASDE en mode dégradé et interprétation des résultats	56
10.1 Simulation de la MASDE dans le repère $[\alpha-\beta]$	56
10.2 Simulation lors d'un défaut d'une phase	57
10.2.1 Défaillance de la phase « Sa1 »	57
10.2.2 Récapitulatif des divers cas de défaillance d'une phase	60
10.3 Simulation d'un défaut de deux phases	61
10.3.1 Défaut de deux phases de la même étoile	61
10.3.2 Défaut de deux phases de différentes étoiles	63
10.3.2.1 Défaillances des phases « Sa1 » et « Sb2 »	63
10.3.2.2 Défaillances des phases « Sa1 » et « Sc2 »	64
10.3.2.3 Récapitulatif des diverses défaillances de deux phases	66
10.4 Simulation d'un défaut de trois phases	66
10.4.1 Perte d'une étoile	66
10.4.2 Défaut de trois phases de différentes étoiles	68
10.4.3 Récapitulatif des diverses défaillances de trois phases	70
10.5 Récapitulative sur les diverses simulations	70
10.5.1 Couple électromagnétique :	71
10.5.2 Vitesse de rotation:	71
10.5.3 Courants statoriques:	71
11 Conclusion	72

CHAPITRE IV : APPLICATION POMPAGE

1 Introduction	73
2 Généralités	74
3 Classification des pompes	74
3.1 Pompe Centrifuge	75
3.1.1 Constitution d'une pompe centrifuge	75
3.1.2 Différents types de pompes centrifuges	76
3.1.2.1 Nombre de roues	76
3.1.2.1.1 Pompes monocellulaires	76
3.1.2.1.2 Pompes multicellulaires	77
3.1.2.2 Différentes formes des aubes de la roue	79
3.1.2.3 Pompes à axe horizontal ou vertical	80
3.1.2.3.1 Pompe de surface	80
3.1.2.3.2 Pompes immergées	81
3.1.2.4 Type d'effluent spécifique à pomper	82
3.2 Autres types de pompes	83
3.2.1 Machines élévatoires simples – vis d'Archimède	83
3.2.2 Pompes à piston	84
3.2.2.1 Pompes aspirantes et foulantes	84
3.2.2.2 Pompes à fourreau	85
3.2.2.3 Pompes à diaphragme	85
3.2.2.4 Pompes à piston plongeur	86
3.2.2.5 utilisations des pompes à piston	86
3.2.3 Pompes rotatives	86
3.2.4 Aéro-éjecteurs	87
4 L'hydraulique de pompage	87
4.1 Hauteur manométrique totale	87

4.2 Hauteur d'aspiration	88
4.3 Pertes de charge	88
4.4 Hauteur totale de pompage	88
4.5 Puissance d'une pompe.....	89
4.6 Charge nette à l'aspiration : NPSH	89
4.7 Cavitation	90
5 Caractéristique de la pompe centrifuge	91
5.1 Caractéristique « Débit – Vitesse »	91
5.2 Caractéristique « Couple-Vitesse »	91
5.3 Caractéristique « Débit-Hauteur »	92
5.4 Caractéristique de rendement de la pompe.....	93
5.5 Utilisation des lois de similitude	93
6 Application de la MASDE au Pompage	94
6.1 Modélisation de la pompe centrifuge	94
6.1.1 Bloc de simulation de la pompe centrifuge	94
6.1.2 Lois de similitude	94
6.2 Bloc de simulation globale de la MASDE- Pompe centrifuge	95
6.3 Simulation numérique et interprétation des résultats	95
6.3.1 Couple du moteur – Couple résistant	95
6.3.2 Vitesse de synchronisme – vitesse de rotation	96
6.3.3 Caractéristique « Couple – Vitesse de rotation »	96
6.3.4 Caractéristique « Débit – Vitesse de rotation »	97
6.3.5 Evolution du Débit	97
6.3.6 Caractéristique « Débit – Hauteur manométrique totale »	98
6.3.7 « Hauteur manométrique totale – Vitesse de rotation »	98
7 Dimensionnement pratique de la pompe centrifuge	99
7.1 Puissance de la pompe	99
7.2 Vitesse de l'eau dans les tuyauteries	99
7.3 Hauteur nette d'amorçage	99
8 Avantages et inconvénients des pompes centrifuges	99
8.1 Avantages	99
8.2 Inconvénients	100
9 Domaines d'utilisation	100
10 Conclusion	101

CHAPITRE V : LE SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE

1 Introduction.....	102
2 L'énergie du soleil	102
3 Le système photovoltaïque	103
3.1 La cellule photovoltaïque	103
3.2 Caractéristique d'une cellule photovoltaïque	104
3.3 Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque	105
3.3.1 Courant de court-circuit.....	105
3.3.2 Tension de circuit ouvert	105
3.3.3 Facteur de forme	106
3.3.4 Le rendement	106
3.4 Modélisation du générateur photovoltaïque	106
3.4.1 Cellule idéale	107
3.4.2 Modèle explicite	107
3.4.3 Modèle à une diode	108

3.4.4	Modèle à deux diodes	110
3.5	Association des cellules photovoltaïques	110
3.5.1	Association en série des cellules photovoltaïques	111
3.5.2	Association en Parallèle des cellules photovoltaïques	111
3.5.3	Association hybride des cellules photovoltaïques	112
3.5.4	Cas de défaillance d'une ou plusieurs cellules	113
3.5.4.1	Phénomènes de hot spot sur les cellules ombragées	113
3.5.4.2	Cas de couplage en parallèle	113
4	Générateur photovoltaïque	113
5	Composants d'un système de pompage photovoltaïque	114
5.1	Modélisation du générateur photovoltaïque	115
5.2	Convertisseur à pilotage MPPT	116
5.2.1	Généralités et définition	116
5.2.2	Modélisation du hacheur Buck-Boost	117
5.2.3	Modélisation du filtre	118
5.3	Dimensionnement d'une pompe photovoltaïque	119
5.3.1	Données de base d'une pompe	119
5.3.2	Dimensionnement de la pompe	120
5.3.3	Application	121
6	Simulation numérique et interprétation des résultats	122
6.1	Bloc de simulation sous Matlab Simulink	122
6.2	Ensoleillement	123
6.3	Association des panneaux photovoltaïques	123
6.3.1	Mise en parallèle de deux branches ayant 18 panneaux en série	123
6.3.1.1	Couple électromagnétique	123
6.3.1.2	Vitesse de rotation	124
6.3.1.3	Caractéristique « Couple – Vitesse de rotation »	124
6.3.1.4	Caractéristique « Débit – Vitesse de rotation »	125
6.3.1.5	Evolution du « Débit » et de la « Hauteur Manométrique Totale »	125
6.3.1.6	Hauteur manométrique totale – Vitesse de rotation	125
6.3.2	Mise en parallèle de trois branches possédant 12 panneaux en série	126
6.3.2.1	Couple électromagnétique	126
6.3.2.2	Vitesse de rotation	126
6.3.2.3	Caractéristique « Couple – Vitesse »	126
6.3.2.4	Caractéristique « Débit – Vitesse »	127
6.3.2.5	Evolution du « Débit » et de la « Hauteur Manométrique Totale »	127
6.3.2.6	Hauteur manométrique totale – Vitesse de rotation	128
6.3.3	Discussions des résultats	128
7	Avantages et inconvénients	128
7.1	Avantages	128
7.2	Inconvénients	129
8	Domaines d'applications	129
9	Conclusion	130
<hr/>		
	CONCLUSION GÉNÉRALE	131
<hr/>		
	BIBLIOGRAPHIE	133
<hr/>		
	ANNEXES	139
	RESUME	143

NOTATIONS

ET

ABRÉVIATIONS

PRINCIPALES NOTATIONS ET ABRÉVIATIONS

A

- « A » : Facteur d'idéalité.
- « A1, B1, C1 » : Indices correspondants aux trois phases du premier stator.
- « A2, B2, C2 » : Indices correspondants aux trois phases du deuxième stator.
- « Ar, Br, Cr » : Indices correspondants aux trois phases du rotor.

C

- « Cem » : Couple électromagnétique.
- « Cn » : Couple avec n phases saines.
- « Cr » : Couple résistant.

D

- « d » : Indice de l'axe direct.
- « D » : diamètre intérieur d'une conduite.

E

- « e » : Charge élémentaire d'un électron.
- « E » : Tension du bus continu alimentant l'onduleur.
- « Eg » : Energie de Gap.
- « Es » : Ensoleillement.
- « Esref » : Ensoleillement de référence.

F

- « f » : Fréquence de la modulante.
- « FF » : Facteur de forme.
- « f.m.m » : Force magnétomotrice
- « fp » : Fréquence de la porteuse.
- « Fr » : Coefficient de frottement.
- « f(θ) », « s(θ) » : Fonctions de forme des fems et des courants.

H

- « H » : Hauteur.
- « Ha » : Hauteur d'aspiration.
- « HMT » : Hauteur manométrique totale.
- « Hr » : Hauteur de refoulement.

G

- « g » : Pesanteur.
- « GTO » : Gate turn-off

I

- « Icc » : Courant de court-circuit.
- « IGBT » : Insulated-gate bipolar transistor
- « Iph » : Photon courant
- « Isat » : Courant de saturation de la diode.
- « I_{ai}, I_{bi}, I_{ci} » : Courants instantanées des phases de l'étoile i (i=1,2).
- « I_{ar}, I_{br}, I_{cr} » : Courants instantanées rotoriques
- « i_{0i}, i_{di}, i_{qi} » : Courants homopolaire, directe et en quadrature de l'étoile i (i=1,2).

« i_{0r} , i_{dr} , i_{qr} » : Courants homopolaire, directe et en quadrature du rotor.
« $is\alpha$ », « $is\beta$ » : Courants statoriques suivants l'axe α et l'axe β .
« $ir\alpha$ », « $ir\beta$ » : Courants rotoriques suivants l'axe α et l'axe β .
« $iz1$, $iz2$, $iz3$ » : Courants fictifs dans l'espace Z

J

« J » : Moment d'inertie.
« J_c » : Perte de charge.

K

« K » : Constante de Boltzmann.
« K_{fr} » : Constante de canalisation.
« KW » : Kilowatt.
« K_r » : Coefficient de proportionnalité.
« K_0 , K_1 , K_2 » : Constantes propres de la pompe.

L

« L » : longueur de la conduite.
« L_{ms} » : Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle statorique.
« L_{mr} » : Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle rotorique.
« L_r » : Inductance propre du rotor.
« L_{s1} » : Inductance propre du 1er stator.
« L_{s2} » : Inductance propre du 2eme stator.
« L_{sr} » : Valeur maximale des inductances mutuelles entre l'une des étoiles et le rotor.
« L_{sd} », « L_{sq} » : Valeurs maximales des inductances statoriques directe et en quadrature.
« l/min » : Litre par minute.

M

« MASDE » : Machine asynchrone à double étoile.
« MPTT » : Maximum Power Point Tracking .
« M.L.I » : Modulation Largeur d'Impulsion.
« M_d », « M_q » : Valeurs maximales des mutuelles directe, en quadrature.

N

« N » : Vitesse de rotation.
« ncs » : nombre de cellules en série.
« Nm » : Newton- mètre.
« Noct » : Condition de température nominale.
« N_p » : Nombre de branche en parallèle.
« NPSH » : Charge nette à l'aspiration.
« N_s » : Nombre de panneaux en série.

P

« p » : Nombre de paires de pôles.
« P » : Puissance instantanée absorbée.
« P_{ab} » : Puissance absorbée par le moteur.
« $P_{ém}$ » : Puissance électromagnétique emmagasinée.
« P_h » : Puissance hydraulique fournie par la pompe.
« P_j » : Pertes joules.
« Pr » : Pression résiduelle.
« P_{mec} » : Puissance mécanique.
« P&O » : Perturb and Observe.
« P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 » : Constantes.
« $[p(\theta s1)]$ », « $[p(\theta s2)]$ », « $[p(\theta r)]$ » : Matrice de Park

« $[p(\theta s1)]^{-1}$ », « $[p(\theta s2)]^{-1}$ », « $[p(\theta r)]^{-1}$ » : Matrice inverse de Park

Q

« q » : Indice de l'axe en quadrature.

« Q » : Débit.

R

« r » : Indice du rotor

« R_s », « R_p » : Résistance série et résistance parallèle.

« $R_{ai}=R_{bi}=R_{ci}=R_i$ » : Résistance des enroulements de l'étoile i (i=1,2).

« $R_{ar}=R_{br}=R_{cr}=R_r$ » : Résistance des enroulements du rotor.

T

« T_j » : Température de jonction de la cellule

« T_{jref} » : Température de jonction de référence.

V

« v » : vitesse moyenne du fluide.

« V_{co} » : Tension de circuit ouvert.

« $V_p(t)$ » : Equation de la tension de la porteuse.

« V_{ref} » : Tension de référence.

« V_{ai}, V_{bi}, V_{ci} » : tensions instantanées des phases de l'étoile i (i=1,2).

« V_{0i}, V_{di}, V_{qi} » : Tensions homopolaire, directe et en quadrature de l'étoile i (i=1,2).

« V_{z1}, V_{z2}, V_{z3} » : Tensions fictives dans l'espace Z.

« V_α », « V_β » : tensions suivant l'axe α et l'axe β .

W

« W_b » : Weber.

« W_{mag} » : Energie magnétique

ALPHABET GREC

« α » : déphasage entre les deux étoiles statoriques.

« $\Delta H1$ » : Pertes de charge linéaires.

« $\Delta H2$ » : Pertes de charge singulières.

« ϵ » : coefficient de perte de charges locales.

« η » : Rendement.

« θ_r » : déphasage entre le rotor et la première étoile du stator.

« θ_m » : Angle mécanique.

« θ_e » : Angle électrique.

« λ » : Coefficient de perte de charge.

« ρ » : Masse volumique du fluide.

« $\varphi_{ai}, \varphi_{bi}, \varphi_{ci}$ » : Flux statoriques de l'étoile i.

« $\varphi_{ar}, \varphi_{br}, \varphi_{cr}$ » : Flux rotoriques.

« $\varphi_{0i}, \varphi_{di}, \varphi_{qi}$ » : Flux homopolaire, directe et en quadrature de l'étoile i.

« $\varphi_{0r}, \varphi_{dr}, \varphi_{qr}$ » : Flux homopolaire, directe et en quadrature du rotor.

« $\varphi_m, \varphi_{md}, \varphi_{mq}$ » : Flux magnétisant, magnétisant direct et magnétisant en quadrature.

« $\varphi_{s\alpha}$ », « $\varphi_{s\beta}$ » : Flux statoriques selon les axes α et β .

« $\varphi_{r\alpha}$ », « $\varphi_{r\beta}$ » : Flux rotoriques selon les axes α et β .

« Ω » : Vitesse angulaire de rotation.

LISTE
DES
FIGURES

LISTE DES FIGURES

<i>N° de la Figure</i>	<i>Titre de la Figure</i>	<i>N° de Page</i>
CHAPITRE I : LES MACHINES MULTIPHASÉES		
I.1	Machines Multiphasées de type « 1 »	05
I.2	Machines Multiphasées de type « 2 »	06
CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MASDE		
II.1	Représentation des enroulements de la machine asynchrone double étoile	11
II.2	Schéma électrique équivalent de la machine asynchrone double étoile	15
II.3	Représentation angulaire des systèmes d'axe dans l'espace électrique	17
II.4	Représentation du modèle de PARK de la MASDE dans le repère « d-q »	20
II.5	Bloc de Simulation de la Machine asynchrone double étoile	26
II.6	Bloc de simulation de la Transformée de PARK	26
II.7	Bloc de simulation de la Transformée de PARK inverse	27
II.8	Bloc de simulation du réseau électrique	27
II.9	Allure des deux sources de tensions triphasées décalées de 30°	28
II.10	Bloc de simulation global de la MASDE alimentée directement par le réseau	28
II.11	Vitesse de rotation N - Vitesse de synchronisme Ns __Réseau	29
II.12	Couple électromagnétique - Couple résistant __Réseau	30
II.13	Flux direct rotorique - Flux en quadrature rotorique __Réseau	30
II.14	Courants directs - Courants en quadrature __Réseau	31
II.15	Courant statorique ia1 __Réseau	32
II.16	Alimentation du stator par onduleurs de tension __Réseau	33
II.17	Principe de modulation de largeurs d'impulsions sinus-triangle	34
II.18	Bloc de simulation de l'onduleur à commande MLI	36
II.19	Les fonctions sinus-triangle	37
II.20	Tension simple Van1	37
II.21	Intersection tensions de référence et la porteuse	37
II.22	Bloc de simulation global de la MASDE alimentée par onduleurs	38
II.23	Vitesse de rotation N - Vitesse de synchronisme Ns __Onduleur	39
II.24	Couple électromagnétique - Couple résistant __Onduleur	39
II.25	Flux direct rotorique __Onduleur	40
II.26	Flux en quadrature rotorique __Onduleur	40
II.27	Courants directs __Onduleur	40
II.28	Courants en quadratures __Onduleur	40
II.29	Courant statorique ia1 __Onduleur	41

<i>N° de la Figure</i>	<i>Titre de la Figure</i>	<i>N° de Page</i>
CHAPITRE III : ÉTUDE DE LA MASDE EN MODE DÉGRADÉ		
III.1	Représentation schématique d'une chaîne d'énergie	44
III.2	Défaut d'ouverture d'un transistor de puissance	46
III.3	Fusion d'un fusible ultra rapide	46
III.4	Défaut de fermeture d'un interrupteur de puissance ou fusion d'un fusible	47
III.5	Déconnexion des phases en défaut par utilisation de triac	47
III.6	Transformation de la base « a1a2b1b2c1c2 » à la base « $\alpha\beta$ »	51
III.7	Schéma électrique équivalent sous les espaces « $\alpha\beta$ » et « Z »	55
III.8	Bloc de la MASDE dans les repères [α - β] et [Z]	56
III.9	Bloc de simulation global de la MASDE dans les repères [α - β] et [Z]	56
III.10	Couple électromagnétique - Vitesse de rotation	57
III.11	Courants statoriques « ia1, ia2, ib1, ib2, ic1, ic2 »	57
III.12	Bloc de simulation de la MASDE avec la première phase défectueuse	58
III.13	Tensions d'alimentation avec la première phase défectueuse	58
III.14	Couple électromagnétique - Couple résistant __Va1	59
III.15	Vitesse de rotation - Vitesse de synchronisme __Va1	59
III.16	Courants statoriques __Va1	60
III.17	Zooms des courants statoriques __Va1	60
III.18	Tensions d'alimentation « Va1-Vb1-Vc1-Vc2 »	61
III.19	Couple électromagnétique - Couple résistant __Sa2-Sb2	62
III.20	Courants statoriques __Sa2-Sb2	62
III.21	Vitesse de rotation - Vitesse de synchronisme __Sa2-Sb2	62
III.22	Tensions d'alimentation « Va2-Vb2-Vc1-Vc2 »	63
III.23	Vitesse de rotation - Vitesse de synchronisme __Sa1-Sb2	63
III.24	Couple électromagnétique - Couple résistant __Sa1-Sb2	64
III.25	Courants statoriques __Sa1-Sb2	64
III.26	Vitesse de rotation - Vitesse de synchronisme __Sa1-Sc2	65
III.27	Couple électromagnétique - Couple résistant __Sa1-Sc2	65
III.28	Courants statoriques __Sa1-Sc2	65
III.29	Tensions d'alimentation __Etoile1	67
III.30	Vitesse de rotation - vitesse de synchronisme __Etoile1	67
III.31	Couple électromagnétique - Couple résistant __Etoile1	68
III.32	Courants statoriques __Etoile1	68
III.33	Tensions d'alimentation __trois_phases	69
III.34	Vitesse de rotation - vitesse de synchronisme __trois_phases	69
III.35	Couple électromagnétique - Couple résistant __trois_phases	69
III.36	Courants statoriques __trois_phases	70

<i>N° de la Figure</i>	<i>Titre de la Figure</i>	<i>N° de Page</i>
CHAPITRE IV : APPLICATION POMPAGE		
IV.1	Classification des pompes hydrauliques	74
IV.2	Pompes centrifuges	75
IV.3	Différents types de rotor	75
IV.4	Pompe centrifuge à un étage et une aspiration à une ouïe « roue en porte-à-faux »	76
IV.5	Pompe centrifuge à un étage et une aspiration à une ouïe	77
IV.6	Pompe centrifuge à deux roues accolées, deux ouïes, joint horizontal	77
IV.7	Pompe centrifuge multicellulaire	78
IV.8	Disposition du diffuseur et du canal de retour dans les pompes pour puits	78
IV.9	Pompe centrifuge à un étage et une aspiration à une ouïe	79
IV.10	Pompe centrifuge à double aspiration à deux étages de refoulement	79
IV.11	Différentes formes des aubes de la roue	80
IV.12	Pompe centrifuge à un étage et une aspiration à une ouïe	80
IV.13	Groupe de pompage de surface multicellulaire à axe vertical	81
IV.14	Pompe à axe vertical commandée par un moteur placé en surface	81
IV.15	Forage équipé d'un groupe immergé	82
IV.16	Pompes spéciales pour eaux chargées	83
IV.17	Vis d'Archimède	84
IV.18	Pompe à piston horizontale à double effet	84
IV.19	Pompe à fourreau	85
IV.20	Pompe à diaphragme	85
IV.21	Pompe à piston plongeur	86
IV.22	Pompes rotatives	86
IV.23	Aero - éjection	87
IV.24	Cavitation d'une pompe centrifuge	90
IV.25	Dégâts de Cavitation sur les éléments d'une pompe centrifuge	90
IV.26	Caractéristiques « débits – vitesses » d'une pompe centrifuge	91
IV.27	Caractéristiques « Couple – Vitesse » d'une pompe centrifuge	91
IV.28	Caractéristiques « Hmt – Débit » d'une pompe centrifuge	92
IV.29	Caractéristiques de rendement d'une pompe centrifuge	93
IV.30	Bloc de Simulation de la Pompe Centrifuge	94
IV.31	Bloc de Simulation de la Pompe Centrifuge	94
IV.32	Bloc de simulation global de la MASDE couplée à la Pompe Centrifuge	95
IV.33	Couple moteur – couple pompe	95
IV.34	Vitesse de synchronisme – vitesse de rotation	96
IV.35	Caractéristique « Couple-Vitesse de rotation »	96
IV.36	Caractéristique « Débit-Vitesse de rotation »	97
IV.37	Caractéristique du Débit	97
IV.38	Caractéristique « Débit – Hauteur manométrique totale »	98

<i>N° de la Figure</i>	<i>Titre de la Figure</i>	<i>N° de Page</i>
IV.39	Caractéristique « Hauteur manométrique totale – Vitesse de rotation »	98
CHAPITRE V: LE SYSTÈME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE		
V.1	Composantes du rayonnement solaire au sol	103
V.2	Description de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	104
V.3	Quelques Cellules photovoltaïques	104
V.4	Caractéristique type d'un générateur photovoltaïque	105
V.5	Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale	107
V.6	Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle à une Diode	108
V.7	Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle à deux Diodes	110
V.8	Caractéristique résultante d'un groupement en série de ns cellules identiques	111
V.9	Caracté. résultante d'un groupement en parallèle de np cellules identiques	111
V.10	Caracté. résultante d'un groupement hybride de «np+ns » cellules identiques	112
V.11	Allures des différentes associations de cellules photovoltaïques	112
V.12	Schéma électrique équivalent du montage série – parallèle avec protection	114
V.13	Allures des différentes associations de cellules photovoltaïques	114
V.14	Schéma de l'installation photovoltaïque	115
V.15	Schéma électrique du « modèle à deux diodes » pour un groupe de panneaux	115
V.16	Schéma Bloc du Générateur Photovoltaïque	116
V.17	Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation	117
V.18	Schéma du Hacheur Buck - Boost	118
V.19	Schéma du filtre passe-bas	119
V.20	Données de base d'une pompe	119
V.21	Schéma Bloc du Générateur Photovoltaïque	122
V.22	Bloc de simulation global de la motopompe alimentée par le GPV	123
V.23	Variation de l'ensoleillement au cours d'une journée d'été	123
V.24	Couple électromagnétique - Couple résistant__2/18	124
V.25	Vitesse de synchronisme - Vitesse de rotation__2/18	124
V.26	Caractéristique « Couple – Vitesse de rotation » __2/18	124
V.27	Caractéristique « Débit – Vitesse de rotation » __2/18	125
V.28	Caractéristique « Débit – Hauteur manométrique totale » __2/18	125
V.29	Caractéristique « Hauteur manométrique totale – Vitesse de rotation » __2/18	125
V.30	Couple moteur – Couple pompe__3/12	126
V.31	Vitesse de synchronisme – Vitesse de rotation__3/12	126
V.32	Couple résistant – Vitesse de synchronisme__3/12	127
V.33	Couple résistant – Vitesse de rotation__3/12	127
V.34	Couple résistant – Vitesse de rotation__3/12	127
V.35	Caractéristique « Hauteur manométrique totale – Vitesse de rotation » __3/12	128

**LISTE
DES
TABLEAUX**

LISTE DES TABLEAUX

<i>N° du Tableau</i>	<i>Titre du Tableau</i>	<i>N° de Page</i>
II.1	Valeurs des composantes du flux rotorique	31
II.3	Valeurs des composantes du courant selon l'axe « d-q »	31
III.1	Inductances et état du couple d'une marche avec cinq phases saines	61
III.2.a	Inductances et état du couple avec deux phases défectueuses	66
III.2.b	Inductances et état du couple avec deux phases défectueuses (même étoile)	66
III.3.a	Diverses Inductances lors d'un fonctionnement avec une seule étoile	68
III.3.b	Diverses inductances des différentes combinaisons avec trois phases défectueuses n'appartenant pas à la même étoile	70
III.4	Comparaison entre les différentes grandeurs pour les divers défauts	71

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Si nous venions aujourd'hui à reclasser les sept merveilles du monde, l'électricité serait, sûrement, en deuxième position après la vie.

En effet, dès que l'énergie électrique fût découverte, l'humanité innove avec son avènement de nouvelles visions dans les multiples domaines de la vie et le développement n'a pas tardé à se manifester en faisant profiter son créateur des divers avantages que cette énergie inodore et non-polluante lui offre.

La généralisation de l'utilisation de cette énergie a poussé l'homme à puiser les principales ressources provenant des combustibles fossiles comme le charbon, le pétrole, le gaz naturel et même le nucléaire. Les déchets engendrés et l'impact sur l'environnement ainsi que l'épuisement inéluctable de ces énergies fossiles ont conduit à la recherche et au développement de nouvelles sources d'approvisionnement dites «renouvelables», tels la biomasse, l'éolien, la géothermie, la marémotrice et le solaire. [01]

Les machines à vapeur ont cédé leurs places, progressivement, à celles fonctionnant en électricité. Tout au début, la machine à courant continu était la fierté de l'industrie, cet actionneur offrait de hautes performances avec une commande simple où le couple et le flux sont naturellement découplés.

Mais, l'étroitesse de son domaine d'application et l'entretien permanent de ses redresseurs mécaniques qui limitent sa vitesse de rotation, ont poussé les recherches sur la machine à courant alternatif qui présente de nombreux avantages, notamment, en ce qui concerne la simplicité de leur construction et le large domaine de leur utilisation. La robustesse, la fiabilité électromécanique et son faible coût la propulse à être la plus utilisée pour des entraînements à vitesse variable et élevée. [02]

La percée technologique dans le marché des composants électroniques de puissance tels que les thyristors, les triacs, les GTO ou les transistors de forte puissance a apporté un progrès considérable, tant du point de vue de la souplesse d'utilisation, que des qualités dynamiques et de la rentabilité des processus. [03]

Le fait que les machines polyphasées possèdent un nombre élevé de phases, les contraintes appliquées aux interrupteurs et aux bobinages sont réduites. Cette segmentation de puissance permet, entre autres, l'utilisation de composants de puissance ayant une haute fréquence de commutation, ce qui réduit le taux d'harmonique, notamment, celui du couple. [04]

Lors d'une défaillance d'une phase d'alimentation, d'une perte d'un bras d'onduleur ou d'une perte d'un bobinage, la machine multiphasée continue à tourner, permettant une marche en mode dégradé.

Cet avantage a encouragé la généralisation de l'emploi de ces machines polyphasées dans la traction ferroviaire et automobile, la marine, l'avionique, l'aérospatial et l'industrie pétrochimique. [05]

Afin d'optimiser le fonctionnement des machines asynchrones, surtout les machines de fortes puissances, l'idée de construire une machine possédant un rotor et deux étoiles au stator a vu le jour. En effet la machine asynchrone double étoile est née, elle se vante d'être fiable, robuste avec un bon rendement et répondant, avec excellence, aux critères de performances, comparée à la machine simple étoile. Elle permet de réduire les ondulations du couple électromagnétique, de limiter les harmoniques de courant, d'améliorer le facteur de puissance et de fonctionner à demi-régime. [06]

La machine asynchrone double étoile, dont les deux enroulements statoriques sont décalés d'un angle de 30 degrés, est sans doute la plus utilisée pour ces avantages multiples.

Cependant, l'utilisation des onduleurs de tension, pour l'alimentation de ses six enroulements statoriques, provoque des harmoniques de courant, ce qui engendre des pertes supplémentaires. La structure dynamique non linéaire de cet actionneur et l'existence d'un fort couplage entre le flux et le couple compliquent davantage la commande. [01]

Aujourd'hui, le véritable baromètre de croissance des nations est celui de l'eau et de l'énergie. En effet, les Etats sont devant l'obligation d'accéder à l'eau, élément primordial à la survie humaine et celle de la faune et de la flore, et, à maîtriser les diverses ressources énergétiques, pour pouvoir s'imposer et se prétendre être développés.

Le manque, flagrant, de l'eau dans les pays sous-développés cause des épidémies ravageuses aux populations. L'urgence est d'assurer un approvisionnement en eau potable à partir des puits et des nappes phréatiques. Le déplacement de ce fluide, lorsque la pesanteur n'assure pas cette tâche, est effectué par des organes nommés « pompes ». En industrie les pompes composent les deux tiers des machines tournantes.

Même si le gaz et le pétrole sont encore assurés pour bien des années, il demeure essentiel de puiser d'autres ressources d'énergie, soit, en remplacement ou en compensation à celles existantes pour pouvoir assurer une indépendance énergétique.

Les énergies dites « renouvelables » sont des énergies non polluantes, ne produisant pas de gaz à effet de serre, cause principale du réchauffement climatique planétaire. [07]

Avec l'avantage d'être d'origine naturelle et inépuisable, l'énergie du soleil, pour sa facilité de maintenance, s'avère être l'énergie de remplacement, par excellence, la mieux placée pour électrifier les sites isolés des réseaux électriques.

L'utilisation de l'énergie photovoltaïque dans le pompage est devenue, aujourd'hui, une technologie en développement, caractérisée par des coûts graduellement en baisse. Depuis l'utilisation pilote, à la fin des années soixante-dix, ce système de pompage solaire de l'eau s'est étendu pour approvisionner les ménages en eau potable, remplir les abreuvoirs pour le cheptel et irriguer les plantations.

Dans ce modeste essai, un plan de travail est établi pour pouvoir répondre aux objectifs fixés lors de la proposition de ce sujet de recherche, ainsi, il est important d'étaler le contenu de chaque chapitre pour que le lecteur puisse s'y référer.

Le premier chapitre est consacré à des généralités sur les machines multiphasées où sont illustrés, au passage, les avantages et les désavantages et les domaines d'application.

Le second chapitre est réservé, exclusivement, à la machine asynchrone double étoile, par sa modélisation, en vue de son contrôle. L'alimentation directement par le réseau et ensuite par utilisation d'onduleurs de tensions commandés par la technique de modulation de largeurs d'impulsions ont permis de comparer ces deux modes. L'utilisation d'un outil de simulation, à savoir, le logiciel Matlab « SIMULINK », est une aubaine pour suivre le comportement de la machine et l'évolution des différents paramètres, la caractérisant.

Le chapitre trois est spécialement conçu pour résumer les différents modes de fonctionnement en présence d'une défaillance et pour mettre en œuvre l'avantage lié à la marche de la machine en demi-moteur, connue sous le nom « du mode dégradé » où l'actionneur doit toujours fournir un couple moteur, en éliminant les possibles ondulations

Une des applications, et pas des moindres, car il s'agit du pompage d'un fluide, un domaine considéré par une majorité, comme une simple relation liant, le couple résistant au carré de la vitesse de rotation, mais en réalité, le chapitre quatre donne un autre aspect du pompage où il expose les différents modèles existants des pompes, leurs conceptions et leurs caractéristiques. Une simulation d'une pompe centrifuge couplée à la machine asynchrone double étoile est réalisée, et les différents résultats sont commentés.

L'urgence actuelle de développer les techniques de pompage dans les sites isolés est l'élément précurseur pour élaborer le chapitre cinq où un rappel sur le solaire et sur la photopile sont exposés. L'irrégularité de l'ensoleillement durant une journée est la raison pour laquelle le système de pompage « au fil de soleil » étudié, utilise la technique de recherche du point où la puissance est maximale. Un exemple d'approvisionnement d'un village est traité où sont illustrées les différentes caractéristiques utilisées comme support de comparaison.

Une conclusion finale vient, couronner l'ensemble des chapitres présentés dans cette étude, où un rapport sur les objectifs atteints est dressé et les perspectives envisagées sont révélées et confiées.

CHAPITRE I

LES MACHINES MULTIPHASÉES

CHAPITRE I

LES MACHINES MULTIPHASÉES

1 INTRODUCTION

2 Caractéristiques des Machines Multiphasées

2.1 Machines Multiphasées de « Type 1 »

2.2 Machines Multiphasées de « Type 2 »

3 Domaine d'application

4 Avantages de la machine multiphasée

4.1 La segmentation de puissance

4.2 La fiabilité

4.3 Elimination d'harmonique d'espace

4.4 Minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques

4.5 Amélioration du facteur de puissance

5 Inconvénients de la machine multiphasée

5.1 Les courants harmoniques de circulation

5.2 Le coût

5.3 La commande

6/ Conclusion

CHAPITRE I

LES MACHINES MULTIPHASÉES

I.1 INTRODUCTION

Les machines triphasées à courant alternatif assurent une rotation avec variation de vitesse dans les processus industriels et sont devenues des actionneurs incontournables de par leurs robustesses, leurs simplicités de fabrication et leurs alimentations réalisées à base d'onduleurs de tension dont les interrupteurs sont commandés en « Modulation de Largeur d'Impulsion », offrant ainsi de très bonnes performances. [08]

Pour des utilisations à fortes puissances, quelques insuffisances se manifestent, notamment aux niveaux de la machine triphasée et des onduleurs qui doivent commuter des courants importants d'où la nécessité d'utiliser plusieurs structures en parallèle. Mais, un paradoxe apparaît du fait que la réduction des courants à commuter cause l'augmentation des tensions mises en jeu provoquant, ainsi, un vieillissement prématuré des isolants. [08]

Pour réduire ces gradients de tension élevée, il est impératif d'outrepasser la machine triphasée et d'opter pour des machines de structure multi niveaux ayant un nombre de phase supérieur à trois. Ces machines sont, souvent, désignées par « machines à grand nombre de phases » ou « machines multiphasées ». [02][08]

Il est intéressant de savoir que dès les années 20, la notion de double stator a été introduite dans l'industrie pour accroître la puissance des alternateurs synchrones de très forte puissance. [09][10]

Puis un intérêt particulier est porté sur les machines multiphasées pour de diverses raisons, notamment, celles relatives à la segmentation de puissance, la diminution des ondulations du couple électromagnétique, la possibilité de fonctionnement en mode dégradé. [11][12]

I.2 Caractéristiques des Machines Multiphasées

Les machines multiphasées sont classées suivant le nombre de phase statorique qui est ou non multiple de trois, ainsi, deux types de machine se distinguent. [13][14].

I.2.1 Machines Multiphasées de « Type 1 »

Ce type de machine possède un nombre de phases statoriques « q » multiple de trois tel que :

$$q = 3 \cdot \eta \quad \text{avec } (\eta=1,2,3,\dots,n)\dots\dots\dots(I.1)$$

Cela revient à considérer un nombre η d'étoiles triphasées d'où la nomination de « machine multi étoile ».

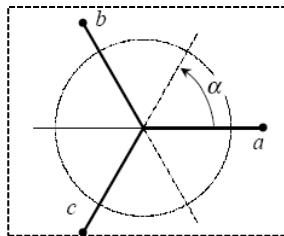
En général, il est préférable d'avoir autant de neutres que d'étoiles en fonctionnement normal. [2]

A noter que pour un même nombre de phases plusieurs configurations sont possibles, suivant le décalage angulaire (α) entre deux bobines adjacentes qui n'est autre que le décalage angulaire entre deux étoiles. [2][8]

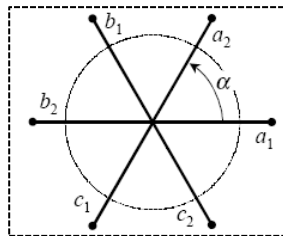
A titre d'exemple, une machine possédant deux étoiles décalées d'un angle ($\alpha=\pi/3$) est de caractéristiques différentes que celle ayant ses étoiles décalées d'un angle ($\alpha=\pi/6$).

Il s'avère donc nécessaire d'introduire un coefficient nommé « nombre équivalent de phases » pour pouvoir différencier entre les configurations possibles. Avec α étant l'angle de décalage entre deux phases, le coefficient est donné par : $q_\alpha = \pi/\alpha \quad \dots(I.2)$

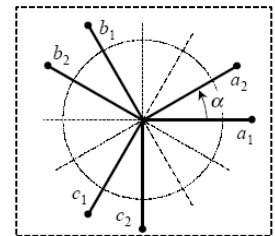
Pour plus de compréhension, quelques configurations possibles sont illustrées par les figures suivantes : [2]



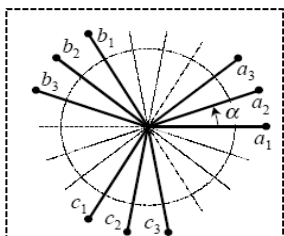
$q=3 \quad q_\alpha=3 \quad \alpha=\pi/3$



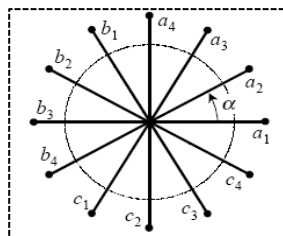
$q=6 \quad q_\alpha=3 \quad \alpha=\pi/3$



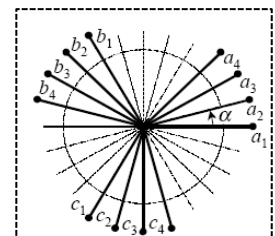
$q=6 \quad q_\alpha=6 \quad \alpha=\pi/6$



$q=9 \quad q_\alpha=9 \quad \alpha=\pi/9$



$q=12 \quad q_\alpha=6 \quad \alpha=\pi/6$



$q=12 \quad q_\alpha=12 \quad \alpha=\pi/12$

q : Nombre de phases q_α : Nombre équivalent de phases α : Décalage angulaire

Machines Multiphasées de type « 1 »
Figure (I.1)

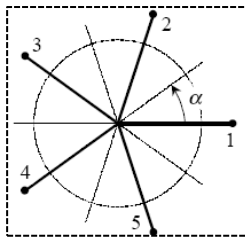
I.2.2 Machines Multiphasées de « Type 2 »

Le type de machine dit ‘type 2’ regroupe les machines multiphasées ayant un nombre de phases statoriques « q » impair.

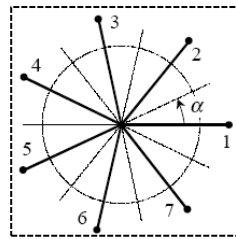
Les q phases sont décalées d’un angle de « $\frac{2*\pi}{q} = 2 * \alpha$ » avec α représentant le décalage angulaire entre deux bobines adjacentes.

$$q = q_{\alpha} = \frac{\pi}{\alpha} \quad \dots \dots (I.3)$$

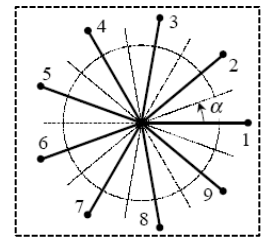
La figure suivante résume quelques configurations de machine multiphasée de type « 2 ». [2]



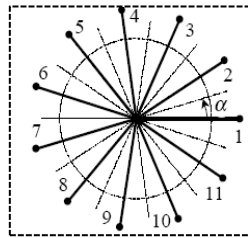
q=5 $q_{\alpha}=5$ $\alpha=\pi/5$



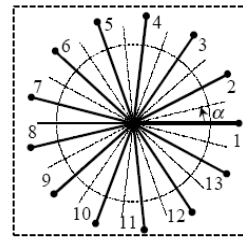
q=7 $q_{\alpha}=7$ $\alpha=\pi/7$



q=9 $q_{\alpha}=9$ $\alpha=\pi/9$



q=11 $q_{\alpha}=11$ $\alpha=\pi/11$



q=13 $q_{\alpha}=13$ $\alpha=\pi/13$

q : Nombre de phases q_{α} : Nombre équivalent de phases α : Décalage angulaire

Machines Multiphasées de type « 2 »
Figure (I.2)

I.3 Domaine d’application

Les machines électriques ayant un grand nombre de phases sont de plus en plus utilisées du fait qu’elles assurent un fonctionnement en mode dégradé.

Déjà, après la première guerre mondiale, dans le but d’augmenter la puissance des alternateurs, cette machine à grand nombre de phases a remplacé les alternateurs conventionnels.

Aujourd'hui, la machine multiphasée est utilisée dans la traction ferroviaire et automobile, la marine, l'avionique et l'aérospatial offrant ainsi une sécurité supplémentaire du point de vue fonctionnement, couple, vibration et bruit. [15]

Dans l'industrie, ces machines sont présentes comme ventilateurs, compresseurs, moulins de compresseurs, moulins de ciment et comme pompes.

I.4 Avantages de la machine multiphasée

Un intérêt distinctif est porté sur les machines multiphasées, notamment, sur les machines asynchrones à double étoile pour leurs avantages multiples qu'elles offrent.

I.4.1/ La segmentation de puissance

Le fait d'augmenter le nombre de phases du stator, le courant par phase est diminué sans que la tension par phase ne soit augmentée. La puissance totale est ainsi répartie sur les différentes phases.

L'onduleur alimentant la machine aura des composants de puissance de calibre inférieur, fonctionnant à des fréquences de commutation plus élevées offrant une minimisation des ondulations de courant et de couple. [16]

I.4.2 La fiabilité

Dans le cas de défaillance d'un des bras ou de plusieurs bras de l'onduleur alimentant la machine multiphasée, le fonctionnement en ce régime dit « régime dégradé » est assuré tant qu'au moins trois phases restent actives.

Il peut y avoir jusqu'à $(q-3)$ phases ouvertes sans que la connexion du neutre ne soit nécessaire.

De ce fait, la machine possédant un très grand nombre de phases offre plus de degré de liberté pour sa commande. [17][18]

I.4.3 Elimination d'harmonique d'espace

Les harmoniques d'espace d'un certain ordre sont éliminées dans les machines multiphasées. A noter que pour un nombre d'encoches donné, plus le nombre de phases augmente, plus le nombre d'encoches par pôle et phase diminue, cela revient à dire que le facteur de distribution du fondamental augmente. [14][19][20]

I.4.4 Minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques

Les machines multiphasées possèdent la propriété d'éliminer les harmoniques du couple du rang faible. Les ondulations du couple sont, plus rapidement, amorties dans une machine ayant plus de phases.

Du fait que certains harmoniques de courant statorique ne créent pas de force magnétomotrice (f.m.m), donc, n'induisent pas de courant au rotor, la machine multiphasée aura moins de perte rotorique. [2]

I.4.5 Amélioration du facteur de puissance

A l'instar des machines à grand nombres de phases, le facteur de puissance de la machine asynchrone à double étoile est amélioré par rapport à la machine asynchrone triphasée. [02]

I.5 Inconvénients de la machine multiphasée

I.5.1 Les courants harmoniques de circulation

Alimenter la machine asynchrone à double étoile, directement, par le réseau prive l'utilisateur d'un contrôle de vitesse et du couple par action simultanée sur la fréquence et sur l'amplitude de la tension statorique. Un tel contrôle est réalisable par l'utilisation d'un onduleur de tension qui, malheureusement, cause des harmoniques de courant d'amplitude importante. [21]

I.5.2 Le coût

Par le fait que le nombre de phases est important, le nombre des semi-conducteurs utilisés augmente aussi, ce qui engendre un surcroît du coût de l'ensemble convertisseur-machine, un compromis qui est sûrement surmonté par la segmentation de la puissance. [14]

I.5.3 La commande

Les méthodes élaborées pour les systèmes triphasés ne peuvent être applicables aux machines multiphasées, ce, qui nécessite le développement de nouvelles techniques rapprochées du convertisseur statique, spécifiques et adaptées. [14][22]

I.6 Conclusion

La recherche encouragée dans le domaine des machines ayant un nombre de phases supérieur à trois est justifiée et s'explique par le fait, que, plus le nombre de phases « q » augmente, plus les interactions entre harmoniques d'espace et de temps sont repoussées vers les rangs supérieurs.

Compte tenu de la propriété naturelle des machines multiphasées à éliminer certaines ondes de force magnétomotrice, leurs conceptions imposent moins de contrainte, notamment, en ce qui concerne le bobinage des enroulements.

Cet avantage, associé à une segmentation de puissance avec une nette amélioration de la fiabilité, place les machines multiphasées dans une position confortable, surtout, pour des puissances élevées.

La machine asynchrone à double étoile est la machine multiphasée la plus utilisée compte tenu du compromis convenable existant entre une segmentation de puissance et l'ensemble des convertisseurs utilisés.

Cette machine est alimentée par deux onduleurs triphasés dont le contrôle est assez connu aujourd'hui, en plus de cela, son stator est assimilable à celui d'une machine triphasée disposant d'un enroulement triphasé supplémentaire, ce qui facilite sa modélisation.

L'apparition des courants harmoniques de circulation lors de l'alimentation par onduleurs de tension demeure l'inconvénient principal de ce genre de machine qui, jusqu'à présent, n'a pas délivré tous ses secrets.

CHAPITRE II

MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE DOUBLE ETOILE (MASDE)

CHAPITRE II

MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE À DOUBLE ÉTOILE (MASDE)

1 Introduction

2 Description de la machine asynchrone à double étoile

3 Modélisation de la machine asynchrone à double étoile

3.1 Hypothèses Simplificatrices

3.2 Modèle de la machine asynchrone à double étoile

3.2.1 Equations électriques de la machine

3.2.2 Equations magnétiques

3.2.3 Equation magnétique de la MASDE développée

3.2.4 Schéma électrique équivalent de la MASDE

3.2.5 Energie magnétique

3.2.6 Couple électromagnétique

3.2.7 Equation mécanique

3.3 Modèle biphasé de la machine asynchrone à double étoile

3.3.1 Transformation de PARK directe

- a) Matrice de PARK de l'étoile 1
- b) Matrice de PARK de l'étoile 2
- c) Matrice de PARK du rotor

3.3.2 Conventions

3.3.3 Transformation de PARK inverse

- a) Matrice de PARK inverse de l'étoile 1
- b) Matrice de PARK inverse de l'étoile 2
- c) Matrice de PARK inverse du rotor

3.3.4 CHOIX DU REFERENTIEL

- a) Référentiel lié au stator
- b) Référentiel lié au rotor
- c) Référentiel lié au champ tournant
- d) Choix du référentiel

3.3.5 Application de la transformation de PARK à la MASDE

- Transformation de tension
- Transformation des courants
- Transformation des flux

3.3.5.1 Equations des tensions

3.3.5.2 Equations magnétiques

3.3.5.3 Equations mécanique

3.3.5.3.1 La puissance instantanée

3.3.5.3.2 Le couple électromagnétique

3.3.5.3.3 Equation mécanique

3.3.6 Mise sous forme d'équation d'état

- **Vecteur d'état**
- **Vecteur d'entrée**
- **Vecteur de commande**
- **Matrice d'évolution du système**
- **Flux magnétisant**

4 Simulation numérique et interprétation de résultat

4.1 Présentation des blocs de simulation

- Bloc de la MASDE**
- La transformée de PARK**
- La transformée de PARK inverse**
- Réseau électrique**

4.2 Simulation de la MASDE alimentée par le réseau électrique

- Vitesse de rotation**
- Couple électromagnétique**
- Flux rotorique**
- Courants direct et en quadrature**
- Courants statoriques**

4.3 Alimentation de la MASDE par des onduleurs de tension

4.3.1 Modélisation de l'onduleur

4.3.2 Commande par modulation des largeurs d'impulsions sinus-triangle

- L'onde modulante**
- La porteuse**
- Critères de performance**
 - L'indice de modulation**
 - Le coefficient de réglage en tension**
 - Observation**

Exemple de MLI

4.3.3 Association « Onduleurs – MASDE »

- Vitesse de rotation**
- Couple électromagnétique**
- Flux rotorique**
- Courants direct et en quadrature**
- Courants statoriques**

5. Conclusion

CHAPITRE II

MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE À DOUBLE ÉTOILE (MASDE)

II.1. INTRODUCTION

Par l'observation et l'analyse des différentes évolutions des grandeurs d'un système, le « modéliser » est une étape primordiale en vue de le contrôler et (ou) de le maîtriser. Donc modéliser, c'est concevoir un modèle mathématique typique de la machine par l'élaboration des lois de commande de son comportement électrique et dynamique.

Quel que soit la complexité de la géométrie de ces machines, il est indispensable de développer un modèle dont le comportement soit le plus proche possible du modèle réel.

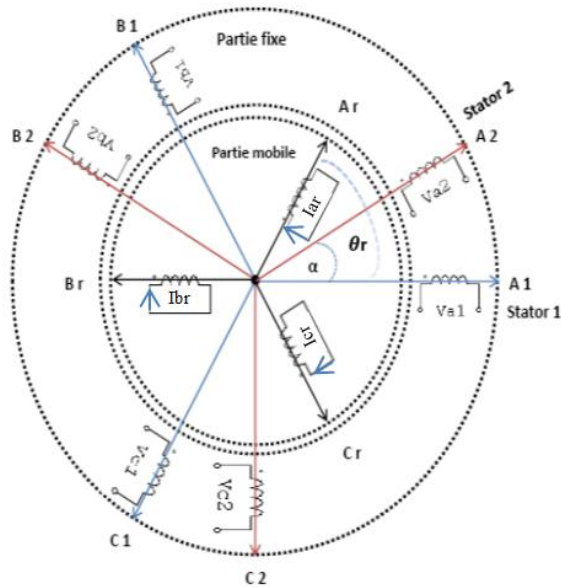
L'étude de la modélisation des machines électriques présente un grand intérêt en raison des impératifs techniques et économiques qui conduisent à concevoir et à exploiter le matériel au voisinage de ses limites technologiques. [23]

II.2. Description de la machine asynchrone à double étoile

La machine asynchrone à double étoile est une machine qui comprend deux stators fixes déphasés d'un angle « α » et un rotor mobile similaire à celui d'une machine asynchrone classique.

Deux sources de tensions triphasées à fréquence et amplitude égales, déphasées entre elles d'un même angle « α », alimentent les deux étoiles du stator.

La machine représentée par la figure (II.1) se compose de deux systèmes d'enroulements statoriques à « p » paires de pôles (A1, B1, C1) et (A2, B2, C2) logés dans des encoches du circuit magnétique, déphasés entre eux d'un angle « $\alpha=30^\circ$ » et un système d'enroulement rotorique (Ar, Br, Cr) représentant le rotor à cage d'écureuil, composé de barres conductrices en aluminium aux tôles ferromagnétiques, déphasé d'un angle « θ_r » par rapport à la première étoile. [02][23]



Représentation des enroulements de la machine asynchrone à double étoile
Figure (II.1)

II.3. Modélisation de la machine asynchrone à double étoile

La répartition des enroulements de la machine asynchrone à double étoile (MASDE) et sa géométrie compliquent, quelque part, l'analyse de cet actionneur.

Des phénomènes difficiles à modéliser comme l'effet de peau et la saturation magnétique rendent l'étude ardue. C'est pour cela, que quelques hypothèses simplificatrices s'imposent en vue d'alléger la formulation mathématique, déjà, assez difficile. L'effet de ces hypothèses sur le comportement de la machine est considéré comme négligeable, ce qui permettra, certainement, d'obtenir des équations simples (moins compliquées) traduisant ainsi le fonctionnement de la machine.

II.3.1. Hypothèses Simplificatrices [24][25][26][27][28]

- La machine est de constitution symétrique et à entrefer d'épaisseur uniforme.
- La saturation du circuit magnétique est négligée.
- Les pertes par courants de Foucault et par hystérésis sont négligeables
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.
- La densité du courant est uniforme dans la section des conducteurs élémentaires (l'effet de peau négligé). [29][30]

- Les valeurs des inductances propres et mutuelles sont indépendantes des intensités de courant.
- La force magnétomotrice, créée par chacune des phases des deux armatures, est considérée à répartition sinusoïdale.

II.3.2. Modèle de la machine asynchrone à double étoile

II.3.2.1. Equations électriques de la machine

En tenant compte des hypothèses simplificatrices, les équations de la machine s'écrivent comme suit [31] :

Pour l'étoile 1

$$\begin{aligned}
 V_{a1} &= R_{a1} * I_{a1} + \frac{d}{dt} \varphi_{a1} \\
 V_{b1} &= R_{b1} * I_{b1} + \frac{d}{dt} \varphi_{b1} \quad \dots \dots \dots (II.1) \\
 V_{c1} &= R_{c1} * I_{c1} + \frac{d}{dt} \varphi_{c1}
 \end{aligned}$$

La forme matricielle est donnée par :

$$[V, abc1] = [R1]. [i, abc1] + \frac{d}{dt} [\varphi, abc1] \dots \dots \dots (II.2)$$

Avec Matrice de tension statorique : $[V, abc1] = \begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{b1} \\ V_{c1} \end{bmatrix}$

Matrice de courant statorique : $[i, abc1] = \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{b1} \\ I_{c1} \end{bmatrix}$

Matrice de résistance de l'étoile 1 du stator : $[R1] = \begin{bmatrix} R_{a1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{b1} & 0 \\ 0 & 0 & R_{c1} \end{bmatrix}$

A noter que : $R_{a1}=R_{b1}=R_{c1}=R1$

Matrice de flux statorique: $[\varphi, abc1] = \begin{bmatrix} \varphi_{a1} \\ \varphi_{b1} \\ \varphi_{c1} \end{bmatrix}$

Pour l'étoile 2

$$\begin{aligned}
 V_{a2} &= R_{a2} * I_{a2} + \frac{d}{dt} \varphi_{a2} \\
 V_{b2} &= R_{b2} * I_{b2} + \frac{d}{dt} \varphi_{b2} \quad \dots \dots \dots (II.3) \\
 V_{c2} &= R_{c2} * I_{c2} + \frac{d}{dt} \varphi_{c2}
 \end{aligned}$$

La forme matricielle est donnée par :

$$[V, abc2] = [R2]. [i, abc2] + \frac{d}{dt} [\varphi, abc2] \quad \dots \dots \dots (II. 4)$$

$$\text{Matrice de tension statorique : } [V, abc2] = \begin{bmatrix} V_{a2} \\ V_{b2} \\ V_{c2} \end{bmatrix}$$

$$\text{Matrice de courant statorique : } [i, abc2] = \begin{bmatrix} I_{a2} \\ I_{b2} \\ I_{c2} \end{bmatrix}$$

$$\text{Matrice de résistance de l'étoile 2 du stator : } R2 = \begin{bmatrix} R_{a2} & 0 & 0 \\ 0 & R_{b2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{c2} \end{bmatrix}$$

A noter que : $R_{a2}=R_{b2}=R_{c2}=R2$

$$\text{Matrice de flux statorique de l'étoile 2 : } [\varphi, abc2] = \begin{bmatrix} \varphi_{a2} \\ \varphi_{b2} \\ \varphi_{c2} \end{bmatrix}$$

Pour le rotor

$$\begin{aligned} 0 &= R_{ar} * I_{ar} + \frac{d}{dt} \varphi_{ar} \\ 0 &= R_{br} * I_{br} + \frac{d}{dt} \varphi_{br} \\ 0 &= R_{cr} * I_{cr} + \frac{d}{dt} \varphi_{cr} \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (II. 5)$$

La forme matricielle est donnée par :

$$[0] = [Rr]. [ir, abc] + \frac{d}{dt} [\varphi r, abc] \quad \dots \dots \dots (II. 6)$$

$$\text{Matrice de courant rotorique : } [ir, abc] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}$$

$$\text{Matrice de résistance du rotor : } Rr = \begin{bmatrix} R_{ar} & 0 & 0 \\ 0 & R_{br} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cr} \end{bmatrix}$$

A noter que : $R_{ar} = R_{br} = R_{cr} = Rr$

$$\text{Matrice de flux rotorique : } [\varphi r, abc] = \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix}$$

II.3.2.2. Equations magnétiques

La matrice suivante exprime la relation entre les flux et les courants tel que : [31][32][33][34]

$$\begin{bmatrix} \varphi, abc1 \\ \varphi, abc2 \\ \varphi r, abc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{s1,s1}] & [L_{s1,s2}] & [L_{s1,r}] \\ [L_{s2,s1}] & [L_{s2,s2}] & [L_{s2,r}] \\ [L_{r,s1}] & [L_{r,s2}] & [L_{r,r}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i, abc1 \\ i, abc2 \\ ir, abc \end{bmatrix} \quad \dots (II. 7).$$

En tenant compte de l'hypothèse simplificatrice usuelle de la représentation sinusoïdale des forces magnétomotrices, nous pouvons écrire :

Matrice inductance de l'étoile 1

$$[[L_{s1,s1}] = \begin{bmatrix} L_{s1} + L_{ms} & \frac{-1}{2} \cdot L_{ms} & \frac{-1}{2} \cdot L_{ms} \\ \frac{-1}{2} \cdot L_{ms} & L_{s1} + L_{ms} & \frac{-1}{2} \cdot L_{ms} \\ \frac{-1}{2} \cdot L_{ms} & \frac{-1}{2} \cdot L_{ms} & L_{s1} + L_{ms} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (II.8).$$

Matrice inductance de l'étoile 2

$$[[L_{s2,s2}] = \begin{bmatrix} L_{s2} + L_{ms} & \frac{-1}{2} \cdot L_{ms} & \frac{-1}{2} \cdot L_{ms} \\ \frac{-1}{2} \cdot L_{ms} & L_{s2} + L_{ms} & \frac{-1}{2} \cdot L_{ms} \\ \frac{-1}{2} \cdot L_{ms} & \frac{-1}{2} \cdot L_{ms} & L_{s2} + L_{ms} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (II.9).$$

Matrice inductance du rotor

$$[[L_{r,r}] = \begin{bmatrix} L_r + L_{mr} & \frac{-1}{2} \cdot L_{mr} & \frac{-1}{2} \cdot L_{mr} \\ \frac{-1}{2} \cdot L_{mr} & L_r + L_{mr} & \frac{-1}{2} \cdot L_{mr} \\ \frac{-1}{2} \cdot L_{mr} & \frac{-1}{2} \cdot L_{mr} & L_r + L_{mr} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (II.10).$$

Matrice inductance mutuelle entre l'étoile 1 et l'étoile 2

$$[[L_{s1,s1}] = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\alpha + 2\pi/3) & \cos(\alpha + 4\pi/3) \\ \cos(\alpha + 4\pi/3) & \cos(\alpha) & \cos(\alpha + 2\pi/3) \\ \cos(\alpha + 2\pi/3) & \cos(\alpha + 4\pi/3) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \dots \dots (II.11).$$

Matrice inductance mutuelle entre l'étoile 1 et le rotor

$$[[L_{s1,r}] = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta + 4\pi/3) \\ \cos(\theta + 4\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta + 4\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \dots (II.12)$$

Matrice inductance mutuelle entre l'étoile 2 et le rotor

$$[[L_{s2,r}] = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \alpha) & \cos(\theta - \alpha + 2\pi/3) & \cos(\theta - \alpha + 4\pi/3) \\ \cos(\theta - \alpha + 4\pi/3) & \cos(\theta - \alpha) & \cos(\theta - \alpha + 2\pi/3) \\ \cos(\theta - \alpha + 2\pi/3) & \cos(\theta - \alpha + 4\pi/3) & \cos(\theta - \alpha) \end{bmatrix} (II.13)$$

Il faudra noter que : $[[L_{s2, s1}]] = [[L_{s1, s2}]]^t$; $[[L_{r, s1}]] = [[L_{s1, r}]]^t$; $[[L_{r, s2}]] = [[L_{s2, r}]]^t$;

L_{s1} : Inductance propre du 1er stator. L_{s2} : Inductance propre du 2eme stator.

L_r : Inductance propre du rotor.

L_{ms} : Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle statorique.

L_{mr} : Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle rotorique.

L_{sr} : Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle entre l'une des étoiles du stator et le rotor.

II.3.2.3. Equation magnétique développée de la MASDE

$$\begin{bmatrix} \varphi_{a1} \\ \varphi_{b1} \\ \varphi_{c1} \\ \varphi_{a2} \\ \varphi_{b2} \\ \varphi_{c2} \\ \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{a1a1} & M_{a1b1} & M_{a1c1} & M_{a1a2} & M_{a1b2} & M_{a1c2} & M_{a1ar} & M_{a1br} & M_{a1cr} \\ M_{b1a1} & L_{b1b1} & M_{b1c1} & M_{b1a2} & M_{b1b2} & M_{b1c2} & M_{b1ar} & M_{b1br} & M_{b1cr} \\ M_{c1a1} & M_{c1b1} & L_{c1c1} & M_{c1a2} & M_{c1b2} & M_{c1c2} & M_{c1ar} & M_{c1br} & M_{c1cr} \\ M_{a2a1} & M_{a2b1} & M_{a2c1} & L_{a2a2} & M_{a2b2} & M_{a2c2} & M_{a2ar} & M_{a2br} & M_{a2cr} \\ M_{b2a1} & M_{b2b1} & M_{b2c1} & M_{b2a2} & L_{b2b2} & M_{b2c2} & M_{b2ar} & M_{b2br} & M_{b2cr} \\ M_{c2a1} & M_{c2b1} & M_{c2c1} & M_{c2a2} & M_{c2b2} & L_{c2c2} & M_{c2ar} & M_{c2br} & M_{c2cr} \\ M_{ara1} & M_{arb1} & M_{arc1} & M_{ara2} & M_{arb2} & M_{arc2} & L_{arar} & M_{arbr} & M_{arcr} \\ M_{bra1} & M_{brb1} & M_{brc1} & M_{bra2} & M_{brb2} & M_{brc2} & M_{brar} & L_{brbr} & M_{brcr} \\ M_{cra1} & M_{crb1} & M_{crc1} & M_{cra2} & M_{crb2} & M_{crc2} & M_{crar} & M_{crbr} & L_{crcr} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{b1} \\ I_{c1} \\ I_{a2} \\ I_{b2} \\ I_{c2} \\ I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \quad (II. 14)$$

II.3.2.4. Schéma électrique équivalent de la MASDE

A partir des équations de la MASDE, un schéma électrique équivalent de cette machine est présenté par la figure (II.2). [08][35]

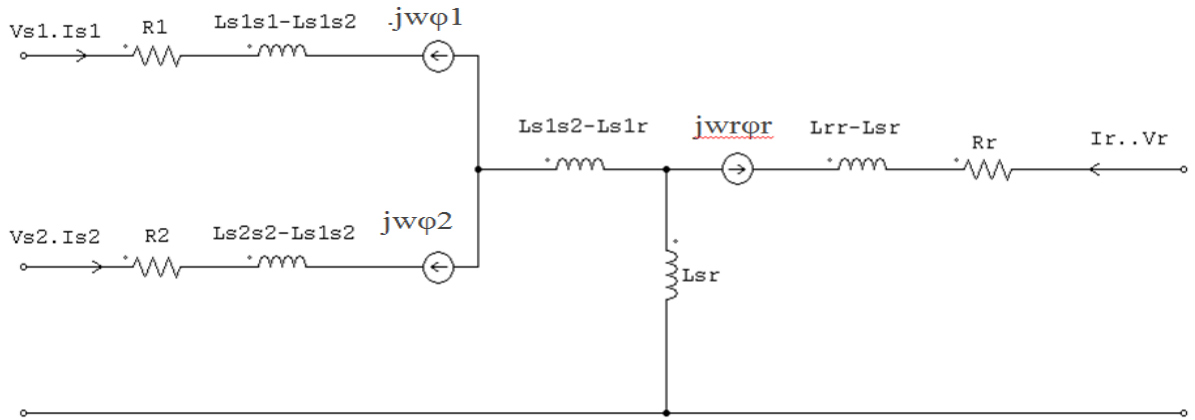


Schéma électrique équivalent de la machine asynchrone double étoile
Figure II.2

II.3.2.5. Energie magnétique

L'expression de l'énergie magnétique est donnée par :

$$\omega_{mag} = \frac{1}{2} ([I_{s1}]^t [\varphi_{s1}] + [I_{s2}]^t [\varphi_{s2}] + [I_r]^t [\varphi_r]) \dots \dots \dots (II. 15)$$

II.3.2.6. Couple électromagnétique

L'expression du couple électromagnétique est obtenue par dérivation de la Co-énergie. L'entrefer de la machine étant de largeur constante, seules les matrices $[M_{sr}]$ et $[M_{sr}]^t$ dépendent de (θ) . [30]

Le couple électromagnétique est alors donné par la dérivée partielle de l'énergie par rapport à l'angle mécanique. [36][37]

$$C_{em} = \frac{d\omega_{mag}}{d\theta_m} = p \cdot \frac{d\omega_{mag}}{d\theta_e} \dots \dots \dots (II. 16)$$

p: nombre de paires de pôle, θ_m : Angle mécanique, θ_e : Angle électrique.

$$\text{Donc: } C_{em} = \frac{p}{2} ([I, abc1] \frac{d}{d\theta r} [L_{s1r}] [I_r, abc]^t + [I, abc2] \frac{d}{d\theta r} [L_{s2r}] [I_r, abc]^t) \dots (II.17)$$

II.3.2.7/ Equation mécanique

L'équation mécanique fondamentale qui régit le mouvement du rotor de la machine peut être donnée par : [02][36][37][38]

$$J. \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - Fr. \Omega \quad (II.18)$$

$$\text{et } \Omega = \frac{\omega r}{p} \quad (II.19)$$

Avec J : Moment d'inertie.

Fr : Coefficient de frottement.

Ω : Vitesse angulaire de rotation.

C_r : Couple résistant ou couple de charge. C_{em} : Couple électromagnétique.

II.3.3. Modèle biphasé de la machine asynchrone à double étoile

Afin d'obtenir un modèle mathématique du système plus simple que le modèle physique, des transformations orthogonales sont utilisées pour obtenir des équations simples par des changements de variables appropriés. [39]

En effet, dans l'étude des machines électriques, ces transformations permettent de convertir un système réel des bobinages rotoriques et statoriques en un système de deux bobinages en quadrature sans interactions magnétiques entre eux. Le système polyphasé est converti en un système biphasé.

II.3.3.1. Transformation de PARK directe

La transformation de Park consiste à transformer les systèmes d'enroulements statoriques et rotoriques en un système équivalent à deux enroulements biphasés créant un champ électromagnétique tournant générant la même force magnétomotrice.

La composante homopolaire est de valeur nulle si le système (a,b,c) est considéré équilibré et symétrique, son axe est choisi orthogonal au plan biphasé de fait qu'elle ne participe pas à la création de cette force magnétomotrice.

En utilisant la matrice de PARK, les grandeurs (courant, tension et flux) d'indices réelles (a,b,c) des deux enroulements statoriques et de l'enroulement rotorique sont converties en grandeurs d'indices (d, q, o) (direct, en quadrature et homopolaire). [32][33][40]

a) Matrice de PARK de l'étoile 1

Matrice de transformation des enroulements statoriques de l'étoile 1.

$$[p(\theta_{s1})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (II.20)$$

b) Matrice de PARK de l'étoile 2

Matrice de transformation des enroulements statoriques de l'étoile 2.

$$[p(\theta_{s2})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta - \alpha) & \cos(\theta - \alpha - 2\pi/3) & \cos(\theta - \alpha + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta - \alpha) & -\sin(\theta - \alpha - 2\pi/3) & -\sin(\theta - \alpha + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \dots \dots (II.21)$$

c) Matrice de PARK du rotor

Matrice de transformation de l'enroulement rotorique.

$$[p(\theta_r)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & \cos(\theta - \theta_r - 2\pi/3) & \cos(\theta - \theta_r + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta - \theta_r) & -\sin(\theta - \theta_r - 2\pi/3) & -\sin(\theta - \theta_r + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \dots (II.22)$$

II.3.3.2. Conventions

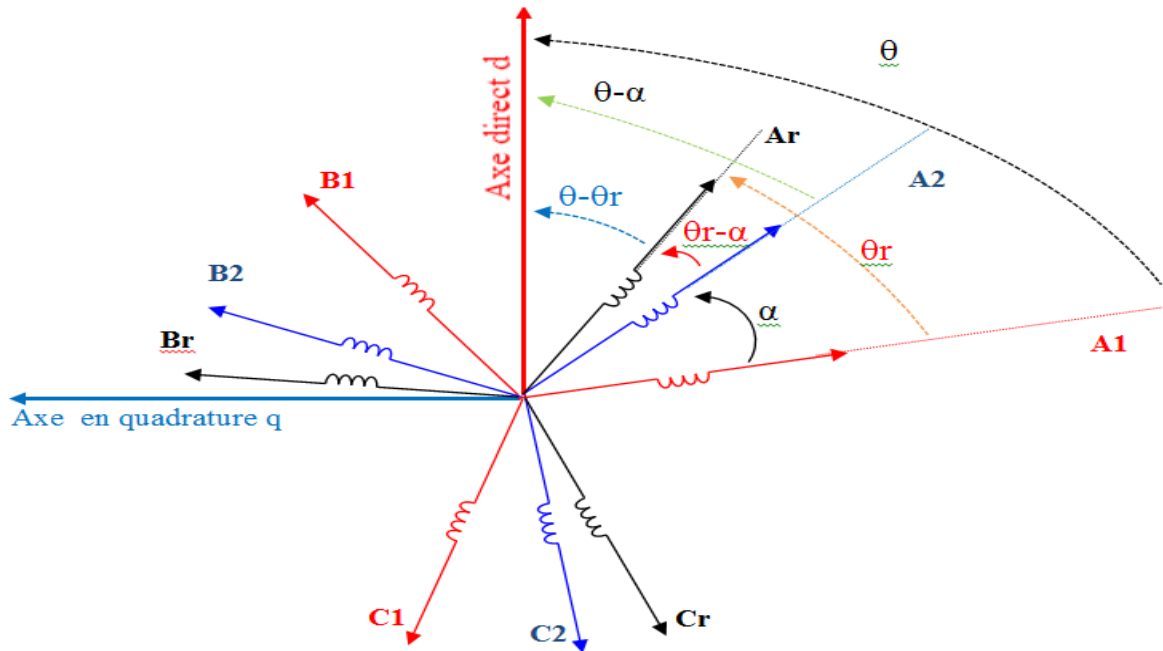
(A1, B1, C1) et (A2, B2, C2) représentent les deux étoiles du stator

(Ar, Br, Cr) représentent les trois phases du rotor.

θ angle de transformation de PARK de l'étoile 1 du stator. [02]

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad \omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \quad \omega_e = \frac{d\theta_e}{dt} = \frac{d\theta}{dt} \quad \dots \dots \dots (II.23)$$

avec $\theta = \theta_e$



Représentation angulaire des systèmes d'axe dans l'espace électrique
Figure II.3

II.3.3.3. Transformation de PARK inverse

Après étude du système, maintenant, simplifié, il est impératif de revenir à la dimension réelle de la machine à travers une autre matrice de passage appelée « matrice de PARK inverse ».

a Matrice de PARK inverse de l'étoile 1

$$[p(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (II.24)$$

b) Matrice de PARK inverse de l'étoile 2

$$[p(\theta - \alpha)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta - \alpha) & -\sin(\theta - \alpha) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - \alpha - 2\pi/3) & -\sin(\theta - \alpha - 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - \alpha + 2\pi/3) & -\sin(\theta - \alpha + 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (II.25)$$

c) Matrice de PARK inverse du rotor

$$[p(\theta - \theta_r)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & -\sin(\theta - \theta_r) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - \theta_r - 2\pi/3) & -\sin(\theta - \theta_r - 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - \theta_r + 2\pi/3) & -\sin(\theta - \theta_r + 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (II.26)$$

II.3.3.4. CHOIX DU REFERENTIEL

L'utilisateur peut disposer de trois référentiels selon la vitesse attribuée au repère « d-q » tel que : [33][40]

a) Référentiel lié au stator

La première phase de la première étoile (A1) coïncide avec l'axe direct (d), pour ce modèle $\theta_s=0$ et $\omega_s=0$.

C'est le référentiel le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées du régime transitoire avec une variation importante de la vitesse de rotation.

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \quad \text{avec} \quad \theta_s = \theta_r + \theta$$

$$\text{donc} \quad \frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta_r}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -p\Omega$$

b) Référentiel lié au rotor

C'est un référentiel souvent utilisé dans le régime transitoire où la vitesse de rotation est considérée constante. La vitesse électrique du repère « d-q » est égale à la pulsation électrique ω_r du rotor.

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \rightarrow \frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta}{dt} = p\Omega$$

c) Référentiel lié au champ tournant

Dans ce référentiel, la vitesse du repère « d-q » est égale à la vitesse du champ tournant ω_s .

$$\text{donc} \quad \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - p\Omega$$

C'est un référentiel qui n'introduit pas des simplifications dans la transformation des équations électriques.

d) Choix du référentiel

L'étude de la MASDE dans ce qui suit se fera avec un référentiel « d-q » lié au champ tournant.

II.3.3.5. Application de la transformation de PARK à la MASDE

Après application de la transformation de Park aux courants, aux tensions et aux flux, un nouveau système d'équation sera mis en évidence tel que :

Les diverses grandeurs se transforment alors en : [36][37][41]

- Transformation de tension

$$[V1] = [P(\theta1)]. [V1p] \quad \text{avec} \quad [V1p] = \begin{bmatrix} V_{01} \\ V_{d1} \\ V_{q1} \end{bmatrix}$$

$$[V2] = [P(\theta2)]. [V2p] \quad \text{avec} \quad [V2p] = \begin{bmatrix} V_{02} \\ V_{d2} \\ V_{q2} \end{bmatrix}$$

- Transformation des courants

$$[i1] = [P(\theta1)]. [I1p] \quad \text{avec} \quad [I1p] = \begin{bmatrix} i_{01} \\ i_{d1} \\ i_{q1} \end{bmatrix}$$

$$[i2] = [P(\theta2)]. [I2p] \quad \text{avec} \quad [I2p] = \begin{bmatrix} i_{02} \\ i_{d2} \\ i_{q2} \end{bmatrix}$$

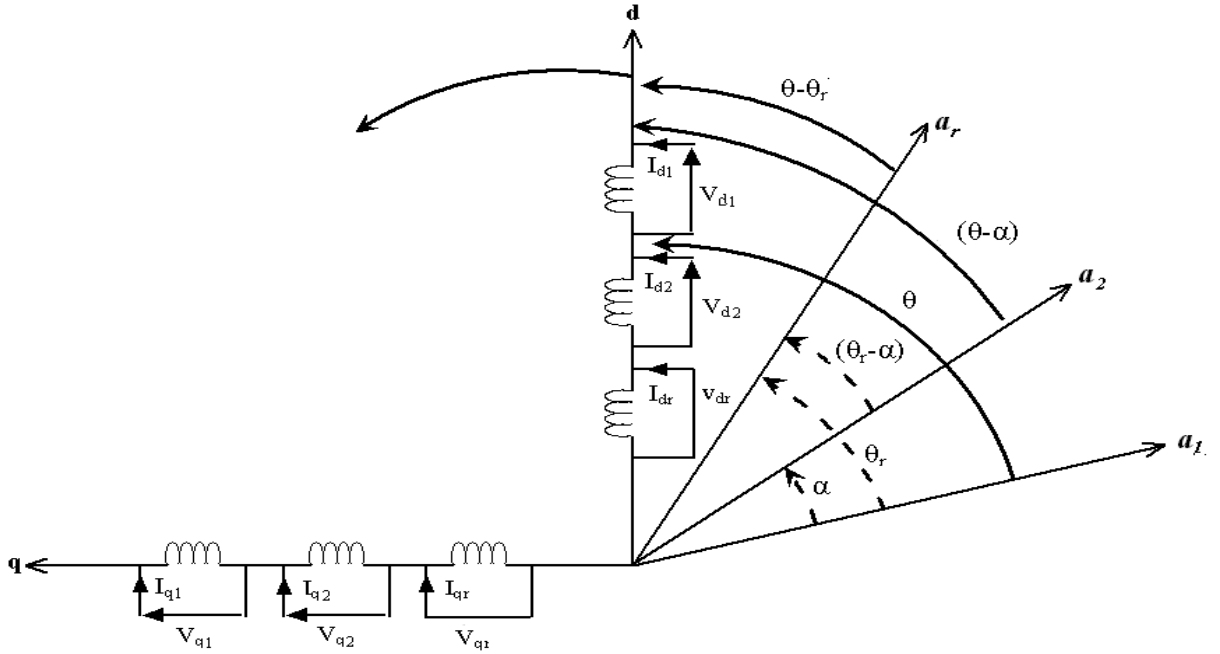
$$[ir] = [P(\theta r)]. [Irp] \quad \text{avec} \quad [Irp] = \begin{bmatrix} i_{0r} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}$$

- Transformation des flux

$$[\varphi1] = [P(\theta1)]. [\varphi1p] \quad \text{avec} \quad [\varphi1p] = \begin{bmatrix} \varphi_{01} \\ \varphi_{d1} \\ \varphi_{q1} \end{bmatrix}$$

$$[\varphi2] = [P(\theta2)]. [\varphi2p] \quad \text{avec} \quad [\varphi2p] = \begin{bmatrix} \varphi_{02} \\ \varphi_{d2} \\ \varphi_{q2} \end{bmatrix}$$

$$[\varphi r] = [P(\theta r)]. [\varphi rp] \quad \text{avec} \quad [\varphi rp] = \begin{bmatrix} \varphi_{0r} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix}.$$



Représentation du modèle de PARK de la MASDE dans le repère « d-q » [39]

Figure II.4

II.3.3.5.1 Equations des tensions

Par application de la transformation de PARK aux équations (II.1), (II.3) et (II.5), il en résulte : [02][08]

Pour le stator 1

$$[P(\theta_1)]. [V1p] = [R_s][P(\theta_1)]. [I1p] + \frac{d}{dt} ([P(\theta_1)]. [\varphi_{1p}])$$

$$\rightarrow \begin{bmatrix} V_{d1} \\ V_{q1} \\ V_{01} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R1 & 0 & 0 \\ 0 & R1 & 0 \\ 0 & 0 & R1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \\ i_{01} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{d1} \\ \varphi_{q1} \\ \varphi_{01} \end{bmatrix} + \frac{d\theta_1}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{d1} \\ \varphi_{q1} \\ \varphi_{01} \end{bmatrix}$$

$$\text{Donc } \begin{cases} V_{d1} = R1. i_{d1} + \frac{d\varphi_{d1}}{dt} - \omega_s. \varphi_{q1} \\ V_{q1} = R1. i_{q1} + \frac{d\varphi_{q1}}{dt} + \omega_s. \varphi_{d1} \end{cases} \quad (\text{II. 27})$$

Pour le stator 2

$$[P(\theta_2)]. [V2p] = [R_s][P(\theta_2)]. [I2p] + \frac{d}{dt} ([P(\theta_2)]. [\varphi_{2p}])$$

$$\rightarrow \begin{bmatrix} V_{d2} \\ V_{q2} \\ V_{02} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R2 & 0 & 0 \\ 0 & R2 & 0 \\ 0 & 0 & R2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d2} \\ i_{q2} \\ i_{02} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{d2} \\ \varphi_{q2} \\ \varphi_{02} \end{bmatrix} + \frac{d\theta_2}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{d2} \\ \varphi_{q2} \\ \varphi_{02} \end{bmatrix}$$

$$\text{Donc } \begin{cases} V_{d2} = R2. i_{d2} + \frac{d\varphi_{d2}}{dt} - \omega_s. \varphi_{q2} \\ V_{q2} = R2. i_{q2} + \frac{d\varphi_{q2}}{dt} + \omega_s. \varphi_{d2} \end{cases} \quad (\text{II. 28})$$

Pour le rotor

les bobines ou les barres de la cage d'écureuil du rotor sont court-circuitées.

$$0 = [R_r][P(\theta_r)].[I_{rp}] + \frac{d}{dt} ([P(\theta_r)].[\varphi_r])$$

$$\rightarrow \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{or} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \\ \varphi_{or} \end{bmatrix} + \frac{d\theta_r}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \\ \varphi_{or} \end{bmatrix}$$

$$\text{Donc} \quad \begin{cases} 0 = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \varphi_{qr} \\ 0 = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \cdot \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

$$\text{Avec: } \frac{d\theta_1}{dt} = \omega_s, \quad \frac{d\theta_2}{dt} = \frac{d(\theta_1 - \alpha)}{dt} = \frac{d\theta_1}{dt} = \omega_s \text{ et } \frac{d\theta_r}{dt} = \frac{d(\theta_1 - \theta)}{dt} = \omega_s - \omega_r = \omega_{gl}$$

Les relations (II.27), (II.28) et (II.28) représentent les équations de tension dans le repère (d-q) qui se résume comme suit:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{d1} = R_1 \cdot i_{d1} + \frac{d\varphi_{d1}}{dt} - \omega_s \cdot \varphi_{q1} \\ V_{q1} = R_1 \cdot i_{q1} + \frac{d\varphi_{q1}}{dt} + \omega_s \cdot \varphi_{d1} \\ V_{d2} = R_2 \cdot i_{d2} + \frac{d\varphi_{d2}}{dt} - \omega_s \cdot \varphi_{q2} \\ V_{q2} = R_2 \cdot i_{q2} + \frac{d\varphi_{q2}}{dt} + \omega_s \cdot \varphi_{d2} \\ 0 = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \varphi_{qr} \\ 0 = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \cdot \varphi_{dr} \end{array} \right. \dots \dots \dots (\text{II.30})$$

II.3.3.5.2 Equations magnétiques

Par application de la transformation de PARK aux équations (II.7), il en résulte : [02][08][26]

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_{d1} = L_1 i_{d1} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{d1} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{d2} + \frac{3}{2} L_{sr} i_{dr} \\ \varphi_{q1} = L_1 i_{q1} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{q1} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{q2} + \frac{3}{2} L_{sr} i_{qr} \\ \varphi_{d2} = L_2 i_{d2} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{d1} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{d2} + \frac{3}{2} L_{sr} i_{dr} \\ \varphi_{q2} = L_2 i_{q2} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{q1} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{q2} + \frac{3}{2} L_{sr} i_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + \frac{3}{2} L_{sr} i_{d1} + \frac{3}{2} L_{sr} i_{d2} + \frac{3}{2} L_{mr} i_{dr} \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + \frac{3}{2} L_{sr} i_{q1} + \frac{3}{2} L_{sr} i_{q2} + \frac{3}{2} L_{mr} i_{qr} \end{array} \right. \dots \dots \dots (\text{II.31})$$

Les diverses inductances propres des deux stators et du rotor ainsi que les inductances mutuelles entre les différents bobinages sont données par :

$$L'inductance propre cyclique du stator 1: L_1 + \frac{3}{2} L_{ms} = L_1 + L_m$$

$$L'inductance propre cyclique du stator 2 : L_2 + \frac{3}{2} L_{ms} = L_2 + L_m$$

L'inductance propre cyclique du rotor : $L_r + \frac{3}{2}L_{mr} = L_r + L_m$

Et L'inductance mutuelle cyclique entre le stator 1, le stator 2 et le rotor est :

$$L_m = \frac{3}{2}L_{ms} = \frac{3}{2}L_{sr} = \frac{3}{2}L_{mr}$$

Etant donné que le stator 1 et le stator 2 sont de conception identique, les inductances propres des phases des deux étoiles ainsi que la résistance des enroulements statoriques sont égales $L1=L2$ et $R1=R2$.

Les équations du flux (II.31) deviennent :

$$\begin{cases} \varphi_{d1} = L_1 i_{d1} + L_m i_{d1} + L_m i_{d2} + L_m i_{dr} \\ \varphi_{q1} = L_1 i_{q1} + L_m i_{q1} + L_m i_{q2} + L_m i_{qr} \\ \varphi_{d2} = L_2 i_{d2} + L_m i_{d1} + L_m i_{d2} + L_m i_{dr} \\ \varphi_{q2} = L_2 i_{q2} + L_m i_{q1} + L_m i_{q2} + L_m i_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{d1} + L_m i_{d2} + L_m i_{dr} \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{q1} + L_m i_{q2} + L_m i_{qr} \end{cases}$$

La forme matricielle est pour :

L'axe direct
$$\begin{bmatrix} \varphi_{d1} \\ \varphi_{d2} \\ \varphi_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 + L_m & L_m & L_m \\ L_m & L_2 + L_m & L_m \\ L_m & L_m & L_r + L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{d2} \\ i_{dr} \end{bmatrix}$$

L'axe en quadrature
$$\begin{bmatrix} \varphi_{q1} \\ \varphi_{q2} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 + L_m & L_m & L_m \\ L_m & L_2 + L_m & L_m \\ L_m & L_m & L_r + L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{q1} \\ i_{q2} \\ i_{qr} \end{bmatrix}$$

Le système d'équations (II.31) devient :

$$\begin{cases} \varphi_{d1} = L_1 i_{d1} + L_m (i_{d1} + i_{d2} + i_{dr}) \\ \varphi_{q1} = L_1 i_{q1} + L_m (i_{q1} + i_{q2} + i_{qr}) \\ \varphi_{d2} = L_2 i_{d2} + L_m (i_{d1} + i_{d2} + i_{dr}) \\ \varphi_{q2} = L_2 i_{q2} + L_m (i_{q1} + i_{q2} + i_{qr}) \\ \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m (i_{d1} + i_{d2} + i_{dr}) \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m (i_{q1} + i_{q2} + i_{qr}) \end{cases} \dots \dots \dots (II.32)$$

II.3.3.5.3 Equations mécaniques

II.3.3.5.3.1 La puissance instantanée

La puissance instantanée absorbée par la machine asynchrone double étoile est donnée par l'expression suivante: [02][08]

$$P = [V_s]^t [i_s] = V_{a1} i_{a1} + V_{b1} i_{b1} + V_{c1} i_{c1} + V_{a2} i_{a2} + V_{b2} i_{b2} + V_{c2} i_{c2} \quad (II.33)$$

Et comme la transformation de Park utilisée repose sur l'invariance de la puissance instantanée, ce qui conduit à leur équivalence physique.

L'équation (II.33) devient :

$$P = V_{d1} \cdot i_{d1} + V_{q1} \cdot i_{q1} + V_{d2} \cdot i_{d2} + V_{q2} \cdot i_{q2} \quad \dots \dots \dots (II.34)$$

Par développement de la relation (II.34) et (II.30),

$$P = \frac{3}{2} \left(R1 \cdot i_{d1} + \frac{d\varphi_{d1}}{dt} - \omega_s \cdot \varphi_{q1} \right) i_{d1} + \frac{3}{2} \left(R2 \cdot i_{d2} + \frac{d\varphi_{d2}}{dt} - \omega_s \cdot \varphi_{q2} \right) i_{d2} \\ + \frac{3}{2} \left(R1 \cdot i_{q1} + \frac{d\varphi_{q1}}{dt} + \omega_s \cdot \varphi_{d1} \right) i_{q1} + \frac{3}{2} \left(R2 \cdot i_{q2} + \frac{d\varphi_{q2}}{dt} + \omega_s \cdot \varphi_{d2} \right) i_{q2}$$

La puissance devient :

$$P = \frac{3}{2} [R1i_{d1}^2 + R2i_{d2}^2 + R1i_{q1}^2 + R2i_{q2}^2] \\ + \frac{3}{2} \left[\frac{d}{dt} \varphi_{d1} i_{d1} + \frac{d}{dt} \varphi_{d2} i_{d2} + \frac{d}{dt} \varphi_{q1} i_{q1} + \frac{d}{dt} \varphi_{q2} i_{q2} \right] \\ + \frac{3\omega_s}{2} [\varphi_{d1} i_{q1} + \varphi_{d2} i_{q2} - \varphi_{q1} i_{d1} - \varphi_{q2} i_{d2}] \quad \dots\dots(II.35)$$

Ainsi, trois termes émanent de l'expression de la puissance représentant : [02][08]

Les pertes joules

$$P_j = \frac{3}{2} [R1i_{d1}^2 + R2i_{d2}^2 + R1i_{q1}^2 + R2i_{q2}^2]$$

Représente les pertes joules statoriques.

La puissance électromagnétique emmagasinée

$$P_{em} = \frac{3}{2} \left[\frac{d}{dt} \varphi_{d1} i_{d1} + \frac{d}{dt} \varphi_{d2} i_{d2} + \frac{d}{dt} \varphi_{q1} i_{q1} + \frac{d}{dt} \varphi_{q2} i_{q2} \right]$$

C'est la variation de l'énergie électromagnétique ou la réserve d'énergie stockée dans le champ.

La puissance mécanique

$$P_{mec} = \frac{3\omega_s}{2} [\varphi_{d1} i_{q1} + \varphi_{d2} i_{q2} - \varphi_{q1} i_{d1} - \varphi_{q2} i_{d2}]$$

Représente la puissance électrique transformée en puissance mécanique avec les pertes fer supposées négligeables.

II.3.3.5.3.2 Le couple électromagnétique

Etant donné la relation entre la puissance et le couple, il en résulte

$$P_{mec} = C_{em} \cdot \Omega \quad \dots\dots(II.36)$$

$$\rightarrow C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{\frac{3\omega_s}{2} [\varphi_{d1} i_{q1} + \varphi_{d2} i_{q2} - \varphi_{q1} i_{d1} - \varphi_{q2} i_{d2}]}{\Omega}$$

$$D'où C_{em} = \frac{3\omega_s}{2\Omega} (\varphi_{d1} i_{q1} + \varphi_{d2} i_{q2} - \varphi_{q1} i_{d1} - \varphi_{q2} i_{d2}) \quad \dots\dots(II.37)$$

Sachant que $\omega_s = p \cdot \Omega$ et p représente le nombre de paires de pole.

Le couple électromagnétique peut s'écrire de la manière suivante :

$$C_{em} = \frac{3}{2}p(\varphi_{d1}i_{q1} + \varphi_{d2}i_{q2} - \varphi_{q1}i_{d1} - \varphi_{q2}i_{d2}) \quad \dots \dots (II.38)$$

Par utilisation des relations du flux développées par les équations (II.32), l'expression du couple deviendra : $C_{em} = \frac{3}{2}pL_m[i_{dr}(i_{q1} + i_{q2}) - i_{qr}(i_{d1} + i_{d2})] \dots \dots (II.39)$

Comme il est possible d'obtenir une relation du couple électromagnétique en fonction des flux rotoriques et des courants directs et en quadratures des deux bobinages fictives du stator ainsi : $\varphi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m(i_{d1} + i_{d2} + i_{dr}) \rightarrow i_{dr} = \frac{\varphi_{dr}}{L_r + L_m} - \frac{L_m}{L_r + L_m}(i_{d1} + i_{d2})$

$$\varphi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m(i_{q1} + i_{q2} + i_{qr}) \rightarrow i_{qr} = \frac{\varphi_{qr}}{L_r + L_m} - \frac{L_m}{L_r + L_m}(i_{q1} + i_{q2})$$

D'où $C_{em} = \frac{3}{2}p \frac{L_m}{L_r + L_m} [\varphi_{dr}(i_{q1} + i_{q2}) - \varphi_{qr}(i_{d1} + i_{d2})] \dots \dots (II.40)$

II.3.3.5.3 Equation mécanique

Le mouvement du rotor est ainsi régi par l'équation mécanique suivante avec $\Omega = \frac{\omega r}{p}$:

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} + Fr \cdot \Omega = C_{em} - C_r \quad (II.41)$$

II.3.3.6 Mise sous forme d'équation d'état

Pour pouvoir commander la machine, il est intéressant de la représenter sous forme d'équation d'état tel que : [40][43] $\frac{dx}{dt} = A \cdot X + B \cdot U \quad (II-42)$

Où : **Vecteur d'état** $X = [\varphi_{d1}, \varphi_{d2}, \varphi_{q1}, \varphi_{q2}, \varphi_{dr}, \varphi_{qr}]^t$

Vecteur d'entrée $U = [V_{d1}, V_{d2}, V_{q1}, V_{q2}, 0, 0]^t$

Vecteur de commande $B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

Matrice d'évolution du système A

Des équations (II.32), après quelques arrangements il en découle :

$$\varphi_{md} = L_m(i_{d1} + i_{d2} + i_{dr}) \quad \dots (II.43)$$

$$\varphi_{mq} = L_m(i_{q1} + i_{q2} + i_{qr}) \quad \dots (II.44)$$

Flux magnétisant $\varphi_m = \sqrt{\varphi_{md}^2 + \varphi_{mq}^2} \quad \dots (II.45)$

Les relations donnant la composante directe et la composante en quadrature du flux magnétisant sont : *Flux direct magnétisant*: $\varphi_{md} = \left(\frac{\varphi_{d1}}{L_1} + \frac{\varphi_{d2}}{L_2} + \frac{\varphi_{dr}}{L_r}\right) L_a$

et *flux en quadrature magnétisant*: $\varphi_{mq} = \left(\frac{\varphi_{q1}}{L_1} + \frac{\varphi_{q2}}{L_2} + \frac{\varphi_{qr}}{L_r}\right) L_a$

$$\text{Avec } \frac{1}{L_a} = \frac{1}{L_m} + \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_r}$$

Les courants seront donc déduits à partir de la relation (II.32) où :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{d1} = \frac{\varphi_{d1} - \varphi_{md}}{L_1} \\ i_{d2} = \frac{\varphi_{d2} - \varphi_{md}}{L_2} \\ i_{q1} = \frac{\varphi_{q1} - \varphi_{mq}}{L_1} \\ i_{q2} = \frac{\varphi_{q2} - \varphi_{mq}}{L_2} \\ i_{dr} = \frac{\varphi_{dr} - \varphi_{md}}{L_r} \\ i_{qr} = \frac{\varphi_{qr} - \varphi_{mq}}{L_r} \end{array} \right. \dots \dots \dots (\text{II.46})$$

$$\text{Et } \left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} \varphi_{d1} = V_{d1} - \frac{R1}{L_1} (\varphi_{d1} - \varphi_{md}) + \omega S \varphi_{q1} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{q1} = V_{q1} - \frac{R1}{L_1} (\varphi_{q1} - \varphi_{mq}) - \omega S \varphi_{d1} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{d2} = V_{d2} - \frac{R2}{L_2} (\varphi_{d2} - \varphi_{md}) + \omega S \varphi_{q2} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{q2} = V_{q2} - \frac{R2}{L_2} (\varphi_{q2} - \varphi_{mq}) - \omega S \varphi_{d2} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{dr} = -\frac{Rr}{L_r} (\varphi_{dr} - \varphi_{md}) + (\omega S - \omega) \varphi_{qr} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{qr} = -\frac{Rr}{L_r} (\varphi_{qr} - \varphi_{mq}) - (\omega S - \omega) \varphi_{dr} \end{array} \right. \dots (\text{II.47})$$

En développant ce système d'équation on aura :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} \varphi_{d1} = V_{d1} - \frac{R1}{L_1} \left(1 - \frac{L_a}{L_1}\right) \varphi_{d1} + \frac{R1L_a}{L_1L_2} \varphi_{d2} + \frac{R1L_a}{L_rL_1} \varphi_{dr} + \omega S \varphi_{q1} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{d2} = V_{d2} + \frac{R2L_a}{L_1L_2} \varphi_{d1} - \frac{R2}{L_2} \left(1 - \frac{L_a}{L_2}\right) \varphi_{d2} + \frac{R2L_a}{L_rL_2} \varphi_{dr} + \omega S \varphi_{q2} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{dr} = \frac{RrL_a}{L_1L_r} \varphi_{d1} + \frac{RrL_a}{L_rL_2} \varphi_{d2} - \frac{Rr}{L_r} \left(1 - \frac{L_a}{L_r}\right) \varphi_{dr} + (\omega S - \omega) \varphi_{qr} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{q1} = V_{q1} - \frac{R1}{L_1} \left(1 - \frac{L_a}{L_1}\right) \varphi_{q1} + \frac{R1L_a}{L_1L_2} \varphi_{q2} + \frac{R1L_a}{L_rL_1} \varphi_{qr} - \omega S \varphi_{d1} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{q2} = V_{q2} + \frac{R2L_a}{L_1L_2} \varphi_{q1} - \frac{R2}{L_2} \left(1 - \frac{L_a}{L_2}\right) \varphi_{q2} + \frac{R2L_a}{L_rL_2} \varphi_{qr} - \omega S \varphi_{d2} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{qr} = \frac{RrL_a}{L_1L_r} \varphi_{q1} + \frac{RrL_a}{L_rL_2} \varphi_{q2} - \frac{Rr}{L_r} \left(1 - \frac{L_a}{L_r}\right) \varphi_{qr} - (\omega S - \omega) \varphi_{dr} \end{array} \right. \dots (\text{II.48})$$

D'où :

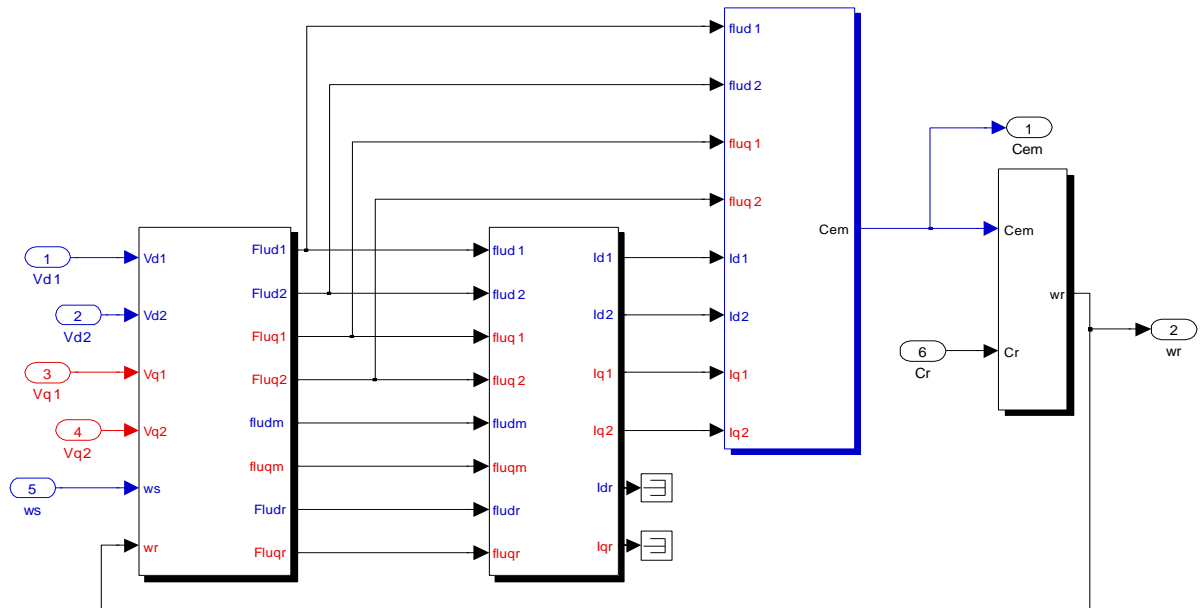
$$\mathbf{A} = \left[\begin{array}{cccccc} -\frac{R1}{L_1} \left(1 - \frac{L_a}{L_1}\right) & \frac{R1L_a}{L_1L_2} & \omega S & 0 & \frac{R1L_a}{L_rL_1} & 0 \\ \frac{R2L_a}{L_1L_2} & -\frac{R2}{L_2} \left(1 - \frac{L_a}{L_2}\right) & 0 & \omega S & \frac{R2L_a}{L_rL_2} & 0 \\ -\omega S & 0 & -\frac{R1}{L_1} \left(1 - \frac{L_a}{L_1}\right) & \frac{R1L_a}{L_1L_2} & 0 & \frac{R1L_a}{L_rL_1} \\ 0 & -\omega S & \frac{R2L_a}{L_1L_2} & -\frac{R2}{L_2} \left(1 - \frac{L_a}{L_2}\right) & 0 & \frac{R2L_a}{L_rL_2} \\ \frac{RrL_a}{L_1L_r} & \frac{RrL_a}{L_rL_2} & 0 & 0 & -\frac{Rr}{L_r} \left(1 - \frac{L_a}{L_r}\right) & (\omega S - \omega) \\ 0 & 0 & \frac{RrL_a}{L_1L_r} & \frac{RrL_a}{L_rL_2} & -(\omega S - \omega) & -\frac{Rr}{L_r} \left(1 - \frac{L_a}{L_r}\right) \end{array} \right] \dots (\text{II.49})$$

II.4 Simulation numérique de la MASDE et interprétation des résultats

Pour les besoins de simulation numérique du comportement de la machine asynchrone à double étoile, le choix s'est porté sur l'utilisation du logiciel MATLAB SIMULINK. [44]

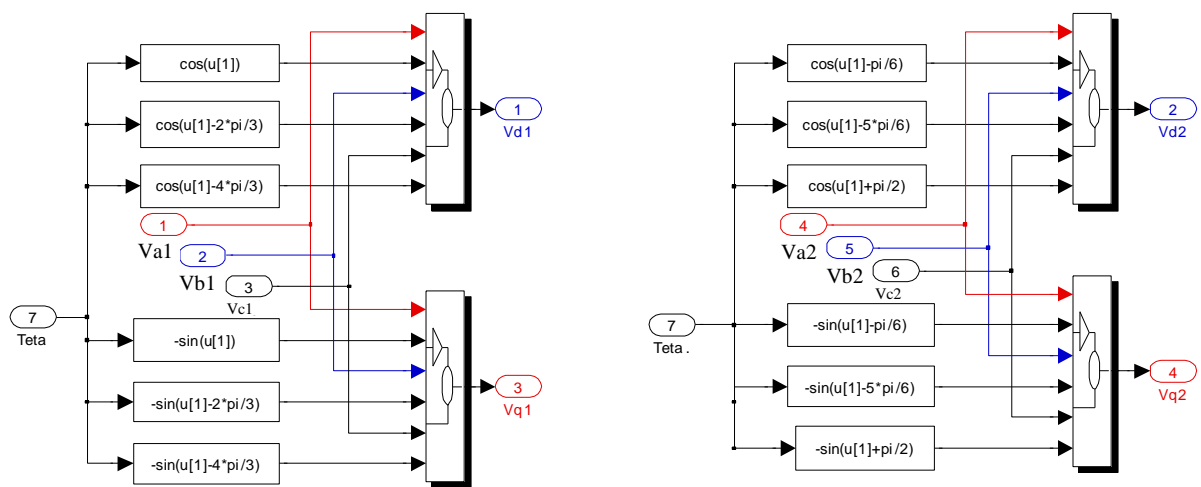
II.4.1 Présentation des blocs de simulation

a) Bloc de la MASDE



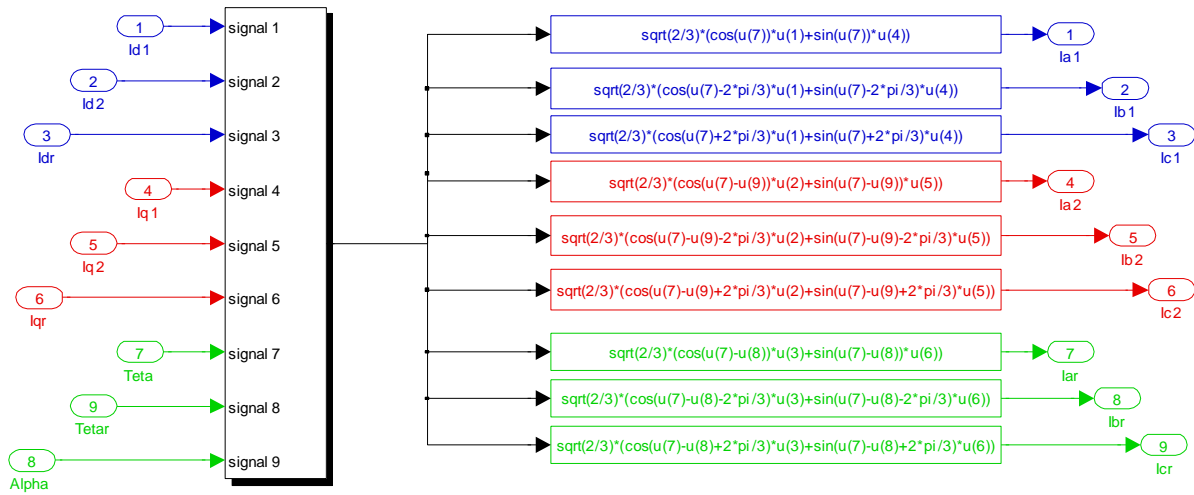
Bloc de Simulation de la Machine asynchrone double étoile
Figure (II.5)

b) La transformée de PARK



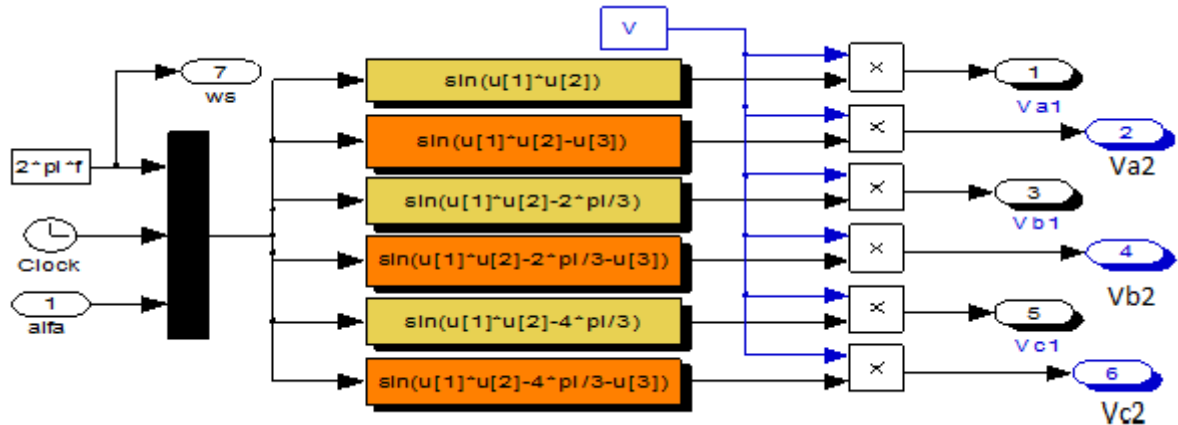
Bloc de simulation de la Transformée de PARK
Figure (II.6)

c) La transformée de PARK inverse



Bloc de simulation de la Transformée de PARK inverse
Figure (II.7)

d) Réseau électrique



Bloc de simulation du réseau électrique
Figure (II.8)

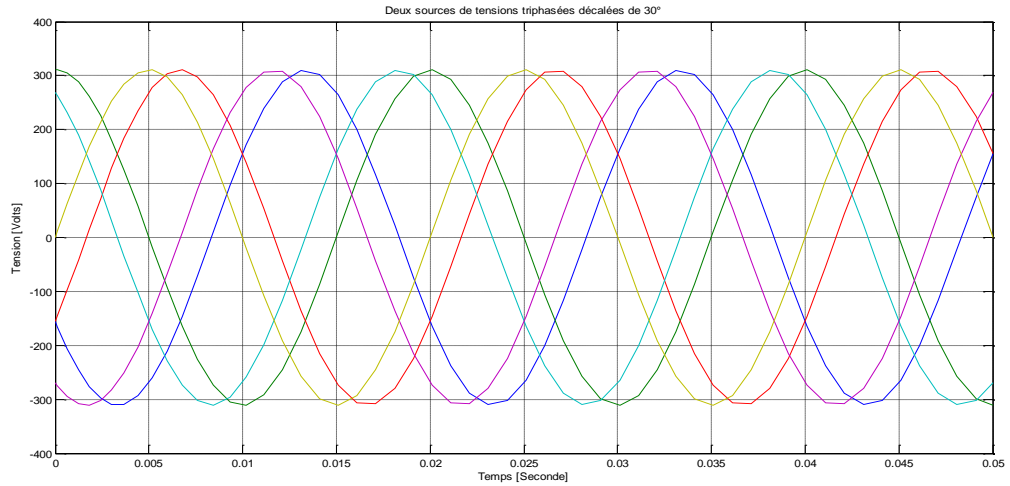
Deux sources de tensions triphasées décalées de 30° alimentent les deux étoiles du stator.

Source de tension alimentant la première étoile

$$\begin{cases} V_{a1} = V_m \cdot \sin(\omega s \cdot t) \\ V_{b1} = V_m \cdot \sin(\omega s \cdot t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_{c1} = V_m \cdot \sin(\omega s \cdot t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \dots \dots \dots (II.50)$$

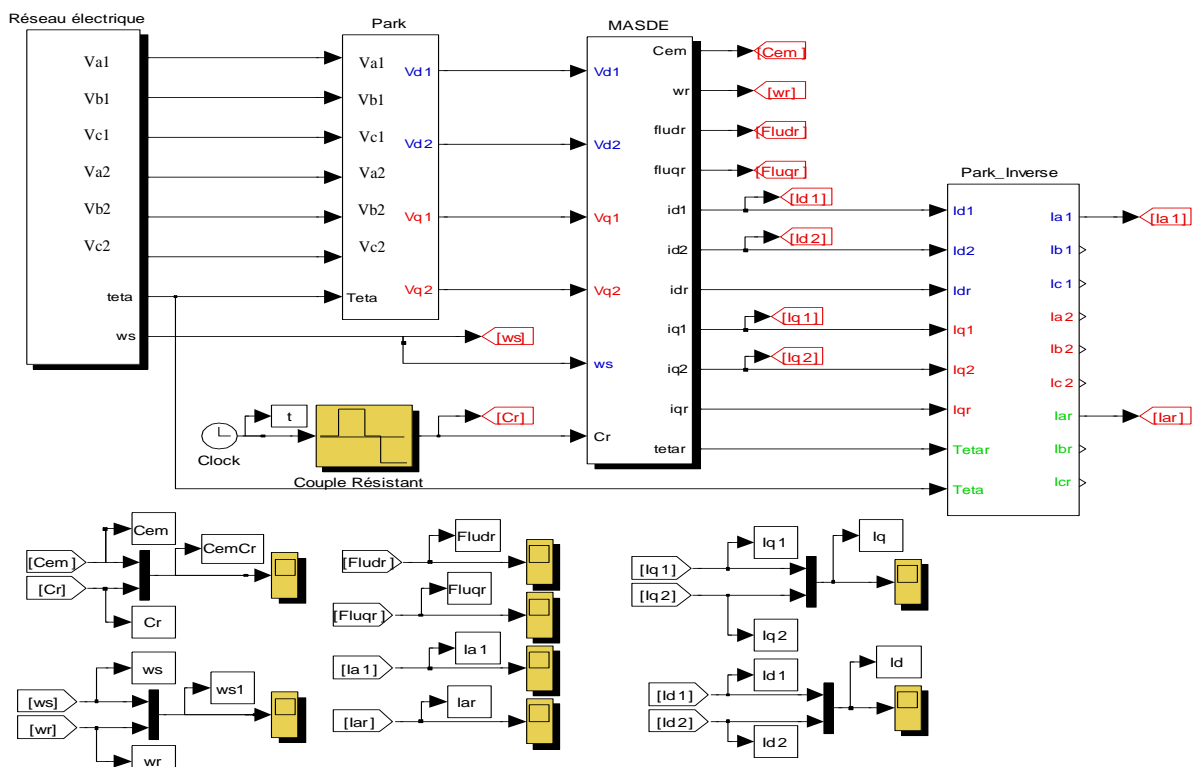
Source de tension alimentant la deuxième étoile

$$\begin{cases} V_{a2} = V_m \cdot \sin(\omega s \cdot t - \frac{\pi}{6}) \\ V_{b2} = V_m \cdot \sin(\omega s \cdot t - \frac{5\pi}{6}) \\ V_{c2} = V_m \cdot \sin(\omega s \cdot t - \frac{3\pi}{2}) \end{cases} \dots \dots \dots (II.51)$$



Allure des deux sources de tensions triphasées décalées de 30°
Figure (II.9)

II.4.2 Simulation de la MASDE alimentée par le réseau électrique



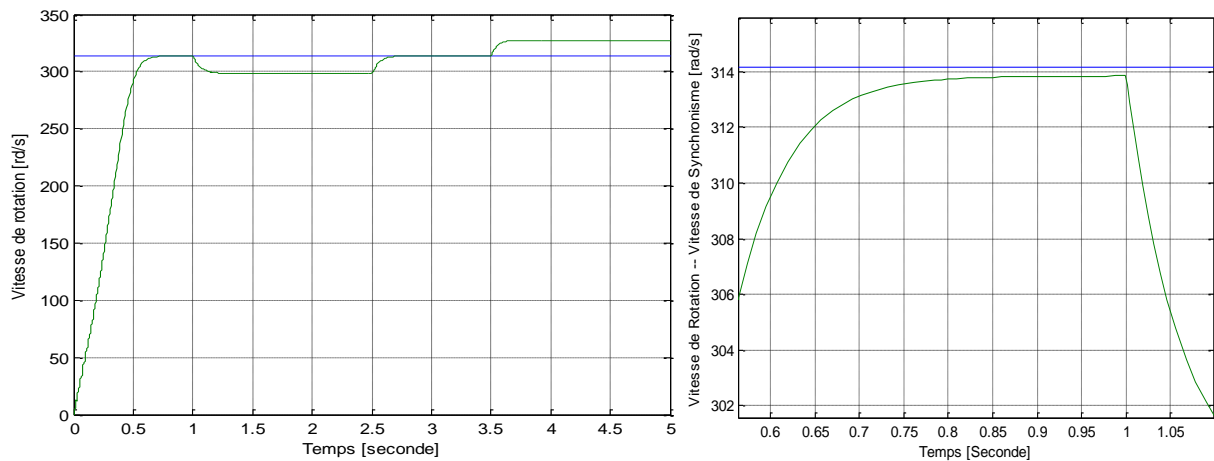
Bloc de simulation global de la MASDE alimentée directement par le réseau
Figure (II.10)

Il est intéressant d'alimenter la machine directement par le réseau électrique, pour pouvoir étudier son comportement. En effet deux sources de tensions triphasées équilibrées décalées entre elles d'un angle $\alpha=30^\circ$, sont utilisées pour alimenter les deux stators de la machine.

La machine, tout d'abord, tourne à vide, puis dans l'intervalle de temps [1sec, 2.5sec] est appliquée une charge d'une valeur du couple résistant égale à « 14 Nm », ensuite la charge est déconnectée dans l'intervalle [2.5, 3.5] et enfin au-delà de $t=3.5$ sec est connectée une charge de « -14 Nm ».

a) Vitesse de rotation

La figure (II.11) retrace l'évolution de la vitesse de rotation de la machine exprimée en rd/s en fonction du temps. En effet au démarrage, la machine étant à vide, la vitesse augmente d'une manière presque linéaire pour atteindre la vitesse de « 313.83 rd/s » très proche de la vitesse de synchronisme « 314.16 rd/s ».



Vitesse de rotation N [rd/s] - Vitesse de synchronisme N_s [rd/s]
Figure (II.11)

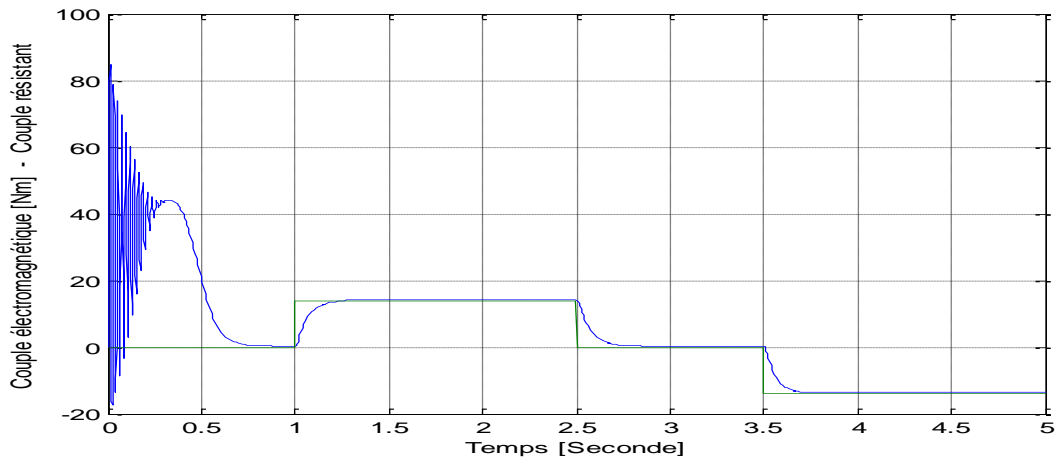
A $t=1$ sec, lors de la connexion de la charge « $Cr = 14Nm$ », la machine fonctionne comme moteur et la vitesse de rotation glisse jusqu'à « $N = 298$ rd/s », puis, au moment où la charge est séparée, l'arbre de la machine retrouve sa vitesse proche de celle du synchronisme.

Immédiatement après l'application de la charge « $Cr = -14Nm$ », à $t=3.5$ sec où la machine fonctionne comme génératrice, l'arbre de la machine est entraîné à une vitesse de rotation de « 327.35 rd/s ».

b) Couple électromagnétique

Au démarrage le couple prend une forme vibratoire et atteint des valeurs proches de 80 Nm, puis au bout de 0.3 sec à 40 Nm, les vibrations s'estompent avant d'atteindre une valeur

à vide de « $C_r = 0.32 \text{ Nm}$ » qui correspond aux pertes fer à vide et aux pertes mécaniques par frottement.

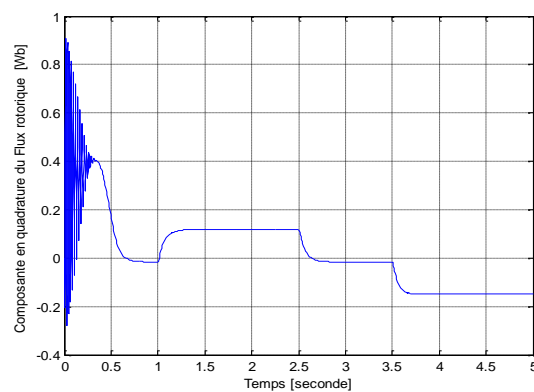
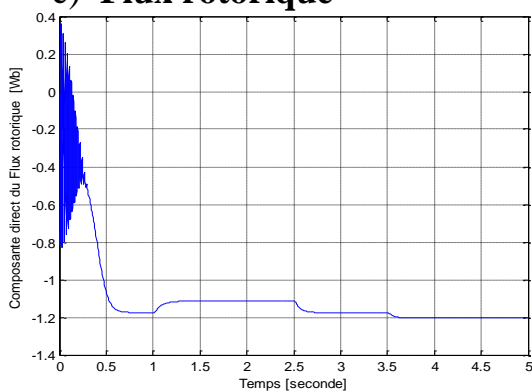


Couple électromagnétique [Nm] - Couple résistant [Nm]
Figure (II.12)

A $t=1\text{sec}$, le couple électromagnétique passe, dans un laps de temps de 0.3seconde, de la valeur « 0.32 Nm » à « 14.3 Nm » en suivant la valeur du couple résistant. A $t=2.5\text{sec}$, lors du débranchement de la charge, le couple électromagnétique chute et reprend sa valeur à vide, c'est-à-dire « 0.32 Nm ».

A $t=3.5\text{sec}$, la machine est entraînée à une vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme, le fonctionnement de la machine étant en mode génératrice, le couple suit de près la référence du couple résistant, ainsi le couple électromagnétique passe de la valeur « 0.32 Nm » à « -13.7 Nm » dans un espace de temps de 0.2 seconde.

c) Flux rotorique



Flux direct rotorique [Wb]

Flux en quadrature rotorique [Wb]

Figure (II.13)

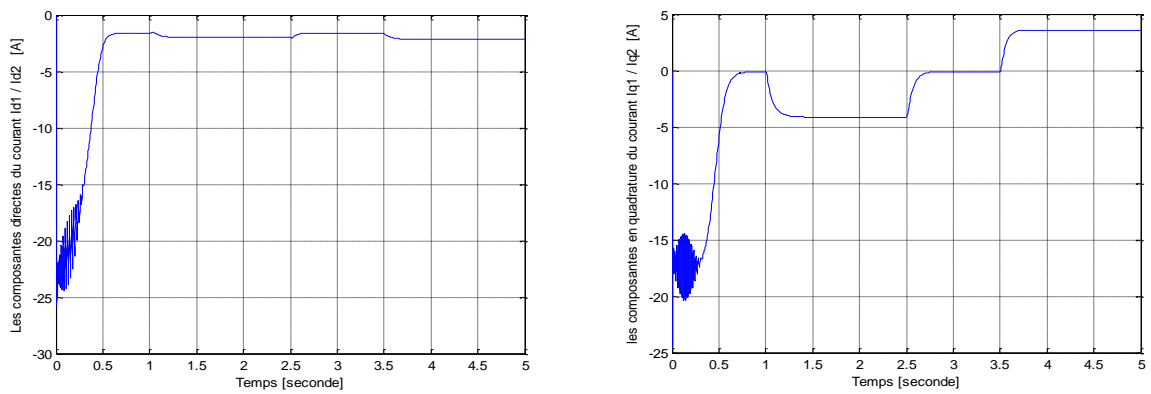
Le tableau suivant résume les valeurs des deux composantes du flux selon les différents modes de fonctionnement de la machine.

	Vide [0sec-1sec]	Moteur [1sec -205sec]	Vide [2.5sec – 3.5sec]	Générateur [3.5sec – 5sec]
Flux direct rotorique ϕ_{dr} [Wb]	-1.1753	-1.114	-1.1753	-1.2023
Flux en quadrature rotorique ϕ_{qr} [Wb]	-0.0157	0.1181	-0.0157	-0.1491

Tableau (II.1)
Valeurs des composantes du flux rotorique

Selon les figures (II.13), l'allure du flux rotorique direct et du flux rotorique en quadrature ressemble de très près à l'allure du couple électromagnétique figure (II.12).

d) Courants direct et en quadrature



Courants directs

Courants en quadrature

Figure (II.14)

Selon les figures (II.14), les allures des composantes directes et en quadrature du courant évoluent d'une manière analogue à l'évolution de la vitesse de rotation de la machine.

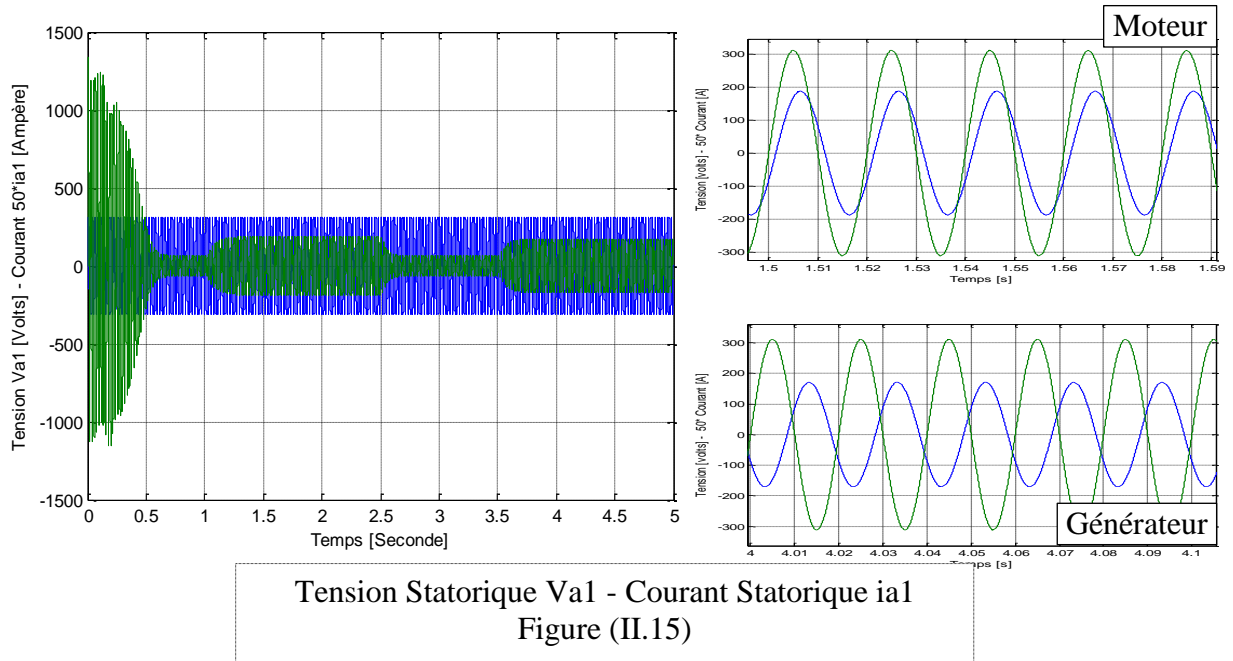
Au démarrage de la machine, quelques vibrations sont enregistrées pendant près de 0.4 seconde, atteignant pour les courants directs les valeurs de $I_{d1}=I_{d2}=-24.4A$ et pour la valeur du courant selon l'axe en quadrature $I_{q1}=I_{q2}=-20A$, avant que les courants ne prennent des valeurs finales résumées dans le tableau (II.2) selon le mode de fonctionnement de la machine.

	Vide [0sec-1sec]	Moteur [1sec -205sec]	Vide [2.5sec – 3.5sec]	Générateur [3.5sec – 5sec]
Courant direct $I_{d1} - I_{d2}$ [A]	-1.63	-2.00	-1.63	-2.13
Courant en quadrature $I_{q1} - I_{q2}$ [A]	-0.11	-4.14	-0.11	3.6

Valeurs des composantes du Courant selon l'axe « d – q »
Tableau (II.2)

e) Courants statoriques

Au démarrage, les courants absorbés par les deux étoiles du stator atteignent des valeurs de presque quatre fois le courant nominal soit « 24A ». Dans le cas des répétitions excessives, ces courants de démarrage peuvent être à l'origine de la destruction par échauffement des enroulements du stator de la machine. Le régime permanent est atteint après une période de « 0.6 seconde » et la machine absorbe un courant d'une valeur « 1.33A » à vide.



Lors de la connexion de la charge, la machine absorbe du réseau davantage de courant selon la nature de la charge. En mode moteur le courant oscille autour de « 3.7A », par contre, en fonctionnement générateur le courant passe à « 3.4A » environ.

L'effet inductif de la machine explique le déphasage en arrière du courant statorique ia1, par rapport, à la tension d'alimentation Va1. D'où le sens de transition de la puissance est positif de fait que les deux grandeurs sont de même signe, cela veut dire que la machine absorbe de l'énergie active et réactive nécessaire pour l'alimentation de la charge et pour sa magnétisation.

En mode générateur, le fait que la tension Va1 et le courant ia1 sont presque déphasés de π , la puissance produite est de signe négatif, cela veut dire que la machine fournit de l'énergie active à la source et absorbe une certaine portion de l'énergie réactive nécessaire pour sa magnétisation.

II.4.3 Alimentation de la MASDE par des onduleurs de tension

Si la machine asynchrone est connectée directement au réseau électrique, un handicap sérieux apparaît, celui « de ne pouvoir varier la vitesse ». C'est pour cette simple raison que les applications industrielles optent pour une alimentation via des onduleurs de tension qui

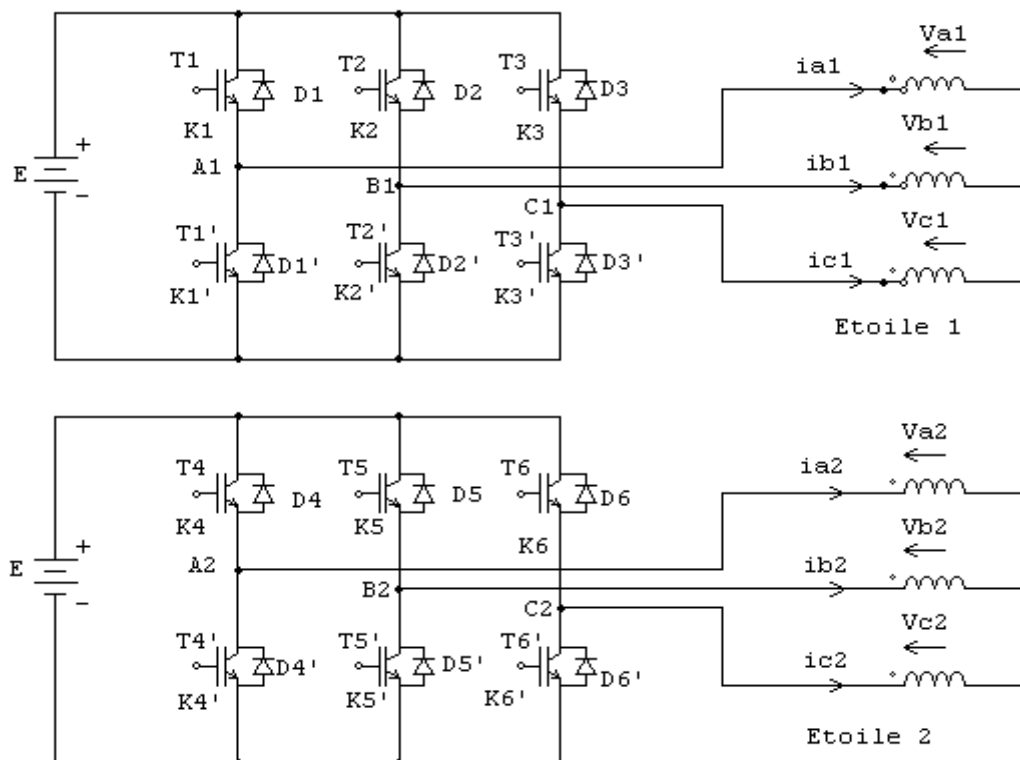
permettent, ainsi, ce contrôle, par action simultanée sur la fréquence et l'amplitude de la tension statorique.

Un onduleur autonome est un convertisseur statique qui assure la transformation de l'énergie d'une source continue en une source d'énergie alternative de fréquence fixe ou variable. [02][45]

Les onduleurs sont des structures en pont, constituées, le plus souvent, d'interrupteurs électroniques tels que les IGBT, de transistors de puissance ou thyristors. Par un jeu de commutations commandées de manière appropriée, généralement, par modulation de largeur d'impulsion, la source est modulée afin d'obtenir un signal alternatif de fréquence désirée. [02][35][43]

II.4.3.1 Modélisation de l'onduleur

Pour pouvoir alimenter les deux étoiles de la machine, deux onduleurs triphasés, à commutations commandées, sont utilisés. Chaque onduleur est constitué de trois bras composés de deux paires d'interrupteurs supposés parfaits. Les commandes sont alors disjointes, mais, complémentaires. [02][46]



Alimentation du stator par onduleurs de tension
Figure (II.16)

L'interrupteur est représenté par une paire de « transistor-diode » modélisée par la fonction logique suivante : [02]

$$f_i = \begin{cases} 1 & \text{l'interrupteur " i " est fermé (Ki conduit-Ki' bloqué)} \\ 0 & \text{l'interrupteur " i " est ouvert (Ki bloqué -Ki' conduit)} \end{cases} \quad (II.52)$$

$$\text{Avec } f_i + \bar{f}_i = 1 \quad i = 1,2,3,4,5,6$$

Les tensions composées sont définies comme :

$$\begin{cases} V_{A1B1} = V_{a1} - V_{b1} = E(f_1 - f_2) \\ V_{B1C1} = V_{b1} - V_{c1} = E(f_2 - f_3) \\ V_{C1A1} = V_{c1} - V_{a1} = E(f_3 - f_1) \\ \dots \dots \dots (II.53) \\ V_{A2B2} = V_{a2} - V_{b2} = E(f_4 - f_5) \\ V_{B2C2} = V_{b2} - V_{c2} = E(f_5 - f_6) \\ V_{C2A2} = V_{c2} - V_{a2} = E(f_6 - f_4) \end{cases}$$

Les deux systèmes de tension simples sont équilibrés :

$$\Leftrightarrow \begin{cases} V_{a1} + V_{b1} + V_{c1} = 0 \\ V_{a2} + V_{b2} + V_{c2} = 0 \end{cases} \dots \dots \dots (II.54)$$

La résolution des équations (II.53) et (II.54) donne :

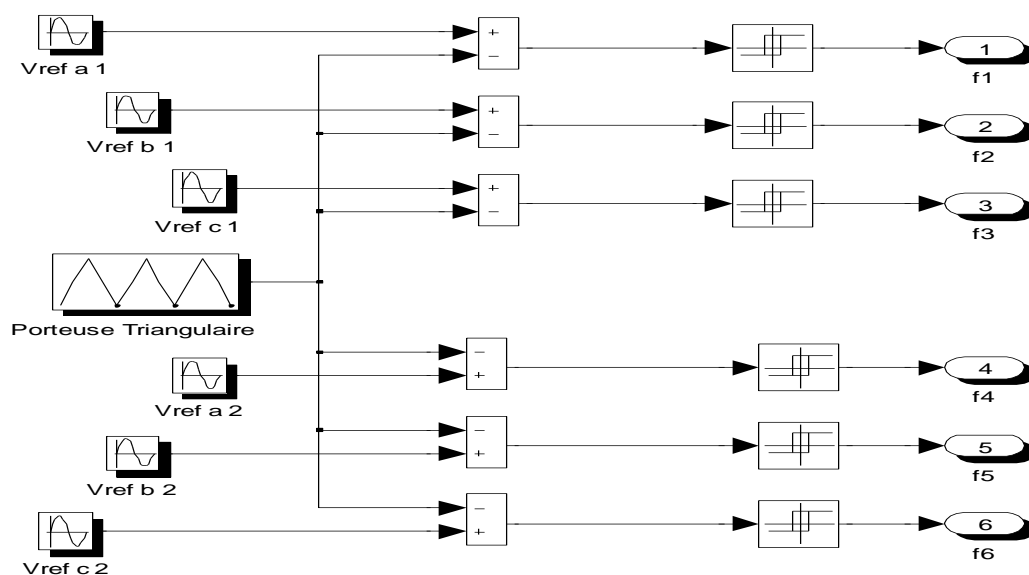
Onduleur 1

$$\begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{b1} \\ V_{c1} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (II.55)$$

Onduleur 2

$$\begin{bmatrix} V_{a2} \\ V_{b2} \\ V_{c2} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (II.56)$$

II.4.3.2 Commande par modulation des largeurs d'impulsions sinus-triangle



Principe de modulation de largeurs d'impulsions sinus-triangle
Figure (II.17)

La technique de modulation des largeurs d'impulsions « MLI » consiste à changer la largeur des impulsions de la tension de sortie avec des commandes appropriées, des interrupteurs à semi-conducteurs de l'onduleur. Le gain de l'onduleur peut être défini comme le rapport entre la tension alternative de sortie et la tension continue d'entrée.

La « MLI » sinus-triangle consiste à comparer une onde modulante basse fréquence dite « tension de référence » à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La porteuse fixe la fréquence de commutation des interrupteurs.[02][35][47][48]

a) L'onde modulante

Les tensions de référence sinusoïdales de chaque étoile décalée de 30° entre elles sont données par: [49]

$$\text{Etoile 1} \begin{cases} V_{\text{refa1}} = v_m \sin(2\pi ft) \\ V_{\text{refb1}} = v_m \sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{\text{refc1}} = v_m \sin\left(2\pi ft - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \dots\dots\dots(\text{II.57})$$

$$\text{Etoile 2} \begin{cases} V_{\text{refa2}} = v_m \sin\left(2\pi ft - \frac{\pi}{6}\right) \\ V_{\text{refb2}} = v_m \sin\left(2\pi ft - \frac{5\pi}{6}\right) \\ V_{\text{refc2}} = v_m \sin\left(2\pi ft - \frac{3\pi}{2}\right) \end{cases} \dots\dots\dots(\text{II.58})$$

Il suffit juste de changer « 2πft » des équations régissant l'étoile 1 par « 2πft - α » dans le système d'équations régissant l'étoile 2 pour avoir les équations (II.58).

Avec l'angle « α = π/6 » représente le déphasage entre les deux étoiles du stator de la machine asynchrone à double étoile.

b) La porteuse

L'équation de la porteuse est donnée par : [02][50]

$$V_p(t) = \begin{cases} V_{pm} \left(\frac{4t}{T_p} - 1 \right) & \text{si } 0 \leq t \leq \frac{T_p}{2} \\ V_{pm} \left(\frac{-4t}{T_p} + 3 \right) & \text{si } \frac{T_p}{2} \leq t \leq T_p \end{cases} \dots\dots(\text{II.59})$$

Deux paramètres caractérisent cette technique de commande à savoir :

c) Critères de performance

iv) L'indice de modulation

Cet indice est défini comme étant le rapport entre la fréquence de modulation (fp) et la fréquence de la tension de référence f. $m = \frac{f_p}{f}$ (II. 60)

Pour un fonctionnement en « MLI », l'index de modulation est toujours inférieur à l'unité et par définition « m=1 » correspond à un fonctionnement en pleine onde.

v) Le coefficient de réglage en tension

Communément appelé « coefficient de réglage de tension », il est défini comme étant le rapport de l'amplitude de la tension de référence (v_m) et la valeur crête de l'onde de modulation (v_{pm}). [02][08]

$$r = \frac{v_m}{v_{pm}} \dots \dots \dots (II.61)$$

vi) Observation

Il existe quelques règles à respecter dans l'utilisation de la technique « MLI » à savoir :

- Le rapport entre la fréquence de la porteuse et la fréquence des références doit être un multiple de trois. $\frac{f_p}{f_s} = 3k ; k = 1,2,3, \dots$

Cette condition assurera d'avoir des tensions identiques à appliquer aux différentes phases.

- $\frac{f_p}{f_s} = \text{nombre entier impair}$.

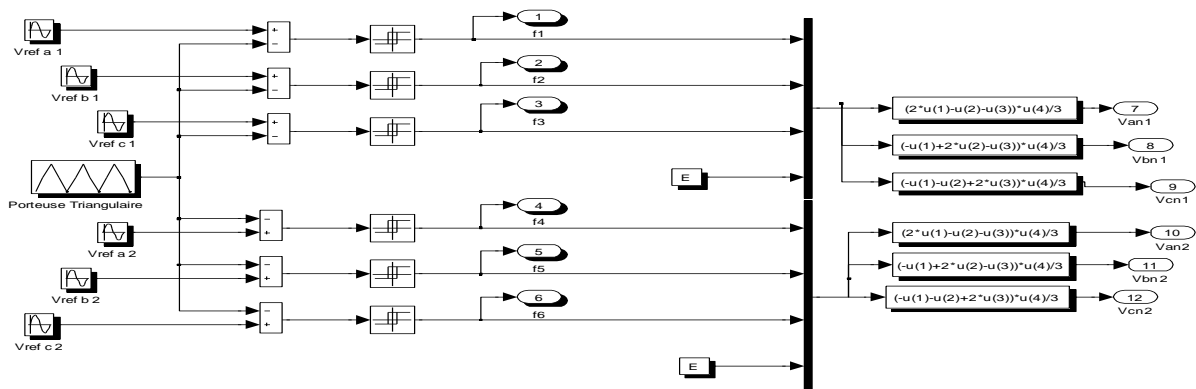
Avec cette condition, les différentes tensions présenteront une symétrie de glissement et seront totalement dépourvues d'harmonique pair.

Généralement, il est préférable d'opter pour un rapport $\frac{f_p}{f_s} = 3 + 6k$.

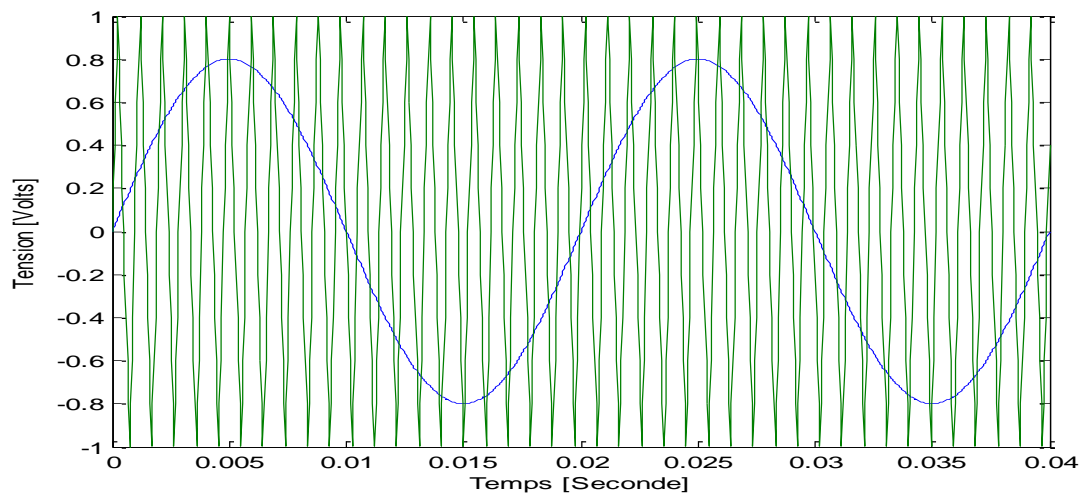
La « MLI » est dite synchrone dans le cas où le rapport $\frac{f_p}{f_s}$ est un nombre entier et elle est quasi obligatoire dans le cas où ce rapport est faible, c'est-à-dire en forte puissance et à grande vitesse.

Exemple de MLI

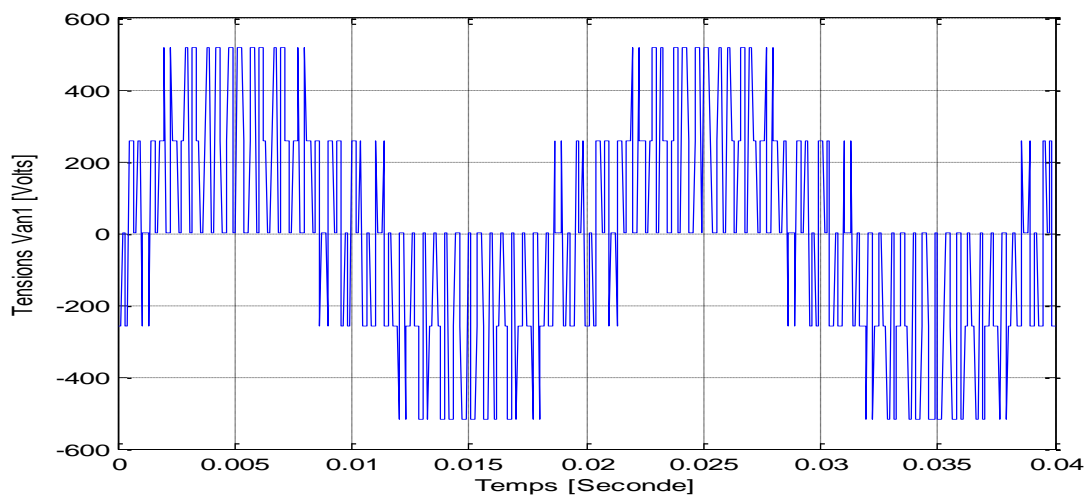
Pour un indice de modulation « m = 21 » et un coefficient de réglage de tension « r = 0.8 ».



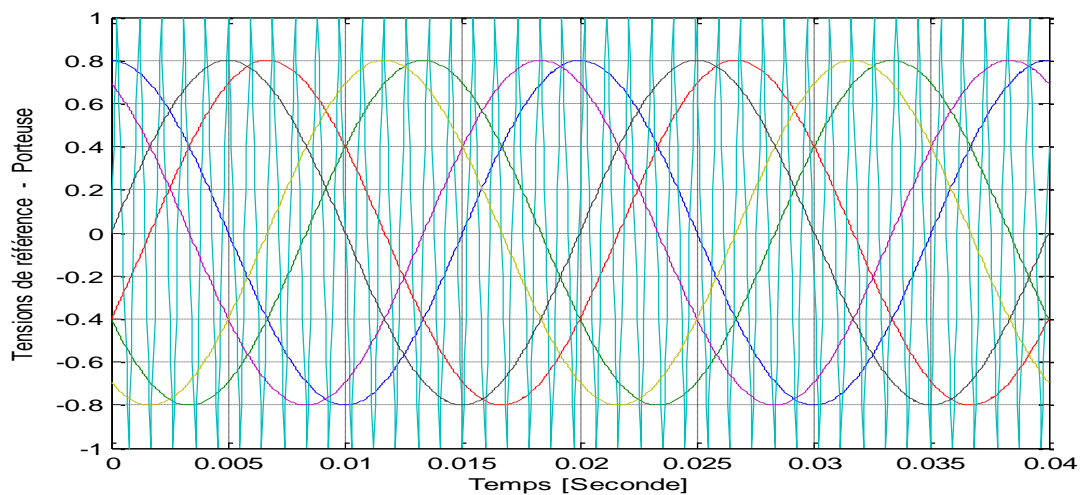
Bloc de simulation des onduleurs à commande MLI
Figure (II.18)



Les fonctions sinus-triangle
Figure (II.19)



Tension simple Van1
Figure (II.20)



Intersection tensions de référence et la porteuse
Figure (II.21)

II.4.3.3 Association « Onduleurs – MASDE »

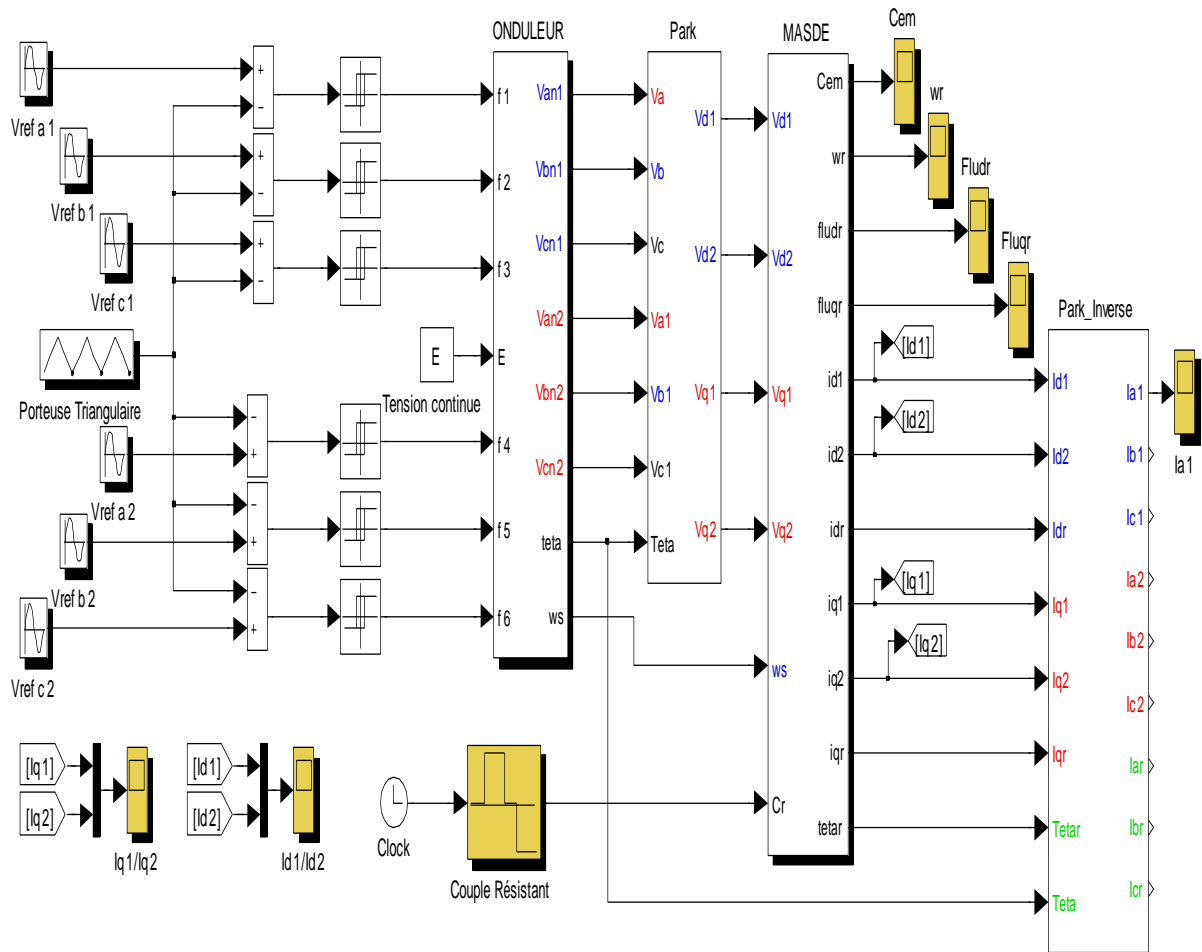


Figure (II.22)
Bloc de simulation global de la MASDE alimentée par onduleurs

Pour les besoins industriels, la machine est alimentée via des onduleurs de tensions. En effet les deux systèmes d'enroulement logés dans la partie fixe de la machine sont alimentés par deux onduleurs triphasés commandés par « modulation de largeurs d'impulsions sinus triangle ».

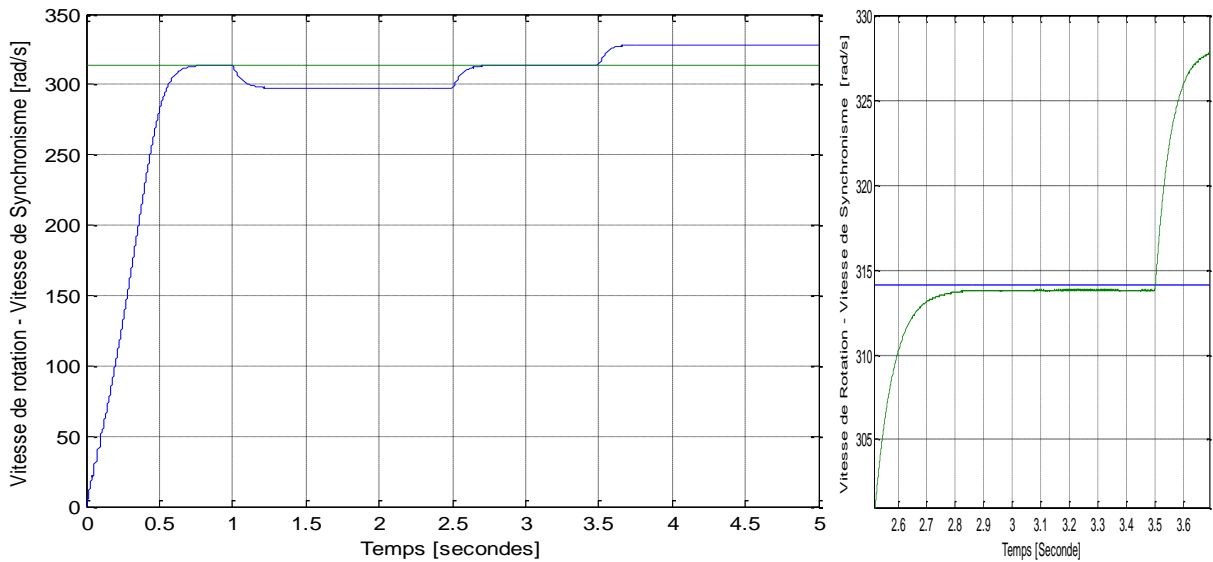
Après un démarrage à vide, la machine est testée pour un fonctionnement en mode moteur, par l'application d'un couple résistant égale à « 14 Nm », dans un laps de temps entre [1sec, 2.5sec].

Ensuite la charge est déconnectée et à $t=3.5$ secondes, la machine est vérifiée pour un fonctionnement en mode générateur par l'application d'une charge de « -14 Nm ».

a) Vitesse de rotation

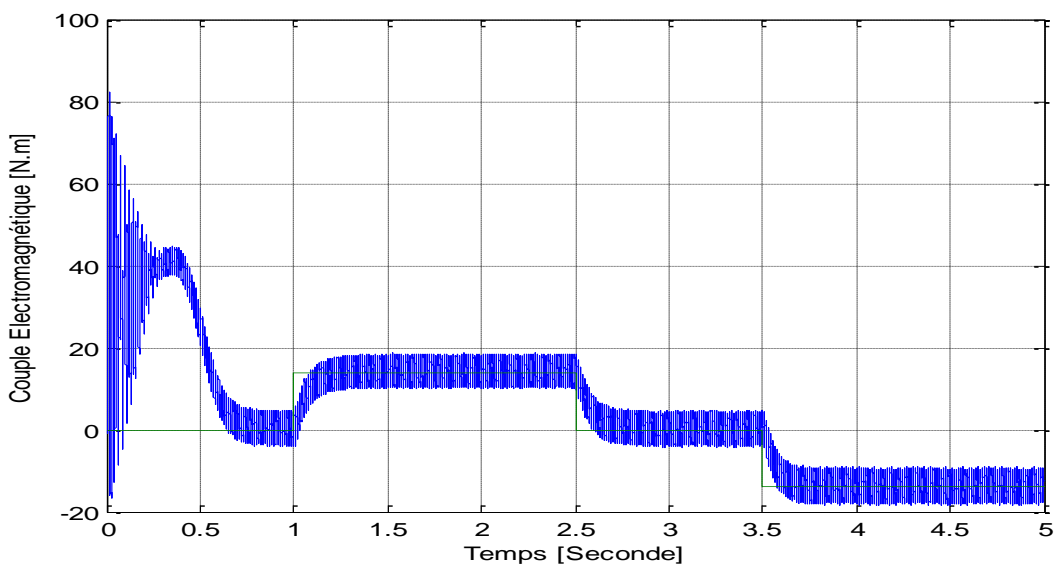
D'une manière analogue, la vitesse a la même allure que pour l'essai effectué avec la machine alimentée directement par les sources de tension.

La figure (II.23) montre qu'au démarrage, la vitesse atteint « 313.8 rd/s » avant la connexion de la charge où la vitesse de rotation glisse à « $N = 297$ rd/s », puis reprend sa valeur à vide après déconnexion de la charge et enfin à $t=3.5$ secondes la vitesse de rotation est de « 328.15 » rd/s.



Vitesse de rotation N [rad/s] - Vitesse de synchronisme N_s [rad/s]
Figure (II.23)

b) Couple électromagnétique



Couple électromagnétique [Nm] - Couple résistant [Nm]
Figure (II.24)

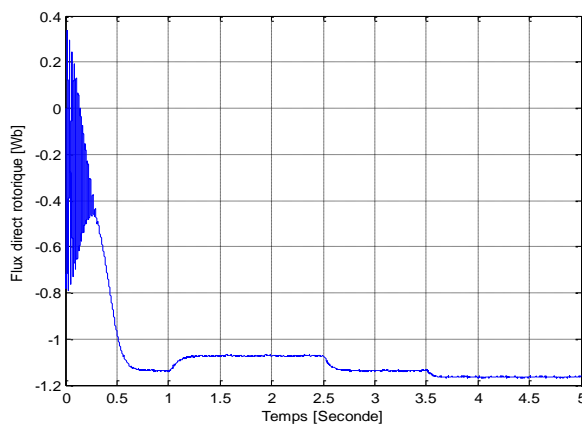
Pour une alimentation par onduleur de tension, le couple évolue exactement de la même manière que pour une alimentation par réseau équilibré pour les différents modes de fonctionnement de la machine.

Cependant, il ne peut être possible de ne pas remarquer les ondulations du couple autour de la valeur consignée par la charge.

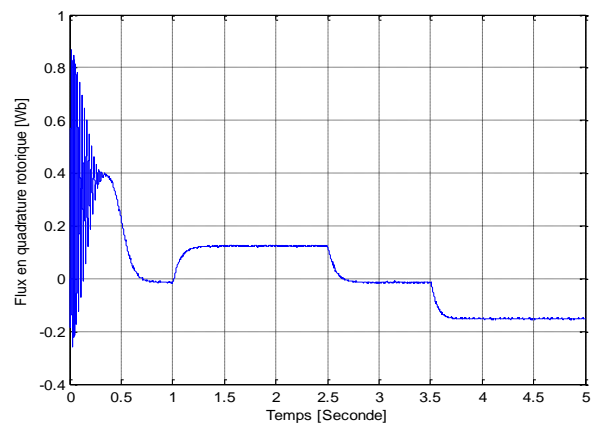
Des ondulations comprises entre « -4 Nm » et « 4 Nm » sont dues, essentiellement, à la présence d'harmoniques créés par les onduleurs de tension.

c) Flux rotorique

Selon les figures (II.25) et (II.26), l'apparence du flux rotorique direct et du flux rotorique en quadrature concorde de très près avec l'allure du couple électromagnétique.

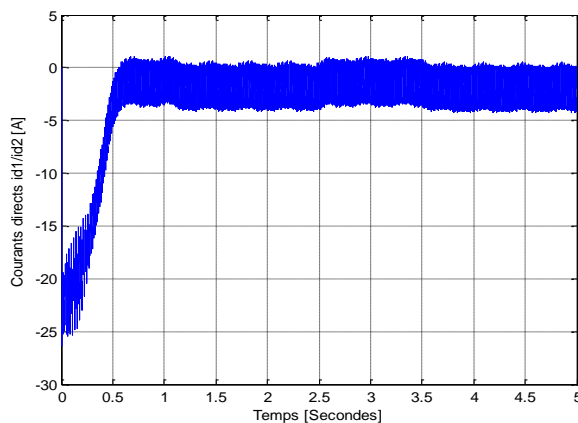


Flux direct rotorique [Wb]
Figure (II.25)

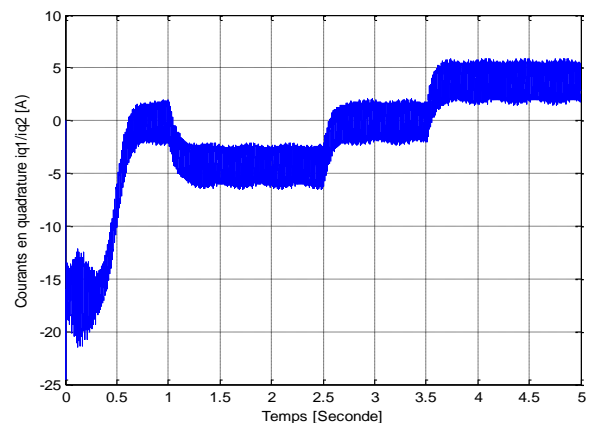


Flux en quadrature rotorique [Wb]
Figure (II.26)

f) Courants directs et en quadrature



Courants directs
Figure (II.27)

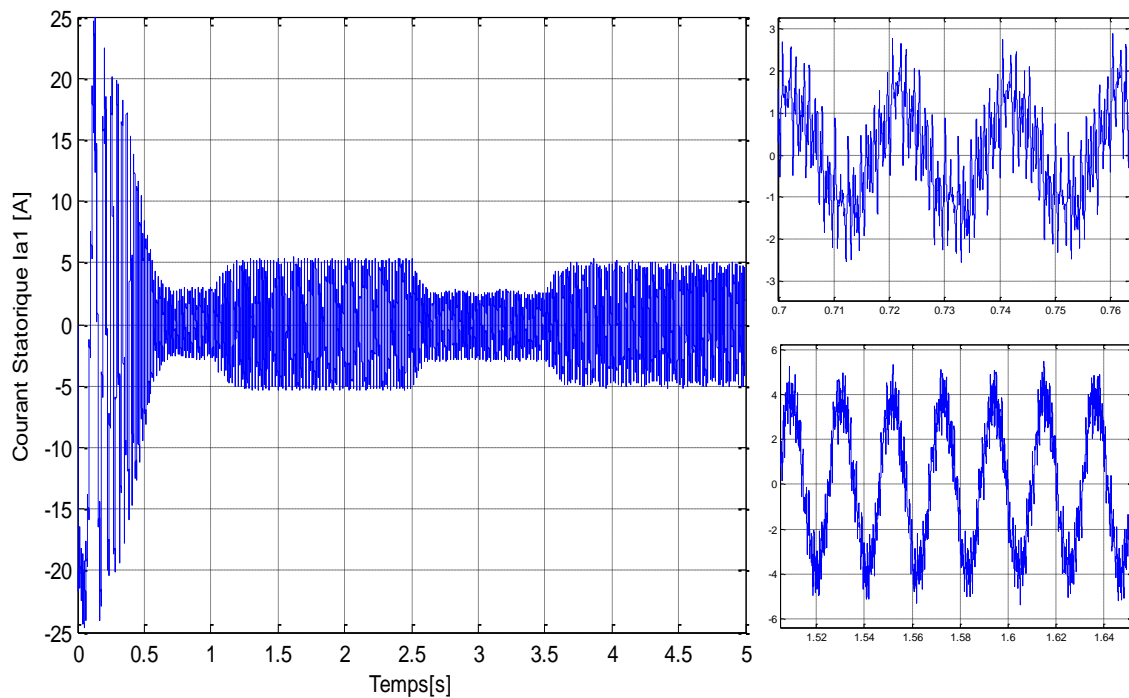


Courants en quadratures
Figure (II.28)

Les courants directs et en quadrature évoluent d'une manière similaire à celle de la vitesse de rotation. Selon le mode de fonctionnement, les valeurs des deux composantes du courant rotorique varient en suivant l'allure de la vitesse.

Les figures (II.27) et (II.28) où sont retracés les courants directs et en quadratures montrent d'une manière très claire les ondulations autour de la 'consigne'.

g) Courants statoriques



Courant statorique ia1
Figure (II.29)

Au démarrage, comme pour l'alimentation de la machine directement par le réseau électrique, les courants absorbés par les deux étoiles du stator atteignent des valeurs de quatre à cinq fois les valeurs nominales, chose qui peut endommager la machine. Le régime permanent est atteint, rapidement, après une période de « 0.4 seconde ».

Les valeurs obtenues lors de cet essai sont un peu plus grande que celles trouvées lors de l'alimentation directement par le réseau électrique. Ainsi à vide, la machine absorbe un courant de presque « 2 A » et en charge, le courant absorbé est de « 4 A ».

Ces ondulations et cette légère augmentation des valeurs des courants sont dues essentiellement à l'alimentation de la machine par des onduleurs de tensions.

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, la modélisation de la machine s'avère très importante en vue de connaître et de maîtriser son comportement lors des différentes étapes de l'étude.

La complexité des équations régissant la machine a conduit à l'élaboration d'un système de deux axes où sont éliminées les interactions entre les bobines fictives des enroulements directes et en quadratures. Pour ce faire, les transformées de Park directe et inverse offrent un très bon outil pour surmonter la difficulté rencontrée.

Par l'alimentation de la machine, directement, par le réseau électrique, le relevé des différentes grandeurs caractérisant la machine nous renseigne, à plus d'un titre, sur le comportement de la machine lors des différents fonctionnements, soit à vide, soit en mode moteur ou bien en mode générateur.

L'obligation industrielle à utiliser des onduleurs de tension au lieu du réseau montre les avantages et les inconvénients engendrés avec ce genre d'alimentation. Le choix s'est fait porter pour la commande de ces onduleurs sur la technique de modulation de largeurs d'impulsions sinus – triangle. Les ondulations observées sur le couple, la vitesse, les flux rotoriques et les courants de la machine fictive sont dues, essentiellement, à la présence d'harmoniques engendrés par les onduleurs.

CHAPITRE III

ETUDE DE LA MACHINE ASYNCHRONE DOUBLE ETOILE EN MODE DÉGRADÉ

CHAPITRE III

ETUDE DE LA MACHINE ASYNCHRONE DOUBLE ETOILE EN MODE DÉGRADÉ

- 1 Introduction
- 2 Description du mode « dégradé »
- 3 Causes de fonctionnement en mode « dégradé »
 - 3.1 Dégradation au niveau du réseau
 - 3.2 Dégradation au niveau du moteur
 - 3.3 Dégradation au niveau des connectiques
 - 3.4 Dégradation au niveau de l'alimentation de la machine
- 4 Etude des éventuels défauts
 - 4.1 Défaut d'ouverture d'un transistor de puissance
 - 4.1.1 Annulation de la commande du transistor sain
 - 4.1.2 Utilisation d'un fusible de protection
 - 4.2 Défaut de fermeture d'un transistor de puissance ou fusion d'un fusible
- 5 Stratégies d'isolation du défaut
- 6 Conséquences d'un défaut
- 7 Stratégie de commande en mode dégradé
 - 7.1 Action sur le courant d'une seule phase encore saine par chaque phase ouverte
 - 7.1.1 Définition
 - 7.1.2 Présentation de la méthode
 - 7.1.3 Cas particulier
 - 7.2 Action sur chacun des courants dans les phases encore saines
 - 7.2.1 Définition
 - 7.2.2 Présentation de la méthode
 - 7.3 Comparaison des deux méthodes
- 8 Fonctionnement de la MASDE en mode dégradé
 - 8.1 Modèle de la MASDE dans le repère « α - β »
 - 8.2 Equations électriques de la MASDE
 - 8.3 Matrice de transformation
 - 8.4 Cas d'un défaut de la première phase « Sa1 »
 - 8.5 Equation dans le repère « α - β »
 - 8.5.1 Equations des tensions
 - 8.5.2 Equations des flux

8.6 Equation dans l'espace « Z »:

8.7 Equation mécanique

9 Réduction des oscillations du couple

9.1 Application de la première méthode

9.2 Application de la deuxième méthode

10 Simulation numérique de la MASDE en mode dégradé et interprétation des résultats

10.1 Simulation de la MASDE dans le repère $[\alpha-\beta]$

10.2 Simulation lors d'un défaut d'une phase

10.2.1 Défaillance de la phase « Sa1 »

10.2.2 Récapitulatif des divers cas de défaillance d'une phase

10.3 Simulation d'un défaut de deux phases

10.3.1 Défaut de deux phases de la même étoile

10.3.2 Défaut de deux phases de différentes étoiles

10.3.2.1 Défaillances des phases « Sa1 » et « Sb2 »

10.3.2.2 Défaillances des phases « Sa1 » et « Sc2 »

10.3.2.3 Récapitulatif des diverses défaillances de deux phases

10.4 Simulation d'un défaut de trois phases

10.4.1 Perte d'une étoile

10.4.1.1 Tensions d'alimentation

10.4.1.2 Vitesse de rotation

10.4.1.3 Couple électromagnétique

10.4.1.4 Courants statoriques

10.4.2 Défaut de trois phases de différentes étoiles

10.4.2.1 Tensions d'alimentation

10.4.2.2 Vitesse de rotation

10.4.2.3 Couple électromagnétique

10.4.2.4 Courants statoriques

10.4.3 Récapitulatif des diverses défaillances de trois phases

10.5 Récapitulative sur les diverses simulations

10.5.1 Couple électromagnétique :

10.5.2 Vitesse de rotation:

10.5.3 Courants statoriques:

11 Conclusion

CHAPITRE III

ETUDE DE LA MACHINE ASYNCHRONE DOUBLE ETOILE EN MODE DÉGRADÉ

III.1 Introduction

Un intérêt particulier est porté sur l'emploi de la machine asynchrone double étoile pour sa flexibilité et sa souplesse, elle est de plus en plus utilisée dans la mécanisation navale, dans les applications militaires ou tout autre système embarqué et surtout dans l'industrie chimique ou nucléaire... [51]

L'histoire du diagnostic de défaut et de la protection remonte à l'origine des machines elles-mêmes. Les fabricants et les utilisateurs des machines électriques ont initialement mis en œuvre une protection simple telle que la protection contre la surintensité, contre la surtension et la protection contre les défauts à la terre pour assurer un fonctionnement sûr et fiable.

Toutefois, le système d'entraînement n'est pas à l'abri d'une défaillance dans certaines applications où il est maintenant devenu très important de diagnostiquer les défauts dès leurs naissances, parce qu'une panne dans l'un des corps constitutifs de la machine peut arrêter tout le processus de production, ce qui cause soit des pertes financières évidentes, soit des dangers imminents. [52]

C'est pour cette raison qu'il est important de fortement s'intéresser au fonctionnement de la machine en présence d'une anomalie afin de pouvoir surpasser le défaut et assurer la continuité de service et un fonctionnement le plus satisfaisant possible.

III.2 Description du mode « dégradé »

Lorsque pour une raison quelconque, le fonctionnement est altéré au niveau de l'actionneur ou de son alimentation par l'ouverture de l'une des phases, la marche du système n'est plus satisfaisante. [53]

Ce mode de marche est connu sous le nom du « mode dégradé » qui n'est autre qu'un fonctionnement exceptionnel où un ou plusieurs éléments du système d'entraînement soient en dysfonctionnement. [54]

Si aucune mesure n'est prise, l'entraînement risque de ne plus être assuré et des oscillations du couple apparaissent. Si ces dernières sont, le plus souvent simplement, gênantes, elles sont parfois nocives pour des systèmes embarqués et sensibles.

Les études ont révélé qu'en cas d'ouverture d'une phase statorique, plus la machine dispose de phases, moins la perturbation sur le couple est importante et que les ondulations engendrées s'accroissent avec le nombre de phases défectueuses. [54]

Quand le nombre de phases est important, de quinze à dix-huit phases par exemple, aucun traitement particulier n'est effectué, excepté celui d'assurer un taux d'ondulation du couple acceptable et des courants limités dans les phases saines.

Par contre, pour les machines disposant de cinq à neuf phases d'alimentation environ, le traitement d'une ouverture de phase suit deux stratégies principales, soit par action sur une seule phase encore saine pour chaque phase ouverte, soit par action sur chacun des courants dans les phases encore saines. [55]

III.3 Causes de fonctionnement en mode « dégradé »

Les causes d'un dysfonctionnement d'une chaîne d'énergie sont multiples et peuvent être rassemblées en quelques groupes selon la partie atteinte par la dégradation. [54]

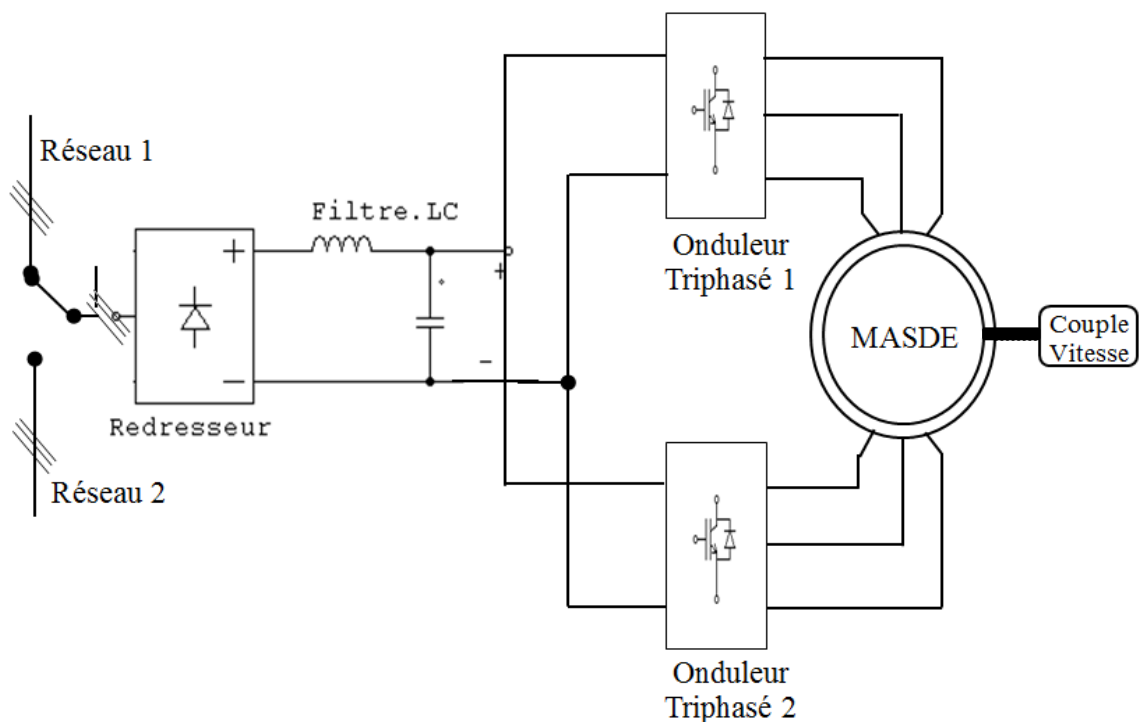


Figure (III.1)
Représentation schématique d'une chaîne d'énergie

III.3.1 Dégradation au niveau du réseau

Lorsque la tension du bus continu utilisé pour l'alimentation de l'onduleur est obtenue à partir d'un redressement des tensions d'un réseau alternatif, il est possible d'alimenter cet actionneur par un réseau auxiliaire en cas de coupure du réseau principal. [56]

III.3.2 Dégradation au niveau du moteur

Le moteur peut avoir des anomalies telles que la destruction d'un enroulement d'une phase statorique, un décollement d'un aimant rotorique, un court-circuit inter spires qui peut s'aggraver et évoluer vers un court-circuit phase-phase ou phase-terre, ou encore une barre cassée, une rupture de l'anneau, un court-circuit dans les enroulements rotoriques, un problème de roulement à billes, une excentration rotorique ...etc. [57][58]

III.3.3 Dégradation au niveau des connectiques

La connectique regroupe toutes les techniques liées aux connections physiques des liaisons électriques.

Le connecteur industriel ou d'électrotechnique est un type de connecteur pouvant tolérer de fortes contraintes. Ces connecteurs sont utilisés dans le monde industriel dans de nombreuses installations comme les chaînes de production, les robots, les transports ou dans l'énergie. Ces connecteurs ont la particularité d'être extrêmement robustes et tolérer de fortes tensions.

Les défauts liés à la connectique peuvent être un contact desserré, une fusion d'un fusible de protection, ... etc. [59]

III.3.4 Dégradation au niveau de l'alimentation de la machine

Cette dégradation correspond aux défauts qui peuvent survenir sur la liaison et sur les onduleurs qui alimentent les six enroulements des deux stators de la machine induisant l'ouverture d'une phase d'alimentation statorique et conduisant à l'annulation du courant.

Les transistors de puissance composant l'onduleur de tension peuvent présenter des défauts de fonctionnement. Ces anomalies peuvent résulter d'une usure normale, d'une mauvaise conception, d'un mauvais montage ou désalignement, d'une mauvaise utilisation, ou d'une combinaison de ces différentes causes. [54]

III.4 Etude des éventuels défauts

Les différentes études statistiques sur la dégradation d'une chaîne d'alimentation montrent que les défauts aux niveaux des onduleurs de tension qui alimentent les moteurs asynchrones et leurs commandes sont les plus fréquents. Il est donc justifié de limiter l'étude aux pannes qui peuvent survenir sur les transistors de puissance, sur la connectique et sur les fusibles de protection. [41][53][54][59][60]

III.4.1 Défaut d'ouverture d'un transistor de puissance

Si un des transistors constituant le bras de l'onduleur se retrouve en défaut d'ouverture alors que la commande du transistor complémentaire est active, le court-circuit de l'alimentation continue est inévitable.

Pour éviter ce genre de désagrément, il est impératif d'agir soit par : [53][54]

III.4.1.1 Annulation de la commande du transistor sain

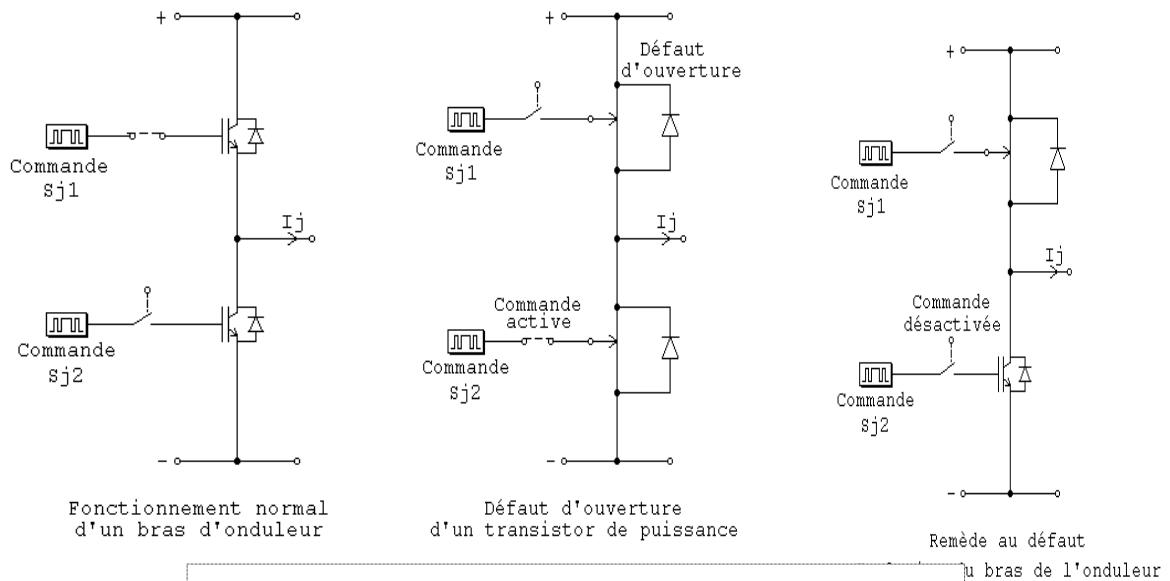


Figure (III.2)
Défaut d'ouverture d'un transistor de puissance

III.4.1.2 Utilisation d'un fusible de protection

Il s'agit de provoquer la fusion ultra rapide d'un fusible placé en série avec les transistors de puissance d'une manière à protéger le bras en défaut en ouvrant ainsi le circuit électrique.[43][48][53][54]

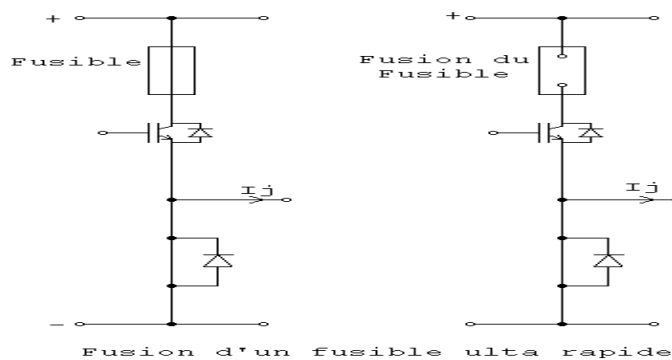


Figure (III.3)
Fusion d'un fusible ultra rapide

III.4.2 Défaut de fermeture d'un transistor de puissance ou fusion d'un fusible

De même pour ce cas de figure, la tension aux bornes de la phase connectée au bras défaillant devient incontrôlable. Suivant le transistor en défaut et la position du fusible,

l'extrémité de la phase connectée au bras en défaut est reliée à un potentiel de l'alimentation soit directement, soit par l'intermédiaire d'une diode. [43][48][53][54]

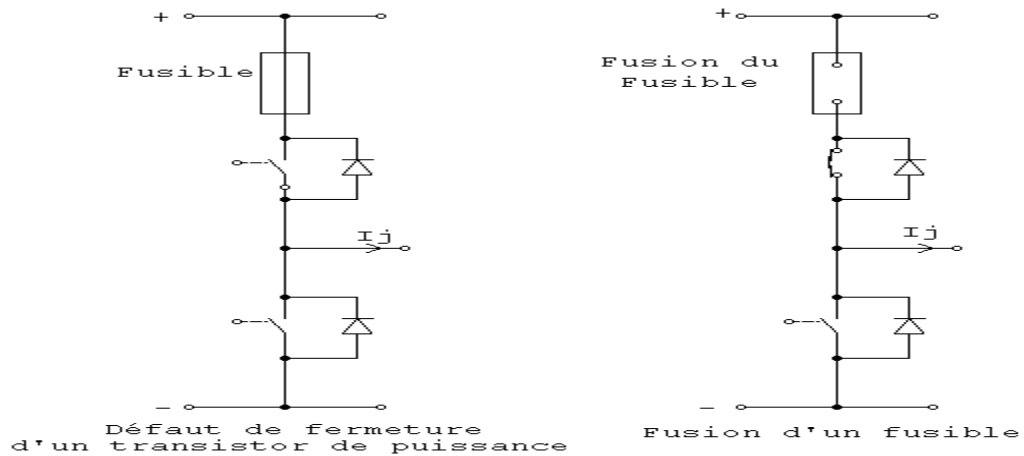


Figure (III.4)
Défaut de fermeture d'un interrupteur de puissance ou fusion d'un fusible

III.5 Stratégies d'isolation du défaut

La redondance parallèle au niveau de l'alimentation de l'actionneur permet une marche dégradée même si une phase d'alimentation est ouverte.

Des dispositions sont prises pour isoler la phase ou les phases en défaut afin d'éviter de répercuter les problèmes sur d'autres organes de la chaîne d'énergie. Un interrupteur statique fixe la tension de la phase ouverte à la moitié de la tension du bus continu. [61]

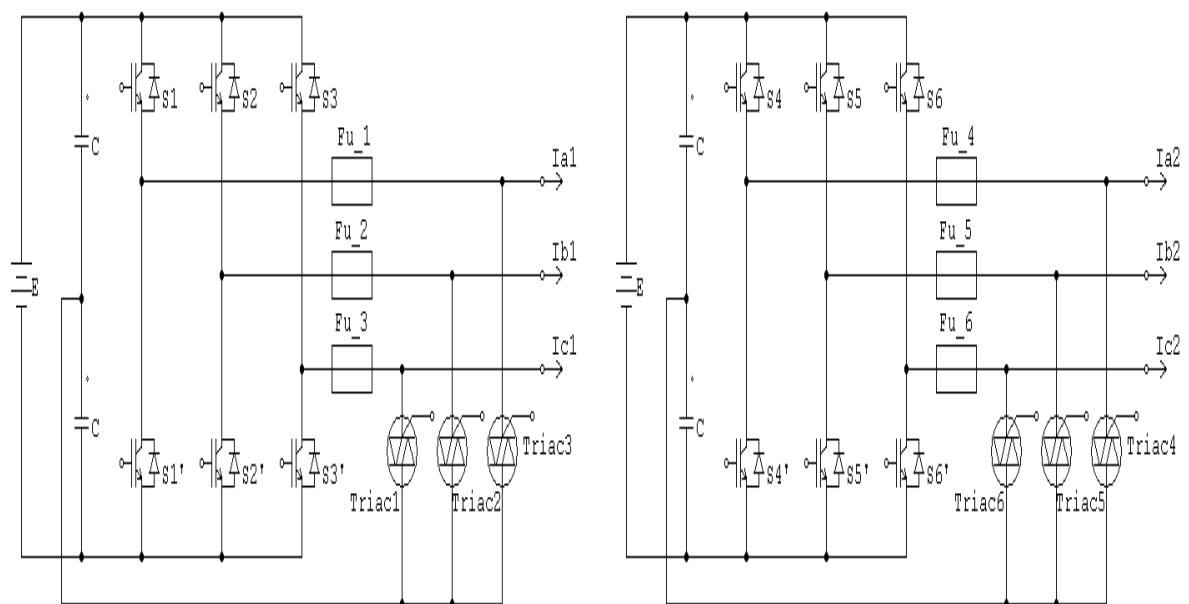


Figure (III.5)
Déconnexion des phases en défaut par utilisation de triac

Lors du défaut d'un des bras des deux onduleurs, le triac devient conducteur et le fusible placé en série est alors connecté entre une différence de potentiel engendrant sa fusion et de même la déconnexion de la phase en question. [54]

Pour assurer l'isolation des phases présentant des anomalies, l'utilisation autant de triacs que de phases est nécessaire et obligatoire, ce qui rend le circuit de commande encombrant.[43][54]

III.6 Conséquences d'un défaut

En présence d'un défaut, la tension aux bornes d'une phase devient incontrôlable et le couple sera directement infecté par des ondulations perturbatrices engendrant de gênantes vibrations de la machine et des effets sonores nuisant. Les courants dans les enroulements restants sains de la machine peuvent atteindre des valeurs destructrices. [43][48][54]

III.7 Stratégie de commande en mode dégradé

Les techniques de commande se basent sur la modification du courant dans une ou plusieurs phases de façon à conserver un couple constant lors d'un fonctionnement en mode dégradé.

III.7.1 Action sur le courant d'une seule phase encore saine par chaque phase ouverte

III.7.1.1 Définition

Lors d'une déconnexion d'une phase en défaut, le choix se porte sur une phase saine située à 90° électrique de celle-ci où le courant est modifié d'une manière à assurer un couple constant, maximal et à pertes joules limitées. [62]

Une méthode valable pour les machines à forces électromotrices « fems » quelconques, par contre, les machines à fems triphasées sinusoïdales, les contraintes du courant en sont concentrées sur peu de phases saines d'où la limitation à la moitié du nombre de phases.

III.7.1.2 Présentation de la méthode

Soient les expressions de la fem induite et du courant dans la phase « k » :[43][48][54]

$$e_k = f_k(\theta) \cdot \Omega \quad \text{avec} \quad f_k(\theta) = f\left(\theta - \frac{2\pi(k-1)}{n}\right)$$

Et $i_k = S_k(\theta) \cdot I_{max}$ avec $S_k(\theta) = S\left(\theta - \frac{2\pi(k-1)}{n}\right)$ avec $f(\theta)$ et $S(\theta)$ représentant les fonctions de forme respectivement des fems et des courants.

L'obtention d'un couple constant et maximum à pertes joules limitées est soumis à la condition de prendre $i_k = I_{max} \cdot \frac{f_k(\theta)}{\sum_{k=1}^n f_k(\theta) S_k(\theta)}$

Avec n représentant le nombre de phases de la machine, le couple devient.

$$C_n = \frac{\vec{e}\vec{i}}{\Omega} = \frac{1}{\Omega} \cdot \sum_{k=1}^n e_k i_k = I_{max} \cdot \sum_{k=1}^n f_k(\theta) S_k(\theta) \quad \dots \dots \dots (III. 1)$$

Dans le cas où la phase « j » est déconnectée, le couple devient

$$C_{n-1}(\theta) = C_n - I_{max} f \left(\theta - \frac{2\pi(j-1)}{n} \right) \cdot S \left(\theta - \frac{2\pi(j-1)}{n} \right) \quad \dots (III. 2)$$

A noter que le couple $C_{n-1}(\theta)$ présente des ondulations qui peuvent être atténuées par modification du courant d'une phase « m » décalée d'un angle $2\pi(m-j)/n$ par rapport à la phase déconnectée « j ».

Donc le courant dans la phase « m » aura une nouvelle fonction de forme $\hat{S}_m(\theta)$ et le couple deviendra :

$$C_{n-1}(\theta)_f = C_{n-1}(\theta) + I_{max} \cdot f_m(\theta) \cdot (\hat{S}_m(\theta) - S_m(\theta)) \quad \dots (III. 3)$$

Avec
$$\hat{S}_m(\theta) = S_m(\theta) + \frac{C_{n-1}(\theta)_f - C_{n-1}(\theta)}{I_{max} f_m(\theta)} \quad \dots \dots \dots (III. 4)$$

Lorsque la fem de la phase « m » est nulle, $f_m(\theta_1) = 0$ c'est-à-dire $\theta_1 = 2\pi(m-1)/n$, il faut que le numérateur « $C_{(n-1)}(\theta)_f - C_{(n-1)}(\theta)$ » le soit aussi pour pouvoir définir l'expression $\hat{S}_m(\theta)$ quelle que soit la valeur de l'angle « θ ».

$$C_{n-1}(\theta_1)_f = C_n - I_{max} \cdot f_j(\theta_1) \cdot S_j(\theta_1)$$

$$C_{n-1}(\theta_1)_f = C_n - I_{max} \cdot f \left(\frac{2\pi(m-j)}{n} \right) \cdot S \left(\frac{2\pi(m-j)}{n} \right) \quad \dots (III. 5)$$

III.7.1.3 Cas particulier

Un cas particulier celui des fems sinusoïdales et des courants sinusoïdaux supposés en

phase tel que
$$\begin{cases} e_k = E_{max} \cdot \sin(\omega t - 2\pi \left(\frac{k-1}{n} \right)) \\ i_k = I_{max} \cdot \sin(\omega t - 2\pi \left(\frac{k-1}{n} \right)) \end{cases} .$$

Le couple en mode de fonctionnement sans dégradation est donné par

$$C_n = \frac{\vec{e}\vec{i}}{\Omega} = \frac{1}{\Omega} \cdot \sum_{k=1}^n e_k i_k = \frac{n E_{max} I_{max}}{2 \Omega} \quad \text{valeur constante}$$

La déconnexion de la phase « j » entraîne une réduction de la valeur moyenne du couple et une ondulation de pulsation « 2ω ».

$$C_{n-1} = C_n - C_n \left[\frac{1 - \cos 2(\omega t - 2\pi(j-1)/n)}{n} \right] \quad \text{ou bien encore}$$

$$C_{n-1} = \frac{C_n}{n} \left[(n-1) + \cos \left(2\omega t - 2(j-1) \frac{2\pi}{n} \right) \right] \quad \dots \dots \dots (III. 6)$$

De (III.4) et après calculs, la phase « m » doit être alimentée par un courant de valeur $i_{mf} = 2I_{max} \cos((m-j)2\pi/n) \sin(\omega t - (j-1)2\pi/n)$

pour obtenir la condition d'annulation des pulsations du couple qui prendra la forme finale de

$$C_{(n-1)f} = \frac{C_n}{n} [(n-2) + 2\cos^2(2\pi(m-j)/n)] \quad \dots (III.7)$$

De (III.7), « $C_{(n-1)f}$ » prend une valeur maximale dans le cas où le décalage angulaire entre la phase déconnectée et la phase dont le courant est modifié est proche de 90° électrique.

A rappeler que cette méthode est valable tant que le nombre de phases déconnectées est inférieur à la moitié du nombre de phases de la machine. [43][48][54]

III.7.2 Action sur chacun des courants dans les phases encore saines

III.7.2.1 Définition:

Dans le cas des machines à fems sinusoïdales, une correction des courants restants par une évaluation analytique permet de restituer un couple constant tout en minimisant les pertes joules. [63]

L'avantage réside sur le fait que la dégradation est répartie sur le reste des phases saines de la machine. Cette méthode est valable tant qu'il reste un nombre suffisant de phases pour produire un champ tournant.

III.7.2.2 Présentation de la méthode

Dans le cas d'une machine à « n phases », la création d'un champ tournant statorique obéit aux deux relations suivantes : [43][48][63]

$$\begin{cases} i_1 \cdot \cos 0 + i_2 \cdot \cos \frac{2\pi}{n} + i_3 \cdot \cos \frac{4\pi}{n} + i_4 \cdot \cos \frac{6\pi}{n} + \dots + i_n \cdot \cos \frac{2(n-1)\pi}{n} = \frac{n}{2} i \cos \theta \\ i_1 \cdot \sin 0 + i_2 \cdot \sin \frac{2\pi}{n} + i_3 \cdot \sin \frac{4\pi}{n} + i_4 \cdot \sin \frac{6\pi}{n} + \dots + i_n \cdot \sin \frac{2(n-1)\pi}{n} = \frac{n}{2} i \sin \theta \end{cases} \quad \dots (III.8)$$

Dans le cas où la première phase est déconnectée, pour pouvoir assurer un couple constant, il faudra que les deux relations précédentes soient respectées.

$$\text{Soient } \begin{cases} i_2 \cdot \cos \frac{2\pi}{n} + i_3 \cdot \cos \frac{4\pi}{n} + i_4 \cdot \cos \frac{6\pi}{n} + \dots + i_n \cdot \cos \frac{2(n-1)\pi}{n} = \frac{n}{2} i \cos \theta \\ i_2 \cdot \sin \frac{2\pi}{n} + i_3 \cdot \sin \frac{4\pi}{n} + i_4 \cdot \sin \frac{6\pi}{n} + \dots + i_n \cdot \sin \frac{2(n-1)\pi}{n} = \frac{n}{2} i \sin \theta \end{cases} \quad \dots (III.9)$$

Après introduction de la notion du phaseur complexe et séparation des termes en « cosinus » et les termes en « sinus », le courant devient : [54]

$$i_k = x_k \cdot \cos \theta + y_k \cdot \sin \theta \quad \text{avec } k = 2, 3, \dots, n \quad \dots (III.10)$$

Le système devient :

$$\begin{cases} x_2 \cos \frac{2\pi}{n} + x_3 \cos \frac{4\pi}{n} + x_4 \cos \frac{6\pi}{n} + \dots + x_n \cos \frac{2(n-1)\pi}{n} = \frac{n}{2} \\ y_2 \cos \frac{2\pi}{n} + y_3 \cos \frac{4\pi}{n} + y_4 \cos \frac{6\pi}{n} + \dots + y_n \cos \frac{2(n-1)\pi}{n} = 0 \end{cases} \quad \dots (III.11a)$$

$$\begin{cases} x_2 \sin \frac{2\pi}{n} + x_3 \sin \frac{4\pi}{n} + x_4 \sin \frac{6\pi}{n} + \dots + x_n \sin \frac{2(n-1)\pi}{n} = \frac{n}{2} \\ y_2 \sin \frac{2\pi}{n} + y_3 \sin \frac{4\pi}{n} + y_4 \sin \frac{6\pi}{n} + \dots + y_n \sin \frac{2(n-1)\pi}{n} = 0 \end{cases} \quad \dots (III.11b)$$

Et l'objectif sera de déterminer les courants « i_k » tel que leurs modules " $\sqrt{x_k^2 + y_k^2}$ " soient minimum et dans le cas où la machine est supposée couplée en étoiles :

$$\begin{cases} x_2 + x_3 + x_4 + \dots + x_n = 0 \\ y_2 + y_3 + y_4 + \dots + y_n = 0 \end{cases}$$

Les pertes joules peuvent être minimisées dans le cas où les amplitudes de tous les courants sont égales : $x_2^2 + y_2^2 = x_3^2 + y_3^2 = \dots = x_{n-1}^2 + y_{n-1}^2 = x_n^2 + y_n^2$.

Le système initial devient un système de « $n+4$ » équations avec « $2(n-1)$ » variables inconnues. Cette méthode s'applique aux machines ayant un nombre de phases supérieur à trois.

III.7.3 Comparaison des deux méthodes

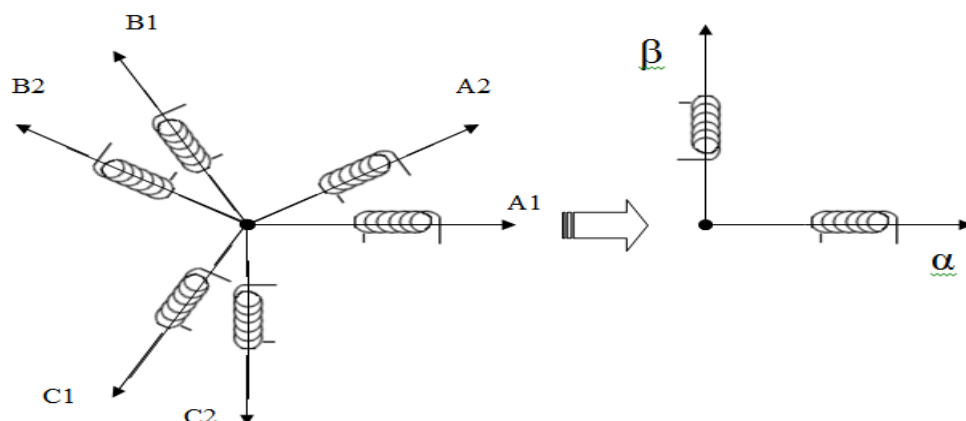
Même si les deux méthodes permettent de conserver un couple constant lors de la déconnexion d'une ou plusieurs phases d'une machine ayant plus de trois phases, quelques inconvénients peuvent être cités : [54]

En effet les deux méthodes nécessitent un changement de la consigne de courant dans une ou plusieurs phases suivant la phase en défaut. Il faut donc disposer d'un système capable de détecter les phases en défaut pour pouvoir appliquer les nouvelles consignes du courant. Une table résumant les consignes du courant en fonction des phases déconnectées s'avère nécessaire. [64][65]

A retenir que pour la première méthode, appliquée aux machines possédant des fems quelconques, la contrainte liée à la perte d'une phase ne se reporte que sur une seule phase encore connectée, par contre pour la seconde méthode, l'effet de la perte d'une phase est réparti sur l'ensemble des phases saines. [54]

III.8 Fonctionnement de la MASDE en mode dégradé

III.8.1 Modèle de la MASDE dans le repère « α - β »



Transformation de la base « $a_1 a_2 b_1 b_2 c_1 c_2$ » à la base « $\alpha\beta$ »
Figure (III.6)

Afin de faciliter l'étude du comportement de la machine, l'utilisation du repère $[\alpha\beta]$ s'avère nécessaire pour pouvoir suivre l'évolution de la machine en mode dégradé.

En principe, si seulement deux phases de la MASDE sont en fonctionnement, le moteur peut fournir un couple au niveau de son arbre sous les méthodes de contrôles résistants. [59][66]

III.8.2 Equations électriques de la MASDE

Suivant les hypothèses simplificatrices utilisées au chapitre 2 pour faciliter l'étude de la machine et selon la représentation des enroulements des deux étoiles du stator et du rotor, les équations électriques de la machine s'écrivent comme suit : [36][37][67]

$$\begin{bmatrix} [V_s] \\ [0] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [R_s] & 0 \\ 0 & [R_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [L_{sr}] \\ [L_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} \quad \dots (III. 12)$$

III.8.3 Matrice de transformation

Le modèle où le stator est considéré comme étant deux étoiles distinctes ne convient pas à l'étude du comportement de la machine en mode dégradé.

Pour pouvoir suivre l'évolution du système dans le cas de déconnexion d'une ou de plusieurs phases, le stator doit être considéré comme un enroulement hexaphasé avec un décalage entre deux enroulements adjacents égale à $\pi/6$. Le but maintenant sera de diagonaliser la matrice des inductances par utilisation de matrices adéquates. [43]

L'enroulement statorique de la machine crée une force magnétomotrice « FMM » tel que
$$FMM = \frac{N_s}{2} \left[i_{a1} \cos \alpha + i_{a2} \cos(\alpha - \varphi) + i_{b1} \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) + i_{b2} \cos(\alpha - \varphi - \frac{2\pi}{3}) + i_{c1} \cos(\alpha - \frac{4\pi}{3}) + i_{c2} \cos(\alpha - \varphi - \frac{4\pi}{3}) \right]$$

Avec α : position d'un point dans l'entrefer, φ : décalage entre deux étoiles.

Après quelques arrangements :

$$FMM(\theta) = \frac{N_s}{2} \left(\cos \theta \left[\cos 0 \cdot i_{a1} + \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) \cdot i_{a2} + \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) i_{b1} + \cos\left(\frac{5\pi}{6}\right) i_{b2} + \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) i_{c1} + \cos\left(\frac{3\pi}{2}\right) i_{c2} \right] + \sin \theta \left[\sin 0 \cdot i_{a1} + \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) \cdot i_{a2} + \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) i_{b1} + \sin\left(\frac{5\pi}{6}\right) i_{b2} + \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) i_{c1} + \sin\left(\frac{3\pi}{2}\right) i_{c2} \right] \right)$$

$$D'où \quad FMM = \frac{N_s}{2} [\cos \theta i_{s\alpha} + \sin \theta i_{s\beta}] \quad \dots \dots \dots (III. 13)$$

La FMM produite par les six phases statoriques est équivalente à la FMM produite par deux enroulements en quadrature « $\alpha\beta$ » parcourus par les courants « $i_{s\alpha}$ » et « $i_{s\beta}$ » tel que :

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} = [Tc] [i_{a1} \ i_{a2} \ i_{b1} \ i_{b2} \ i_{c1} \ i_{c2}]' \quad avec \quad [Tc] = \begin{bmatrix} [\alpha_0] / \|\alpha_0\| \\ [\beta_0] / \|\beta_0\| \end{bmatrix} \quad \dots \dots (III. 14)$$

$$\text{Avec } [\alpha_0] = \left[\cos 0 \quad \cos \frac{\pi}{6} \quad \cos \frac{2\pi}{3} \quad \cos \frac{5\pi}{6} \quad \cos \frac{4\pi}{3} \quad \cos \frac{3\pi}{2} \right] \quad \dots (III.15a)$$

$$[\beta_0] = \left[\sin 0 \quad \sin \frac{\pi}{6} \quad \sin \frac{2\pi}{3} \quad \sin \frac{5\pi}{6} \quad \sin \frac{4\pi}{3} \quad \sin \frac{3\pi}{2} \right] \quad \dots (III.15b)$$

Du point de vue mathématique, un système de six dimensions ne peut être réduit à un système de deux dimensions. C'est pour cette raison, que, quatre vecteurs nommés [Z1], [Z2], [Z3] et [Z4] orthogonaux entre eux et orthogonaux aux vecteurs, suivant l'axe « α » et l'axe « β », sont nécessaires pour compléter ainsi la transformation. La matrice [Tz] est obtenue dans MATLAB par la fonction « null ». [43][48]

$$[Tz] = \text{null}[Tc].^t = \begin{bmatrix} [Z1]/\|Z1\| \\ [Z2]/\|Z2\| \\ [Z3]/\|Z3\| \\ [Z4]/\|Z4\| \end{bmatrix} \quad \dots (III.16)$$

La matrice de transformation globale peut enfin s'écrire en tenant compte des relations

(III.14) et (III.16) comme suit :

$$[Tn] = \begin{bmatrix} [Tc] \\ [Tz] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\alpha_0]/\|\alpha_0\| \\ [\beta_0]/\|\beta_0\| \\ [Z1]/\|Z1\| \\ [Z2]/\|Z2\| \\ [Z3]/\|Z3\| \\ [Z4]/\|Z4\| \end{bmatrix} \quad (III.17)$$

$$\text{Donc } \begin{bmatrix} isa \\ is\beta \\ iz1 \\ iz2 \\ iz3 \\ iz4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\alpha_0]/\|\alpha_0\| \\ [\beta_0]/\|\beta_0\| \\ [Z1]/\|Z1\| \\ [Z2]/\|Z2\| \\ [Z3]/\|Z3\| \\ [Z4]/\|Z4\| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ia1 \\ ia2 \\ ib1 \\ ib2 \\ ic1 \\ ic2 \end{bmatrix} \quad (III.18)$$

Les courants fictifs « isa » et « is β » sont employés pour la conversion d'énergie électromagnétique et afin de réduire, au maximum, les pertes, les courants dans l'espace « Z » doivent être nuls.

III.8.4 Cas d'un défaut de la première phase « Sa1 »

Les équations des tensions et des courants statoriques deviennent :

$$[Vs] = [Va2 \quad Vb1 \quad Vb2 \quad Vc1 \quad Vc2].^t \quad \text{et} \quad [Is] = [ia2 \quad ib1 \quad ib2 \quad ic1 \quad ic2].^t$$

Toutes les composantes relatives à la phase ouverte, en l'occurrence la phase « Sa1 » dans ce cas, doivent être éliminées pour obtenir la nouvelle matrice de transformation. [43][48]

$$\text{Ainsi } [\alpha] = \left[\cos \frac{\pi}{6} \quad \cos \frac{2\pi}{3} \quad \cos \frac{5\pi}{6} \quad \cos \frac{4\pi}{3} \quad \cos \frac{3\pi}{2} \right]$$

$$\text{Avec } \|\alpha\| = \sqrt{\cos^2\left(\frac{\pi}{6}\right) + \cos^2\left(\frac{2\pi}{3}\right) + \cos^2\left(\frac{5\pi}{6}\right) + \cos^2\left(\frac{4\pi}{3}\right) + \cos^2\left(\frac{3\pi}{2}\right)}$$

$$\text{Et } \beta = \left[\sin\frac{\pi}{6} \sin\frac{2\pi}{3} \sin\frac{5\pi}{6} \sin\frac{4\pi}{3} \sin\frac{3\pi}{2} \right]$$

$$\text{Avec } \|\beta\| = \sqrt{\sin^2\left(\frac{\pi}{6}\right) + \sin^2\left(\frac{2\pi}{3}\right) + \sin^2\left(\frac{5\pi}{6}\right) + \sin^2\left(\frac{4\pi}{3}\right) + \sin^2\left(\frac{3\pi}{2}\right)}$$

$$\text{D'où } [Tc] = \begin{bmatrix} [\alpha]/\|\alpha\| \\ [\beta]/\|\beta\| \end{bmatrix} \quad \text{et } [Tn] = \begin{bmatrix} [Tc] \\ \text{null}[Tc].t \end{bmatrix} \quad \dots (III.19)$$

III.8.5 Equation dans le repère « α - β » [68]

III.8.5.1 Equations des tensions

Les équations régissant les enroulements de la machine dans l'axe « $\alpha\beta$ » sont les suivantes :

$$\text{Stator: } \begin{cases} V\alpha = R_s i_s \alpha + \frac{d}{dt} \varphi_{s\alpha} \\ V\beta = R_s i_s \beta + \frac{d}{dt} \varphi_{s\beta} \end{cases} \quad \dots \dots (III.20)$$

$$\text{Rotor: } \begin{cases} 0 = R_r i_r \alpha + \frac{d}{dt} \varphi_{r\alpha} + \omega r \cdot \varphi_{r\beta} \\ 0 = R_r i_r \beta + \frac{d}{dt} \varphi_{r\beta} - \omega r \cdot \varphi_{r\alpha} \end{cases} \quad \dots \dots (III.21)$$

III.8.5.2 Equations des flux [43][67]

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \varphi_{s\alpha} \\ \varphi_{r\alpha} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} L_{sd} & M_d \\ M_d & L_r \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_s \alpha \\ i_r \alpha \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \varphi_{s\beta} \\ \varphi_{r\beta} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} L_{sq} & M_q \\ M_q & L_r \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_s \beta \\ i_r \beta \end{pmatrix} \end{aligned} \quad \dots \dots (III.22)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} L_{sd} = L_{1s} + \|\alpha\|^2 L_{ms} \\ L_{sq} = L_{1s} + \|\beta\|^2 L_{ms} \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} M_d = \|\alpha_0\| \|\alpha\| L_{ms} \\ M_q = \|\beta_0\| \|\beta\| L_{ms} \end{cases}$$

$$L_r = L_{1r} + \|\alpha_0\|^2 L_{ms} = L_{1r} + \|\beta_0\|^2 L_{ms}$$

$$\text{et } \|\alpha_0\| = \|\beta_0\| = \sqrt{3}$$

III.8.6 Equation dans l'espace « Z »

Dans le cas où la machine fonctionne sans la première phase. [43][67]

$$\begin{cases} V_{z1} = R_s i_{z1} + L_{1s} \frac{di_{z1}}{dt} \\ V_{z2} = R_s i_{z2} + L_{1s} \frac{di_{z2}}{dt} \\ V_{z3} = R_s i_{z3} + L_{1s} \frac{di_{z3}}{dt} \end{cases} \quad \dots \dots (III.23)$$

Dans l'espace « Z », les paramètres de la machine sont indépendants des matrices de transformation.

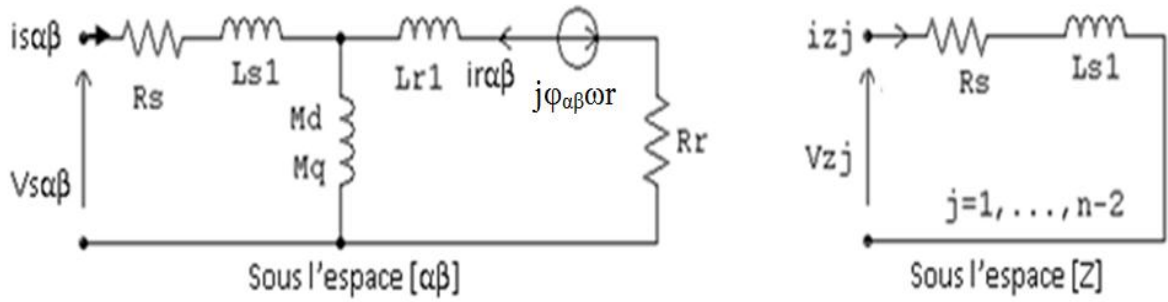


Schéma électrique équivalent sous les espaces « $\alpha\beta$ » et « Z »
Figure (III.7)

III.8.7 Equation mécanique

Le couple électromagnétique est donné par les expressions suivantes :

$$C_{em} = \frac{p}{L_r} [M_q \cdot i_s\beta \cdot \varphi_{r\alpha} - M_d \cdot i_s\alpha \cdot \varphi_{r\beta}] \quad \dots (III. 24)$$

$$C_{em} - C_r = J \frac{d}{dt} \Omega(t) + F \cdot \Omega(t) \quad \dots (III. 25)$$

III.9 Réduction des oscillations du couple

Pour ne pas infecter les performances de la machine qui présente des oscillations du couple lors d'un défaut, l'application des deux méthodes exposées auparavant a pour but principal la réduction au maximum de ces oscillations afin de permettre un fonctionnement le plus satisfaisant possible. [68]

III.9.1 Application de la première méthode

La phase Sa1 est ouverte « $j=1$ », le choix se portera sur la phase Sb1 « $m=3$ » qui supportera toute la contrainte du défaut d'où : [68]

$$\left| \begin{array}{l} i_{a2} = I_{max} \sin(\omega t - \pi/6) \\ i_{b1} = 2I_{max} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \cdot \sin(\omega t) = -I_{max} \sin(\omega t) \\ i_{b2} = I_{max} \sin(\omega t - 5\pi/6) \\ i_{c1} = I_{max} \sin(\omega t - 4\pi/3) \\ i_{c2} = I_{max} \sin(\omega t - 3\pi/2) \end{array} \right. \quad \dots (III. 26)$$

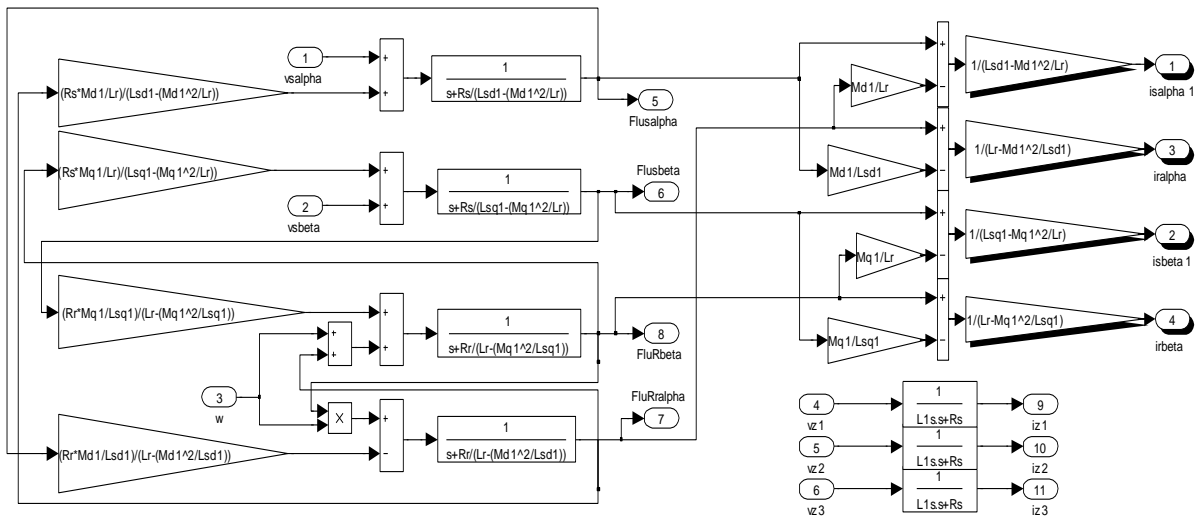
III.9.2 Application de la deuxième méthode

La contrainte est supportée par toutes les phases saines et, après calcul, les nouvelles consignes des courants seront : [02][66]

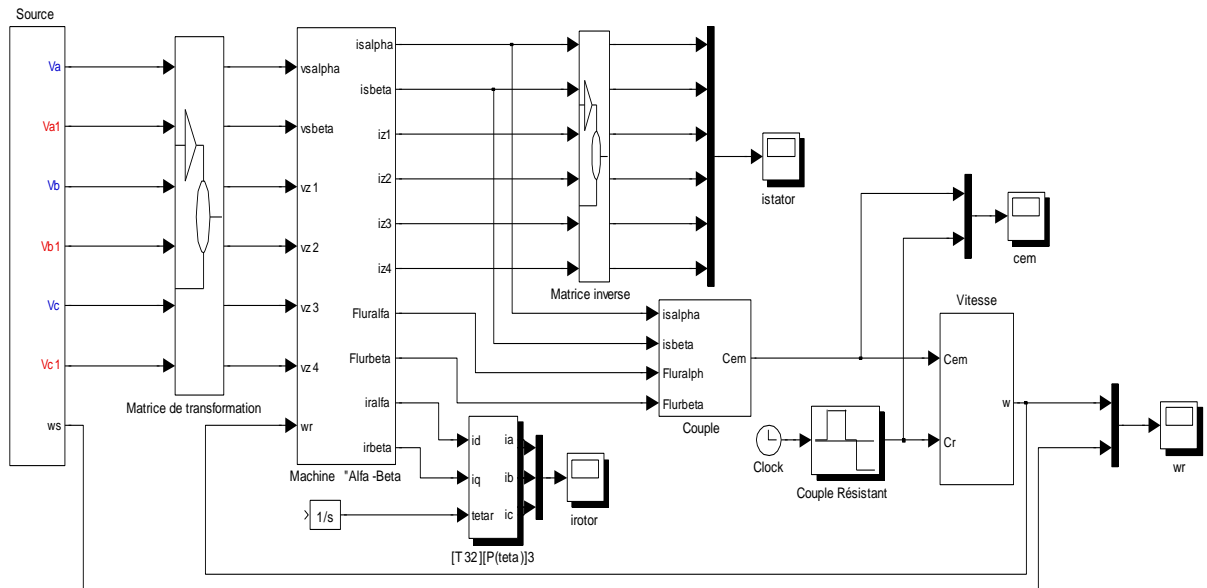
$$\left| \begin{array}{l} i_{a2} = 1.27 \cdot I_{max} \sin(\omega t - \pi/3) \\ i_{b1} = 1.27 \cdot I_{max} \sin(\omega t - 5\pi/6) \\ i_{b2} = 1.27 \cdot I_{max} \cdot \sin(\omega t - \pi) \\ i_{c1} = 1.27 \cdot I_{max} \sin(\omega t + 5\pi/6) \\ i_{c2} = 1.27 \cdot I_{max} \sin(\omega t + \pi/3) \end{array} \right. \quad \dots (III. 27)$$

III.10 Simulation numérique de la MASDE en mode dégradé et interprétation des résultats

III.10.1 Simulation de la MASDE dans le repère $[\alpha-\beta]$



Bloc de la MASDE dans les repères $[\alpha-\beta]$ et $[Z]$
Figure (III.8)

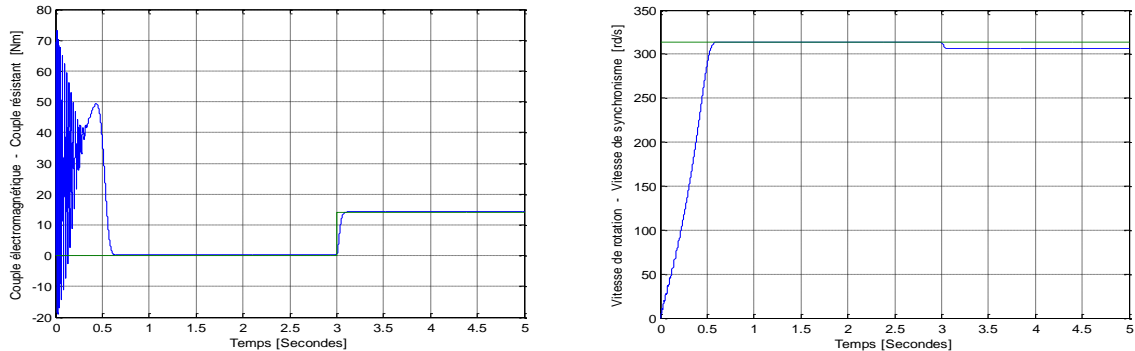


Bloc de simulation global de la MASDE dans les repères $[\alpha-\beta]$ et $[Z]$
Figure (III.9)

La matrice de transformation $[T6]$ pour six phases saines est donnée par :

$$[T6] = \begin{bmatrix} +0.5774 & +0.5000 & -0.2887 & -0.5000 & -0.2887 & -0.0000 \\ +0.0000 & +0.2887 & +0.5000 & +0.2887 & -0.5000 & -0.5774 \\ +0.4827 & -0.3470 & +0.7177 & -0.2650 & +0.1057 & +0.2240 \\ +0.6120 & +0.0947 & -0.2240 & +0.7413 & -0.0000 & +0.1293 \\ +0.0947 & +0.5300 & +0.1767 & +0.0820 & +0.7887 & -0.2240 \\ -0.2240 & +0.5063 & +0.2650 & +0.2003 & -0.1830 & +0.7413 \end{bmatrix}$$

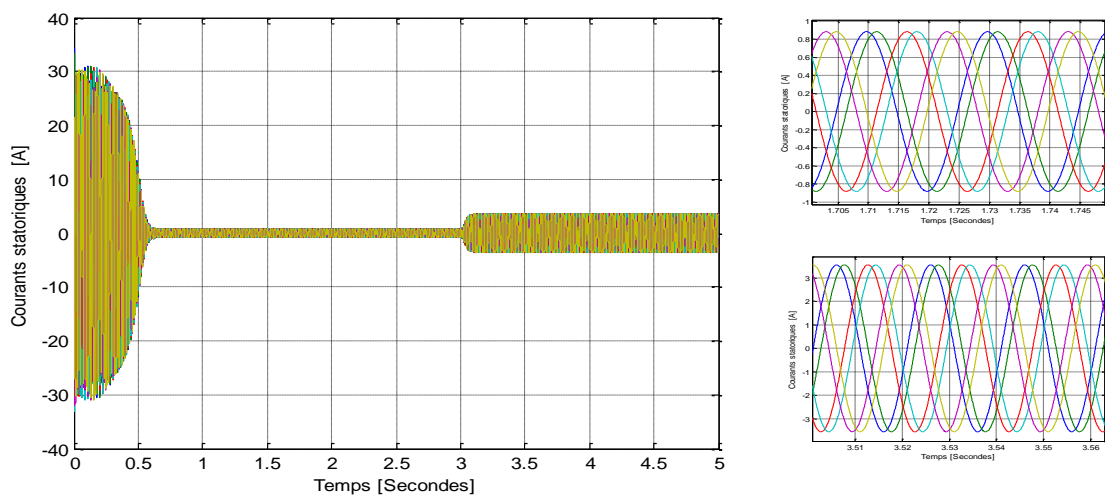
Avant de passer à l'étude de la machine en régime dégradé, il est primordial de simuler le système dans le repère $[\alpha-\beta]$ avec les six phases saines pour montrer la concordance ou la similitude des résultats avec ceux obtenus du comportement de la machine dans le repère « d-q ».



Couple électromagnétique [Nm]

Vitesse de rotation [rd/s]

Figure (III.10)



Courants statoriques « ia1, ia2, ib1, ib2, ic1, ic2 »

Figure (III.11)

La machine tourne, d'abord, à vide avant d'appliquer à « t=3s » une charge de « 14 Nm ». Le même comportement que celui de la machine dans le repère « d-q » est observé, et les mêmes allures de couple, du courant et de vitesse sont obtenues, ce qui confirme l'identité des deux modèles.

III.10.2 Simulation lors d'un défaut d'une phase

III.10.2.1 Défaillance de la phase « Sa1 »

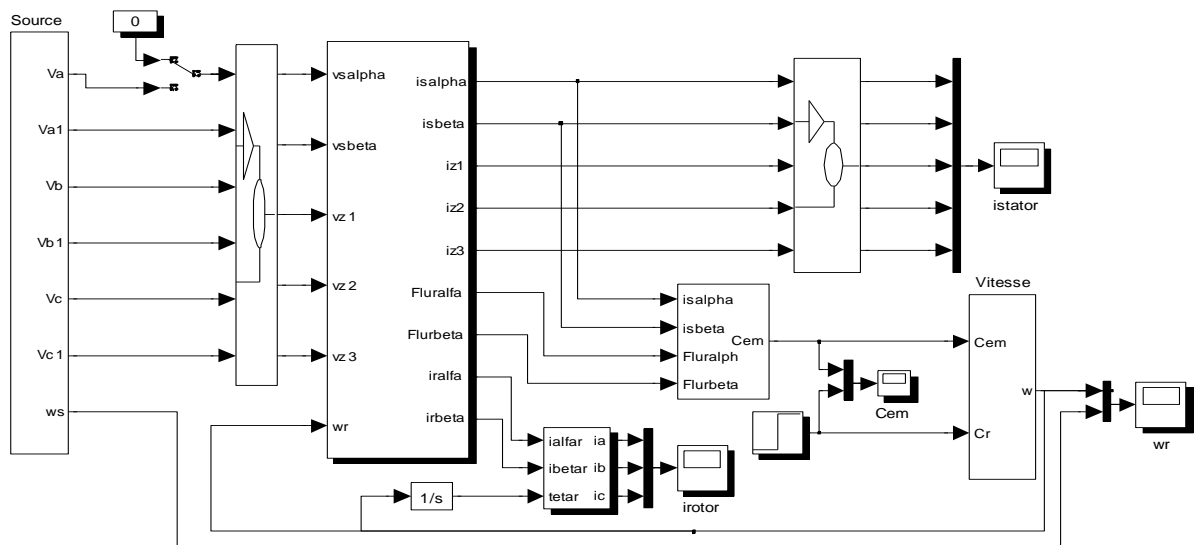
Si, lors du fonctionnement normal de la machine, un défaut survient sur la phase « Sa1 », la machine continue de tourner avec, seulement, cinq phases saines, fournissant un

couple à son arbre qui sera diminué par rapport à sa valeur nominale. Un essai de simulation sur le logiciel « MATLAB » est réalisé avec le modèle adéquat de la machine en mode dégradé.

III.10.2.1.1 Bloc de simulation en mode dégradé

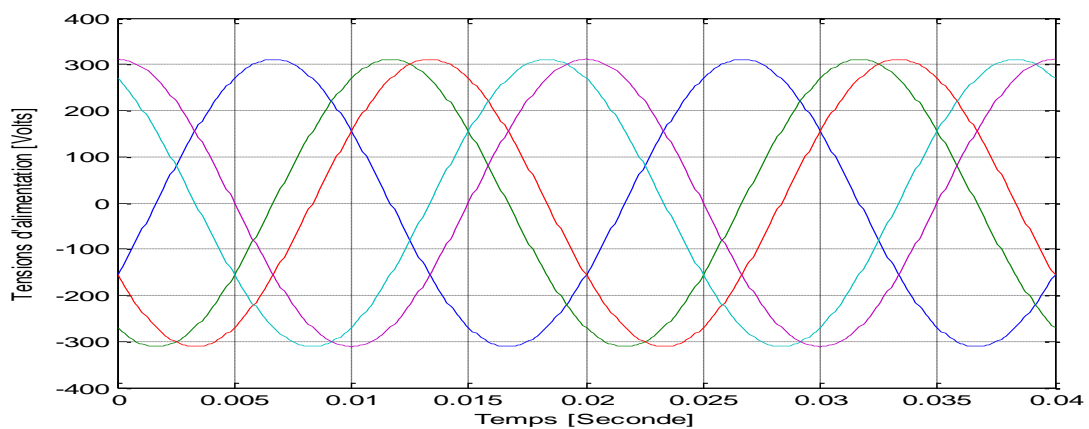
La matrice de transformation pour cinq phases saines est donnée par :

$$[T5] = \begin{bmatrix} +0.6124 & -0.3536 & -0.6124 & -0.3536 & -0.0000 \\ +0.2887 & +0.5000 & +0.2887 & -0.5000 & -0.5774 \\ +0.4487 & -0.4967 & +0.7281 & +0.0129 & +0.1471 \\ +0.5330 & +0.3198 & -0.0911 & +0.7611 & -0.1613 \\ +0.3272 & +0.5253 & +0.0570 & -0.2133 & +0.7868 \end{bmatrix}$$



Bloc de simulation de la MASDE avec la première phase défectueuse
Figure (III.12)

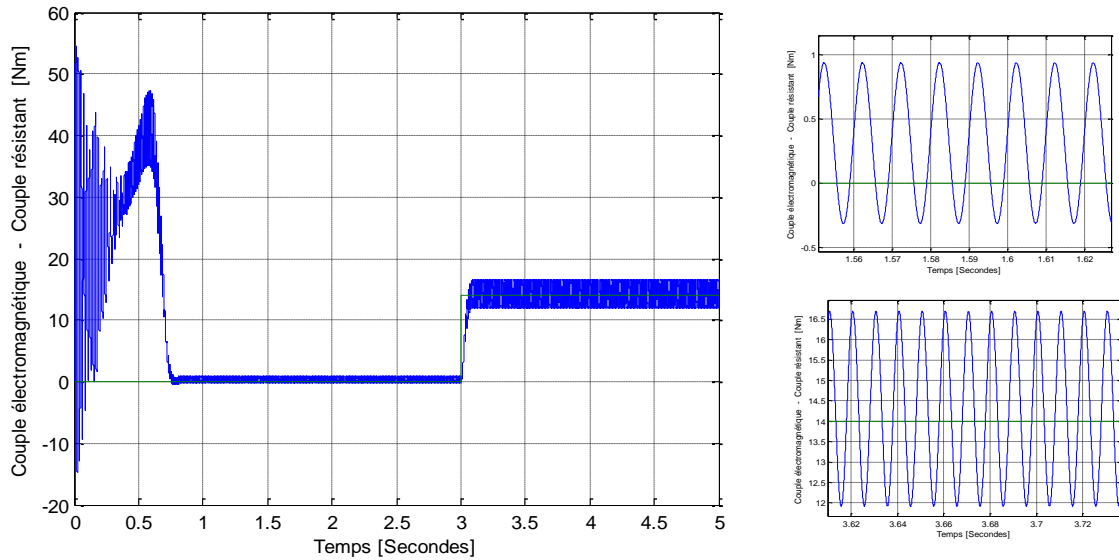
III.10.2.1.2 Tensions d'alimentation



Tensions d'alimentation avec la première phase défectueuse
Figure (III.13)

III.10.2.1.3 Couple électromagnétique

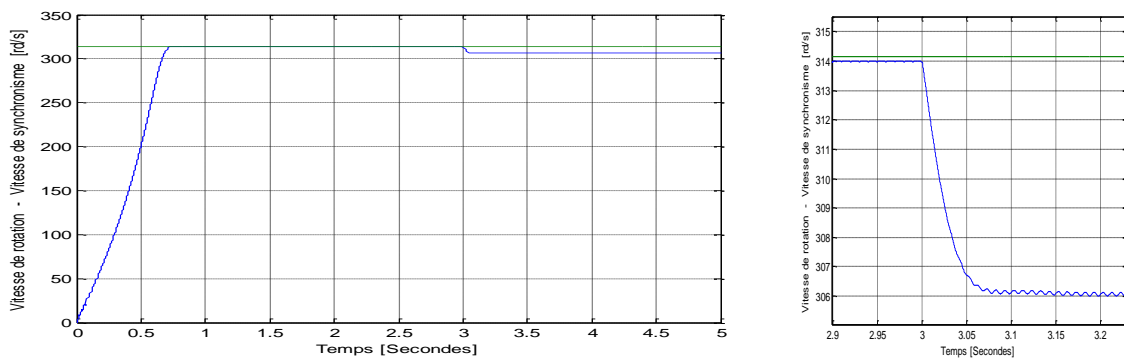
Avec cette phase défailante, au démarrage, le couple de la machine diminue considérablement par rapport à sa valeur où toutes les phases d'alimentation sont saines. Le couple atteint un pic de « 47.2Nm » puis les vibrations s'estompent après « 0.75s » avant d'atteindre une valeur flottante à vide entre « -0.6 Nm » et « 1.2 Nm » correspondant aux pertes fer à vide et aux pertes mécaniques par frottement.



Couple électromagnétique - Couple résistant
Figure (III.14)

A $t=3\text{sec}$, au moment où la charge est connectée au moteur, le couple électromagnétique passe, dans un laps de temps de 0.1 seconde, de la valeur flottante « - 0.6 ~ 1.2 Nm » à une autre valeur flottante perturbée et ondulée entre « 11.8 ~ 16.8 Nm » autour de la valeur du couple résistant. La fréquence des oscillations est deux fois celle des courants d'alimentation.

III.10.2.1.4 Vitesse de rotation



Vitesse de rotation - Vitesse de synchronisme
Figure (III.15)

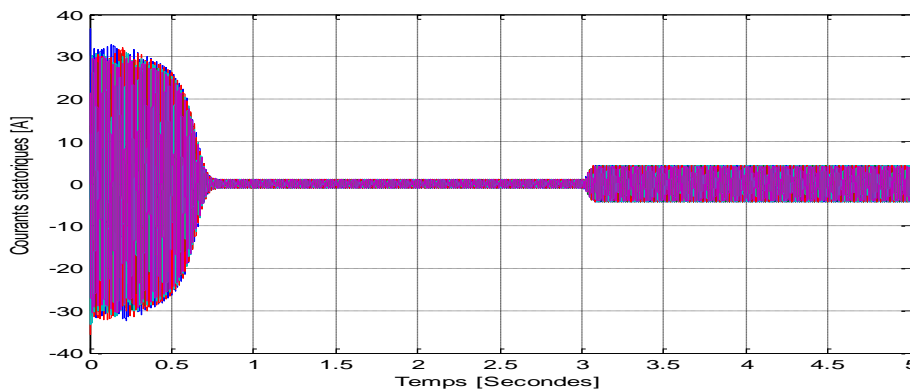
Dans le cas du fonctionnement dégradé, la vitesse atteint celle du synchronisme après un laps de temps de 0.75s, moins rapidement que celle du fonctionnement sain. En charge la vitesse bascule autour de « 306.06rd/s »

III.10.2.1.5 Courants statoriques

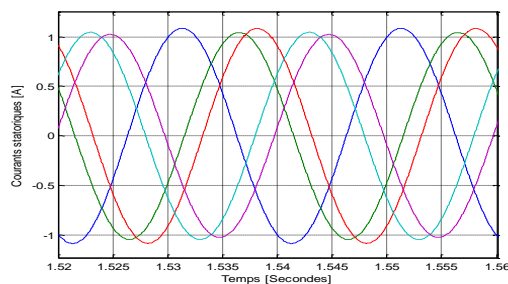
Dans le cas de perte d'une phase d'alimentation, le courant au démarrage prend des valeurs de l'ordre de cinq fois le courant nominal « 30A ».

La figure (III.16b) montre l'allure à vide des cinq courants sinusoïdaux possédant un maximum à « 1.1A ». La machine étant à vide, la puissance absorbée n'est que les pertes fer statoriques ainsi que les pertes mécaniques.

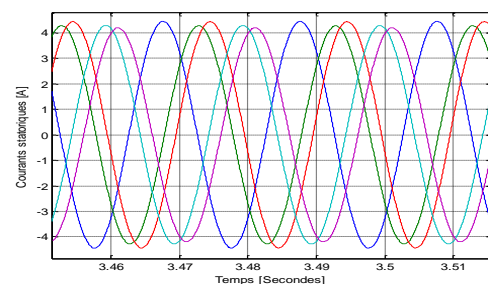
Par contre selon la figure (III.16c), la machine absorbe, lors d'attelage de la charge, des courants de valeur maximale atteignant les « 4.44A ».



Courants statoriques
Figure (III.16)



(b) Courants à vide



(c) Courants en charge

Zooms des courants statoriques
Figure (III.17)

III.10.2.2 Récapitulatif des divers cas de défaillance d'une phase

Pour un fonctionnement avec une phase défectueuse, il existe six configurations où le tableau (III.1) récapitule l'état du couple électromagnétique pour chaque cas et donne les différentes valeurs des inductances de la machine fictive.

Phase saines	Phases en défauts	Etat du couple	Diverses Inductances [43]			
			Lsd	Lsq	Md	Mq
1-2-3-4-5	6	Ondulé	$L_{1s}+3L_{ms}$	$L_{1s}+2L_{ms}$	$3L_{ms}$	$2.449L_{ms}$
1-2-3-4-6	5	Très ondulé	$L_{1s}+2.75L_{ms}$	$L_{1s}+2.25L_{ms}$	$2.872L_{ms}$	$2.598L_{ms}$
1-2-3-5-6	4	Très ondulé	$L_{1s}+2.25L_{ms}$	$L_{1s}+2.75L_{ms}$	$2.598L_{ms}$	$2.872L_{ms}$
1-2-4-5-6	3	Très ondulé	$L_{1s}+2.75L_{ms}$	$L_{1s}+2.25L_{ms}$	$2.872L_{ms}$	$2.598L_{ms}$
1-3-4-5-6	2	Très ondulé	$L_{1s}+2.25L_{ms}$	$L_{1s}+2.75L_{ms}$	$2.598L_{ms}$	$2.872L_{ms}$
2-3-4-5-6	1	Ondulé	$L_{1s}+2L_{ms}$	$L_{1s}+3L_{ms}$	$2.449L_{ms}$	$3L_{ms}$

Tableau (III.1)
Inductances et état du couple d'une marche avec cinq phases saines

III.10.3 Simulation d'un défaut de deux phases

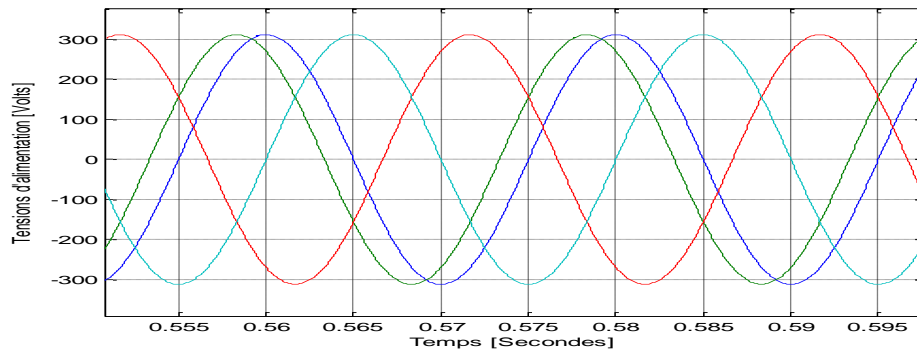
III.10.3.1 Défaut de deux phases d'une même étoile

Les phases « Sa2 » et « Sb2 » sont choisies pour simuler un défaut qui pourra survenir sur deux phases d'une même étoile.

La matrice de transformation utilisée pour deux phases défectueuses appartenant à la même étoile est calculée et donnée par :

$$[T4] = \begin{bmatrix} +0.8165 & -0.4082 & -0.4082 & -0.0000 \\ +0.0000 & +0.5477 & -0.5477 & -0.6325 \\ +0.5527 & +0.4235 & +0.6819 & -0.2238 \\ +0.1668 & +0.5950 & -0.2613 & +0.7416 \end{bmatrix}$$

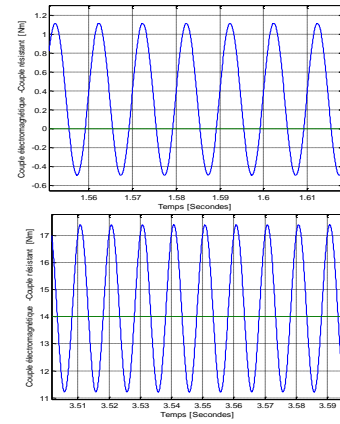
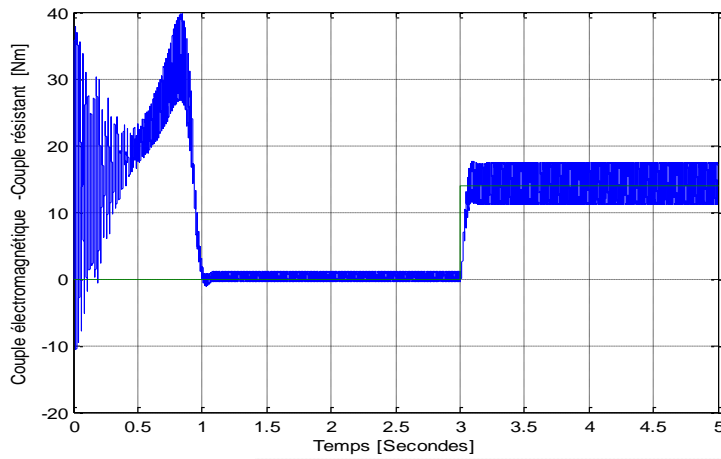
III.10.3.1.1 Tensions d'alimentation



Tensions d'alimentation « Va1-Vb1-Vc1-Vc2 »
Figure (III.18)

III.10.3.1.2 Couple électromagnétique

Des ondulations du couple sont observées à vide et en charge, le pic du couple diminue à « 40Nm » et le couple se stabilise après « 1s » en oscillant autour de « 0.8Nm » à vide et autour de « 14.3Nm » en charge.

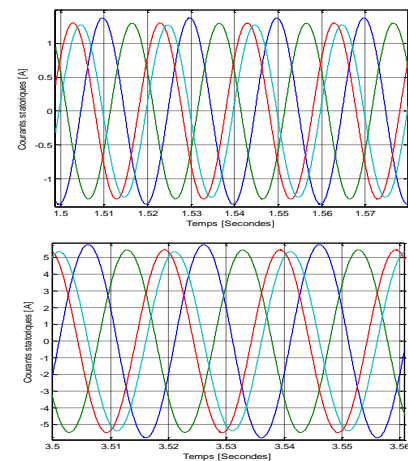
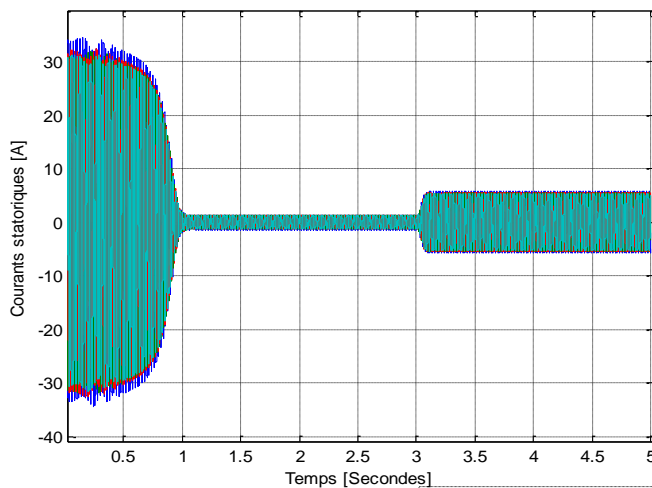


Couple électromagnétique - Couple résistant
Figure (III.19)

III.10.3.1.3 Courants statoriques

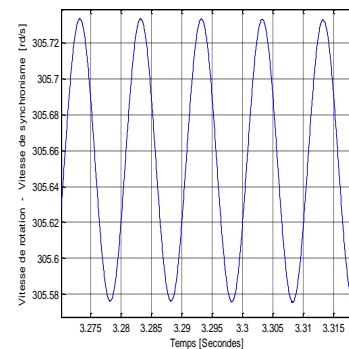
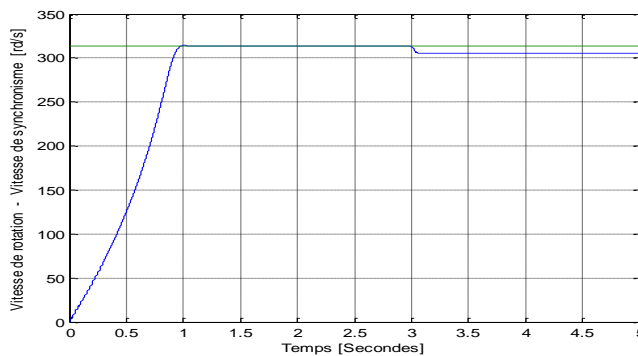
Au démarrage, des forts courants sont appelés atteignant les « 35A », puis après « 1s », la machine absorbe des courants de « 1.37A » à vide.

Par contre en charge les courants augmentent avec des valeurs de courant avoisinant les « 5.8A ».



Courants statoriques
Figure (III.20)

III.10.3.1.4 Vitesse de rotation



Vitesse de rotation - Vitesse de synchronisme
Figure (III.21)

En plus, du fait que le temps de la montée de la vitesse est un peu plus long « 1s », des minimales ondulations sont observées autour de la vitesse moyenne « 305.60 rd/s ».

III.10.3.2 Défaut de deux phases de différentes étoiles

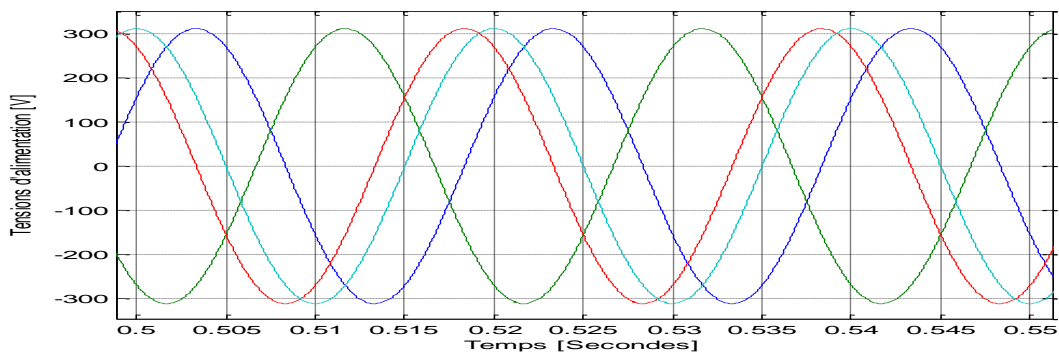
Le cas où chaque étoile présente une phase défectueuse est nécessaire comme support de comparaison.

III.10.3.2.1 Défaillances des phases « Sa1 » et « Sb2 »

Le choix s'est fait porter sur les phases « Sa1 » et « Sb2 » et la matrice de transformation est donnée par :

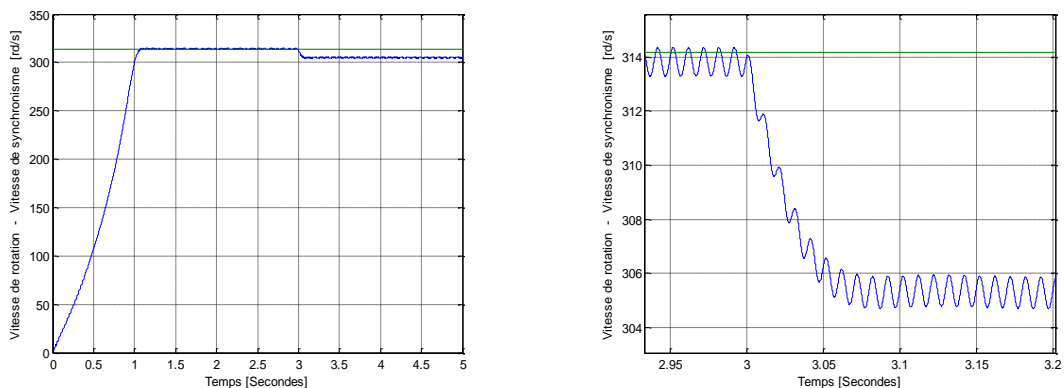
$$[T4] = \begin{bmatrix} +0.7746 & -0.4472 & -0.4472 & -0.0000 \\ +0.3015 & +0.5222 & -0.5222 & -0.6030 \\ +0.5830 & +0.2515 & +0.7584 & -0.1474 \\ +0.2114 & +0.5669 & -0.2007 & +0.7705 \end{bmatrix}$$

III.10.3.2.1.1 Tension d'alimentation



Tensions d'alimentation « Va2-Vb2-Vc1-Vc2 »
Figure (III.22)

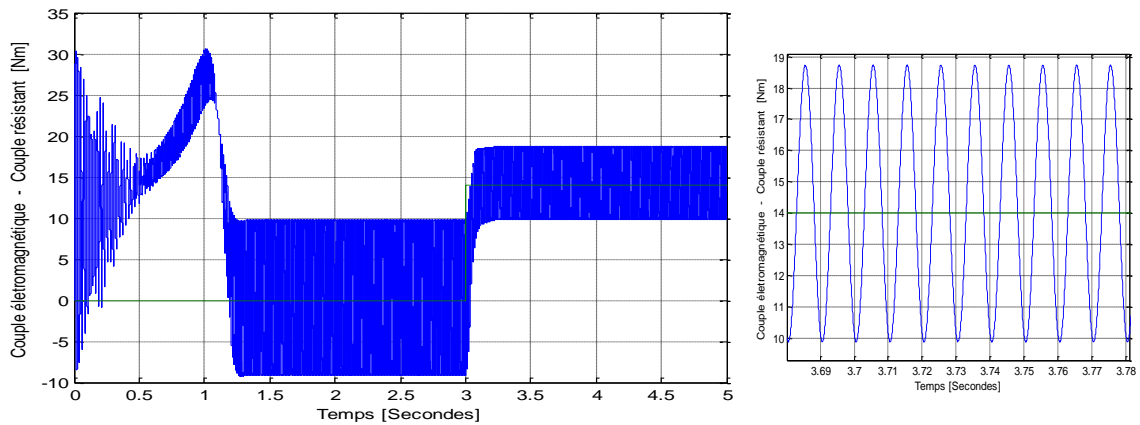
III.10.3.2.1.2 Vitesse de rotation



Vitesse de rotation - Vitesse de synchronisme
Figure (III.23)

A vide, la durée de montée de vitesse tarde et atteint « 1.1s » et en charge la vitesse diminue et oscille autour de « 305.6rd/s ».

III.10.3.2.1.3 Couple électromagnétique

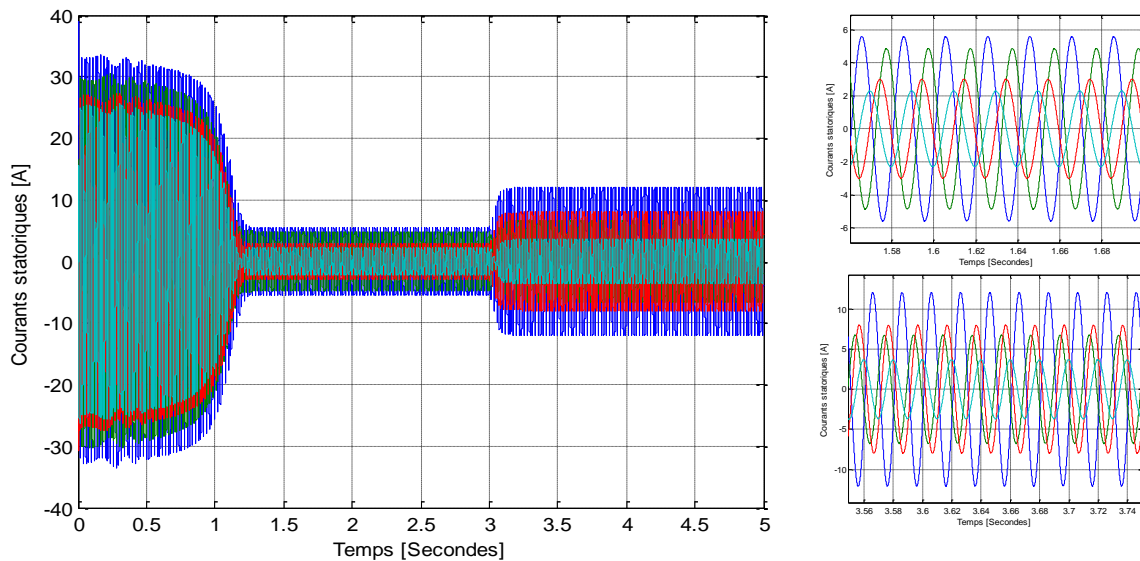


Couple électromagnétique - Couple résistant
Figure (III.24)

Le couple électromagnétique est fortement perturbé et sa forme d'onde atteint une valeur de « 33.7Nm » où des fortes ondulations sont observées.

III.10.3.2.1.4 Courants statoriques

Les fortes ondulations engendrent de forts courants atteignant les « 6A » à vide et les « 12A » en charge.



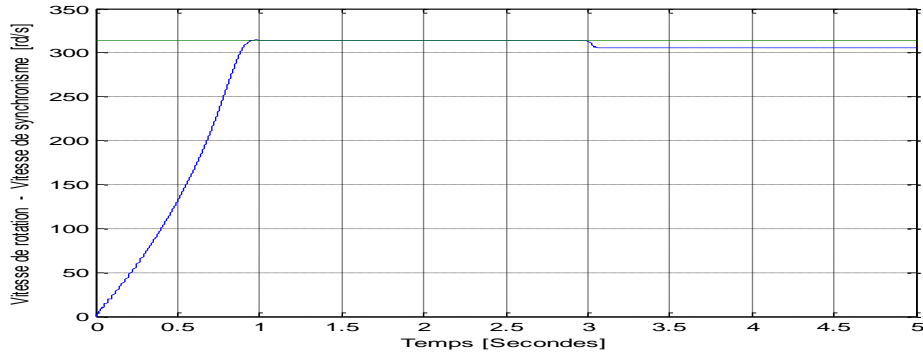
Courants statoriques
Figure (III.25)

III.10.3.2.2 Défaillances des phases « Sa1 » et « Sc2 »

Après simulation, la matrice de transformation est donnée par :

$$[T4] = \begin{bmatrix} +0.6124 & -0.3536 & -0.6124 & -0.3536 \\ +0.3536 & +0.6124 & +0.3536 & -0.6124 \\ +0.4082 & -0.5774 & +0.7041 & +0.0649 \\ +0.5774 & +0.4082 & -0.0649 & +0.7041 \end{bmatrix}$$

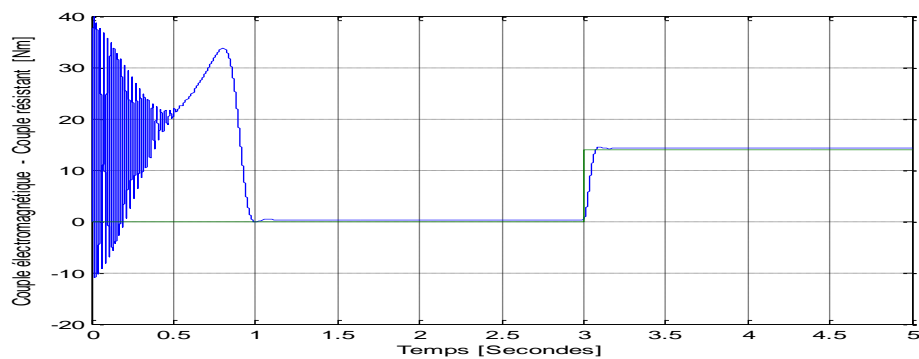
III.10.3.2.2.1 Vitesse de rotation



Vitesse de rotation - Vitesse de synchronisme
Figure (III.26)

A vide, la montée de vitesse est de « 0.96s » et en charge la vitesse est de « 305.6rd/s ».

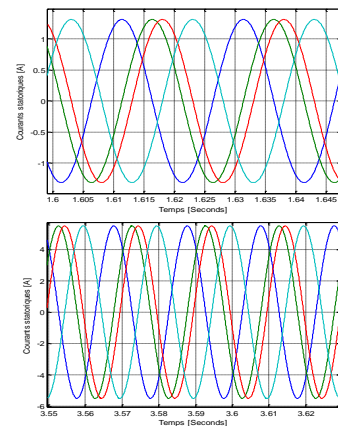
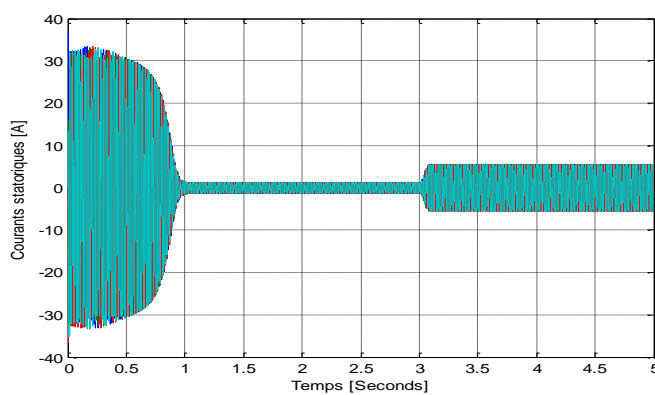
III.10.3.2.2.2 Couple électromagnétique



Couple électromagnétique - Couple résistant
Figure (III.27)

Après une perturbation au démarrage, le couple atteint « 33.7 Nm » avant de rejoindre, après « 1s », la valeur correspondant aux pertes à vide.

III.10.3.2.3.3 Courants statoriques



Courants statoriques
Figure (III.28)

Le courant à vide est de « 1.3A » et l'appel en charge atteint « 5.5A ».

III.10.3.2.3 Récapitulatif des diverses défaillances de deux phases

Pour un fonctionnement avec deux phases défectueuses, il existe neuf combinaisons résumées au tableau (III.2.a) pour le cas de deux étoiles différentes et six combinaisons illustrées au tableau (III.2.b) dans le cas où les phases défectueuses appartiennent à la même étoile.

a) Cas de deux étoiles différentes

Deux étoiles différentes			Diverses Inductances [43]			
Phases en défaut	Phases saines	Etat du couple	Lsd	Lsq	Md	Mq
5-6	1-2-3-4	Très ondulé	$L_{1s}+2.75L_{ms}$	$L_{1s}+1.25L_{ms}$	$2.872L_{ms}$	$1.936L_{ms}$
4-5	1-2-3-6	Non ondulé	$L_{1s}+2L_{ms}$	$L_{1s}+2L_{ms}$	$2.449L_{ms}$	$2.449L_{ms}$
2-5	1-3-4-6	Très ondulé	$L_{1s}+2L_{ms}$	$L_{1s}+2L_{ms}$	$2.449L_{ms}$	$2.449L_{ms}$
3-6	1-2-4-5	Ondulé	$L_{1s}+2.75L_{ms}$	$L_{1s}+1.25L_{ms}$	$2.872L_{ms}$	$1.936L_{ms}$
3-4	1-2-5-6	Très ondulé	$L_{1s}+2L_{ms}$	$L_{1s}+2L_{ms}$	$2.449L_{ms}$	$2.449L_{ms}$
2-3	1-4-5-6	Non ondulé	$L_{1s}+2L_{ms}$	$L_{1s}+2L_{ms}$	$2.449L_{ms}$	$2.449L_{ms}$
1-6	2-3-4-5	Non ondulé	$L_{1s}+2L_{ms}$	$L_{1s}+2L_{ms}$	$2.449L_{ms}$	$2.449L_{ms}$
1-4	2-3-5-6	Très ondulé	$L_{1s}+1.25L_{ms}$	$L_{1s}+2.75L_{ms}$	$1.936L_{ms}$	$2.872L_{ms}$
1-2	3-4-5-6	Très ondulé	$L_{1s}+1.25L_{ms}$	$L_{1s}+2.75L_{ms}$	$1.936L_{ms}$	$2.872L_{ms}$

Tableau (III.2.a)
Inductances et état du couple avec deux phases défectueuses

b) Cas d'une même étoile

Même étoile			Diverses Inductances [43]			
Phase en défaut	Phases saines	Etat du couple	Lsd	Lsq	Md	Mq
3-5	1-2-4-6	Ondulé	$L_{1s}+2.5L_{ms}$	$L_{1s}+1.5L_{ms}$	$2.738L_{ms}$	$2.121L_{ms}$
1-5	2-3-4-6	Très ondulé	$L_{1s}+1.75L_{ms}$	$L_{1s}+2.25L_{ms}$	$2.291L_{ms}$	$2.598L_{ms}$
1-3	2-4-5-6	Très ondulé	$L_{1s}+1.75L_{ms}$	$L_{1s}+2.25L_{ms}$	$2.291L_{ms}$	$2.598L_{ms}$
4-6	1-2-3-5	Ondulé	$L_{1s}+2.598L$	$L_{1s}+2.291L$	$2.598L_{ms}$	$2.291L_{ms}$
2-6	1-3-4-5	Très ondulé	$L_{1s}+2.598L$	$L_{1s}+2.291L$	$2.598L_{ms}$	$2.291L_{ms}$
2-4	1-3-5-6	Ondulé	$L_{1s}+1.5L_{ms}$	$L_{1s}+2.5L_{ms}$	$2.123L_{ms}$	$2.738L_{ms}$

Tableau (III.2.b)
Inductances et état du couple avec deux phases défectueuses

III.10.4 Simulation d'un défaut de trois phases

III.10.4.1 Perte d'une étoile

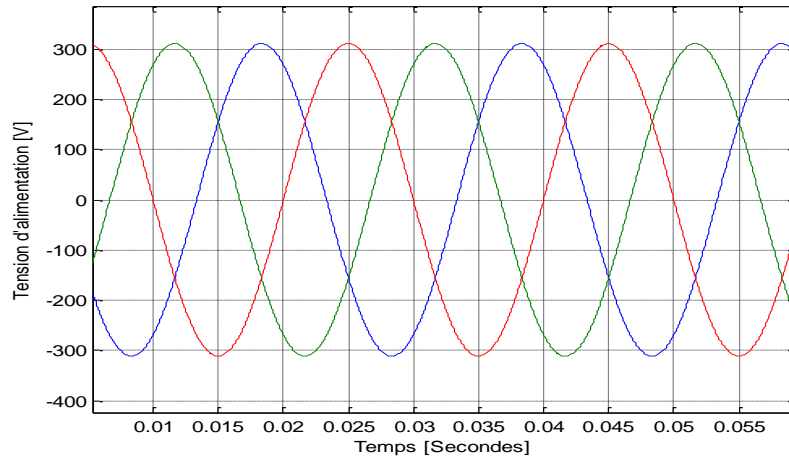
La perte de l'une des deux étoiles entraîne la marche du moteur avec la moitié de ses performances.

Dans le cas où l'onduleur alimentant l'étoile 2 est déconnecté, après un défaut de ses trois phases « Sa2-Sb2-Sc2 » le composant, la matrice de transformation est donnée par :

$$[T3] = \begin{bmatrix} +0.8165 & -0.4082 & -0.4082 \\ +0.0000 & +0.7071 & -0.7071 \\ +0.5774 & +0.5774 & +0.5774 \end{bmatrix}$$

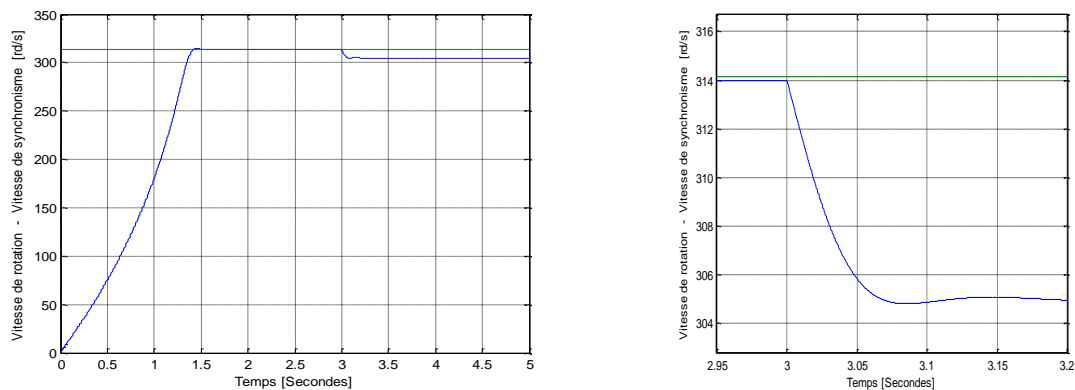
III.10.4.1.1 Tensions d'alimentation

Les tensions d'alimentation d'une étoile ne sont que les tensions triphasées.



Tensions d'alimentation
Figure (III.29)

III.10.4.1.2 Vitesse de rotation

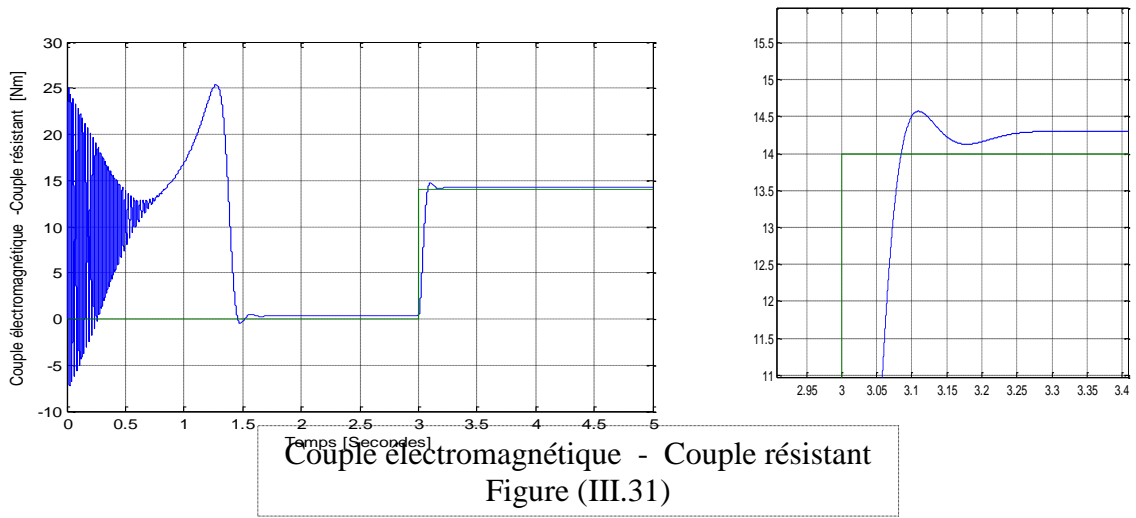


Vitesse de rotation - vitesse de synchronisme
Figure (III.30)

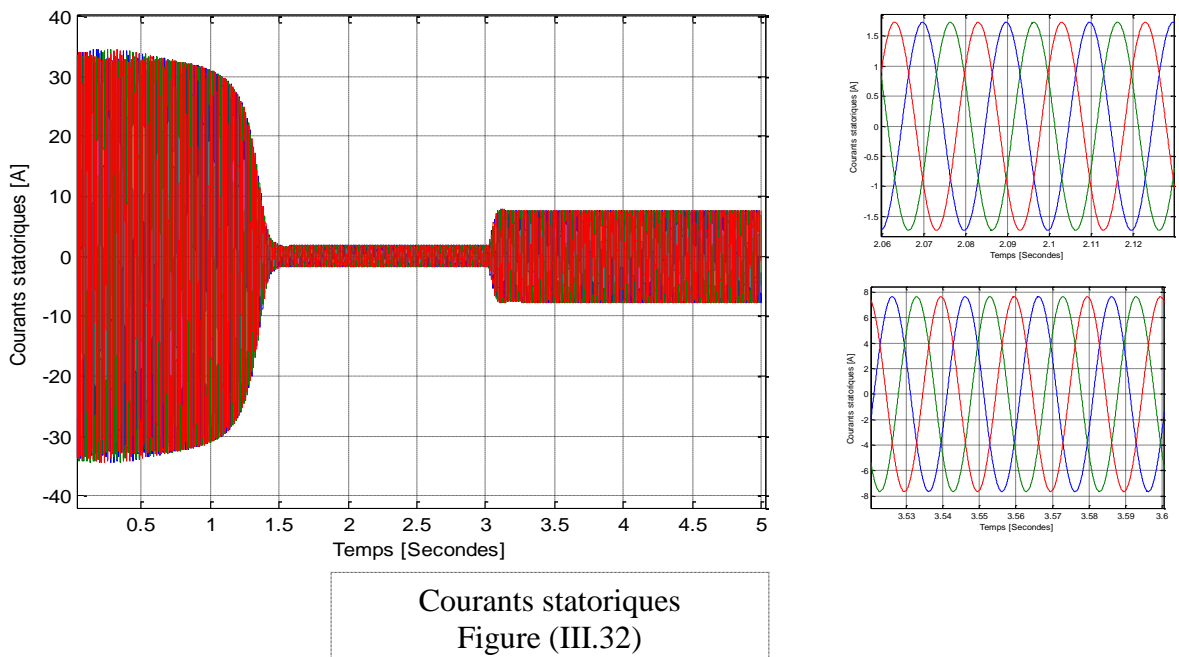
Le temps de montée augmente à « 1.54s », puis après l'application de la charge, la machine décélère jusqu'à « 304.8rd/s ».

III.10.4.1.3 Couple électromagnétique

Le même comportement que dans le cas des deux étoiles saines est observé avec des valeurs divisées par deux. Ainsi, la forme vibratoire du couple atteint « 25.4Nm » puis oscille avant de se stabiliser à « 0.31 Nm », valeur correspondante aux pertes à vide. Lors de l'assemblage de la charge, le couple de la machine suit l'évolution du couple résistant.



III.10.4.1.4 Courants statoriques



Les courants statoriques au démarrage atteignent les « 34A » avant de s'estomper sur une valeur de « 1.7A ». Après application de charge, l'appel aux courants augmente jusqu'à « 7.65A ».

	Phases en défaut	Phases saines	Diverses Inductances [43]			
			Lsd	Lsq	Md	Mq
Etoile 1	1-3-5	2-4-6	$L_{1s}+1.5L_{ms}$	$L_{1s}+1.5L_{ms}$	$2.121L_{ms}$	$2.121L_{ms}$
Etoile 2	2-4-6	1-3-5				

Tableau (III.3.a)
Diverses Inductances lors d'un fonctionnement avec une seule étoile

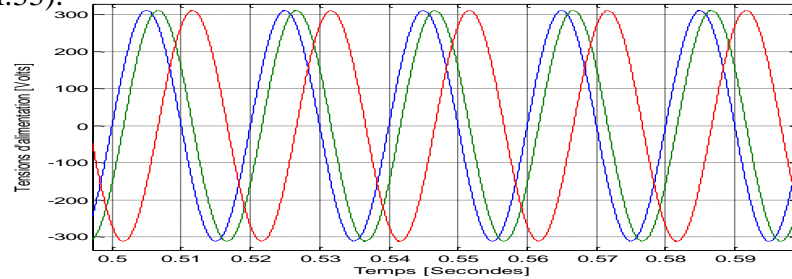
III.10.4.2 Défaut de trois phases de différentes étoiles

Maintenant, les trois phases en défaut n'appartiennent pas à la même étoile. Les trois phases en défaut sont « Sa1-Sa2-Sb1 » et la matrice de *transformation* est donnée par :

$$[T3] = \begin{bmatrix} +0.7071 & +0.6124 & -0.3536 \\ +0.0000 & +0.5000 & +0.8660 \\ +0.7071 & -0.6124 & +0.3536 \end{bmatrix}$$

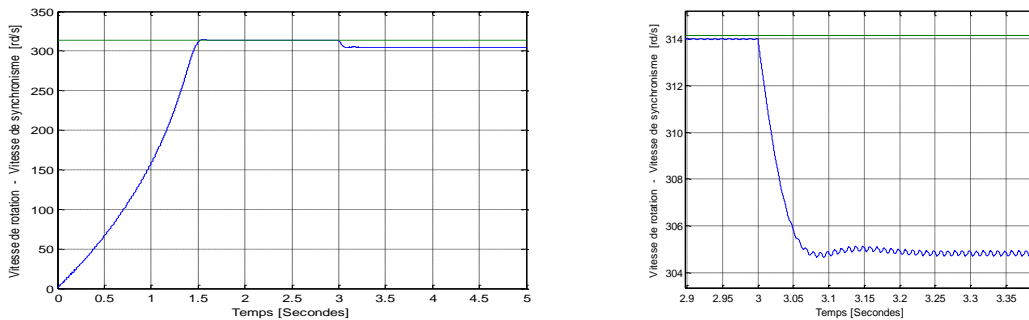
III.10.4.2.1 Tensions d'alimentation

Les trois tensions d'alimentation n'appartenant pas à la même étoile sont présentées par la figure (III.33).



Tensions d'alimentation
Figure (III.33)

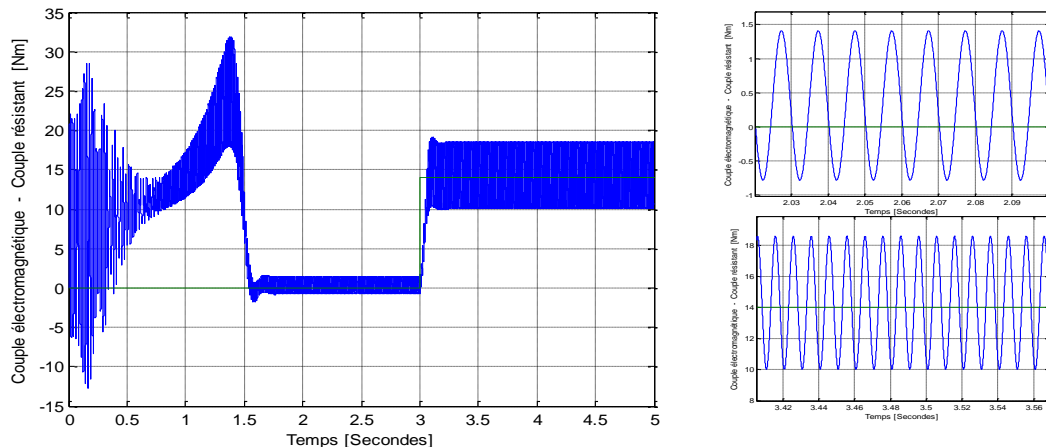
III.10.4.2.2 Vitesse de rotation



Vitesse de rotation - vitesse de synchronisme
Figure (III.34)

Dans ce cas, le temps de montée de la vitesse augmente encore à « 1.5s », puis après l'application de la charge, la machine décélère et la vitesse oscille autour de la valeur de « 304.8rd/s ».

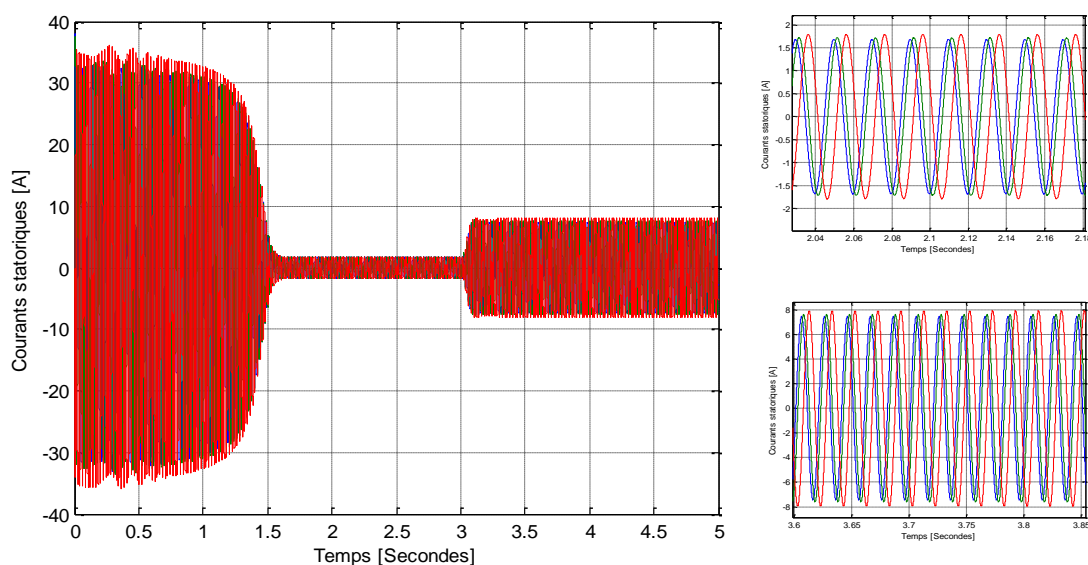
III.10.4.2.3 Couple électromagnétique



Couple électromagnétique - Couple résistant
Figure (III.35)

Le fait que les phases n'appartiennent pas à la même étoile, des oscillations du couple sont observées à vide et en charge.

III.10.4.2.4 Courants statoriques



Courants statoriques
Figure (III.36)

Les courants à vide et en charge lors de la perte de trois phases n'appartenant pas toutes à la même étoile gardent les mêmes valeurs que lors de perte d'une des deux étoiles.

III.10.4.3 Récapitulatif des diverses défaillances de trois phases

Pour un fonctionnement avec trois phases défectueuses n'appartenant pas toutes à la même étoile, il existe dix-huit combinaisons de probables défaillances des trois phases.

Les diverses inductances de la machine fictive sont résumées au tableau (III.3.b).

Phases en défaut				Lsd [43]	Lsq [43]	Md [43]	Mq [43]
1-2-3	1-2-5	1-3-4	1-4-5	$L_{1s}+L_{ms}$	$L_{1s}+2L_{ms}$	$1.732L_{ms}$	$2.499L_{ms}$
1-2-4				$L_{1s}+0.5L_{ms}$	$L_{1s}+2.5L_{ms}$	$1.224L_{ms}$	$2.738L_{ms}$
1-2-6	1-4-6	2-3-4	2-4-5	$L_{1s}+1.25L_{ms}$	$L_{1s}+1.75L_{ms}$	$1.9365L_{ms}$	$2.291L_{ms}$
2-5-6				$L_{1s}+1.5L_{ms}$	$L_{1s}+1.5L_{ms}$	$2.121L_{ms}$	$2.121L_{ms}$
1-3-6	1-5-6	2-3-5	3-4-5	$L_{1s}+1.75L_{ms}$	$L_{1s}+1.25L_{ms}$	$2.291L_{ms}$	$1.936L_{ms}$
2-3-6	3-4-6	3-5-6		$L_{1s}+2L_{ms}$	$L_{1s}+L_{ms}$	$2.449L_{ms}$	$1.732L_{ms}$
4-5-6				$L_{1s}+2L_{ms}$	$L_{1s}+1.118L_{ms}$	$2.449L_{ms}$	$1.936L_{ms}$

Tableau (III.3.b)
Diverses Inductances des différentes combinaisons avec trois phases défectueuses n'appartenant pas à la même étoile

III.10.5 Récapitulative sur les diverses simulations

Le tableau suivant dresse un comparatif des grandeurs caractéristiques de la machine lors des divers défauts étudiés pouvant survenir sur les phases d'alimentation statoriques.

Marche ou phases en défaut	Couple électromagnétique		Vitesse de rotation		Courants statoriques	
	Valeur Maximale	Temps de stabilité	Valeur finale	Temps de montée	A vide	En charge
Sans défaut	49.35	0.65 s	306.3	0.62 s	0.88 A	3.55 A
Cinq phases	47.20	0.75 s	306.1	0.76 s	1.10 A	4.50 A
Deux phases d'une même étoile	39.80	1.00 s	305.6	1.00 s	1.37 A	5.80 A
Deux phases d'étoiles différentes	33.73	1.05 s	305.6	1.00 s	1.32 A	5.51 A
Perte d'une étoile	25.40	1.54 s	304.8	1.50 s	1.73 A	7.65 A
Trois phases de différentes étoiles	25.50	1.56 s	304.8	1.56 s	1.80 A	7.95 A

Comparaison entre les différentes grandeurs pour les divers défauts
Tableau (III.4)

III.10.5.1 Couple électromagnétique

En marche normale, la machine atteint une valeur du couple avoisinant les « 49.35 Nm » et dans un laps de temps de « 0.65 s » le couple se stabilise à sa valeur correspondante aux pertes à vide.

Au fur et à mesure que la machine perd des phases de son alimentation, la valeur maximale du couple diminue et le temps de relaxation augmente. A noter que pour un fonctionnement avec une seule étoile, la valeur du couple est tout simplement divisée par deux.

Pour une marche avec une ou deux étoiles saines, le couple ne présente aucune ondulation, contrairement aux cas où des phases d'alimentation sont manquantes, des ondulations apparaissent et augmentent avec le nombre de bras d'onduleurs défaillants.

III.10.5.2 Vitesse de rotation

A vide, la vitesse de synchronisme est atteinte après une période qui augmente avec l'augmentation du nombre de phases défectueuses.

Après l'enclenchement de la charge, la vitesse est de « 306.3rd/s » et diminue au fur et à mesure que le nombre de phases saines est réduit.

III.10.5.3 Courants statoriques

Lorsque la machine fonctionne avec les six phases saines, les courants seront :

A vide, le courant absorbé est de « 0.9A » et augmente avec le nombre de phases défectueuses jusqu'à une valeur de « 1.79A » avec un fonctionnement en demi moteur.

En charge, l'appel en courant est de « 3.55A » en fonctionnement sain et pratiquement le double lors de perte d'une étoile.

Cela s'explique par le fait que le moteur absorbe le même courant à travers ses trois phases saines, c'est-à-dire, la puissance n'est plus segmentée.

III.11 Conclusion

L'avantage majeur d'utilisation de ce genre de moteur dans l'industrie est la possibilité de fonctionnement en mode dégradé, c'est-à-dire dans le cas de perte de phases d'alimentation ou de court-circuit des enroulements statoriques.

Ce chapitre traite les différents défauts pouvant parvenir à la machine et présente l'étude préalable de la machine en cas de perte de phase.

Selon le domaine d'utilisation de la machine, il est possible de garantir un fonctionnement satisfaisant par utilisation de calculateurs puissants qui, en temps réel, assurent la commande appropriée aux différentes phases du stator de la machine assurant ainsi un couple ne présentant pas des ondulations nocives au fonctionnement et une vitesse nécessaire à la charge, tout en contrôlant l'appel en courant qui doit satisfaire une marche, sans surchauffe, du moteur et éviter des courts circuits des spires des enroulements statoriques.

Après cette analyse, il s'avère légitime, que les moteurs asynchrones double étoile sont largement utilisés dans les applications militaires et dans les applications embarquées.

La souplesse observée dans ce genre de moteurs, laisse penser que le moteur asynchrone triphasé sera délaissé au profit du moteur asynchrone à double étoile.

CHAPITRE IV

APPLICATION

AU

POMPAGE

CHAPITRE IV

APPLICATION AU POMPAGE

1 Introduction

2 Généralités

3 Classification des pompes

3.1 Pompe Centrifuge

3.1.1 Constitution d'une pompe centrifuge

3.1.2 Différents types de pompes centrifuges

3.1.2.1 Nombre de roues

3.1.2.1.1 Pompes monocellulaires

3.1.2.1.2 Pompes multicellulaires

3.1.2.2 Différentes formes des aubes de la roue

3.1.2.3 Pompes à axe horizontal ou vertical – position de la pompe

3.1.2.3.1 Pompe de surface

3.1.2.3.2 Pompes immergées

3.1.2.4 Type d'effluent spécifique à pomper

3.2 Autres types de pompes

3.2.1 Machines élévatoires simples – vis d'Archimède

3.2.2 Pompes à piston

3.2.2.1 Pompes aspirantes et foulantes

3.2.2.2 Pompes à fourreau

3.2.2.3 Pompes à diaphragme

3.2.2.4 Pompes à piston plongeur

3.2.2.5 utilisations des pompes à piston

3.2.3 Pompes rotatives

3.2.4 Aéro-éjecteurs

4 L'hydraulique de pompage

4.1 Hauteur manométrique totale

4.2 Hauteur d'aspiration

4.3 Pertes de charge

4.4 Hauteur totale de pompage

4.5 Puissance d'une pompe

4.6 Charge nette à l'aspiration : NPSH

4.7 Cavitation

5 Caractéristique de la pompe centrifuge

5.1 Caractéristique « Débit – Vitesse »

5.2 Caractéristique « Couple-Vitesse »

5.3 Caractéristique « Débit-Hauteur »

5.4 Caractéristique de rendement de la pompe

5.5 Utilisation des lois de similitude

6 Application de la MASDE au Pompage

6.1 Modélisation de la pompe centrifuge

6.1.1 Bloc de simulation de la pompe centrifuge

6.1.2 Lois de similitude

6.2 Bloc de simulation globale de la MASDE- Pompe centrifuge

6.3 Simulation numérique et interprétation des résultats

6.3.1 Couple du moteur – Couple résistant

6.3.2 Vitesse de synchronisme – vitesse de rotation

6.3.3 Caractéristique « Couple – Vitesse de rotation »

6.3.4 Caractéristique « Débit – Vitesse de rotation »

6.3.5 Evolution du Débit

6.3.6 Caractéristique « Débit – Hauteur manométrique totale »

6.3.7 « Hauteur manométrique totale – Vitesse de rotation »

7 Dimensionnement pratique de la pompe centrifuge

7.1 Puissance de la pompe

7.2 Vitesse de l'eau dans les tuyauteries

7.3 Hauteur nette d'amorçage

8 Avantages et inconvénients des pompes centrifuges

8.1 Avantages

8.2 Inconvénients

9 Domaines d'utilisation

10 Conclusion

CHAPITRE IV

APPLICATION AU POMPAGE

IV.1 Introduction

Dès que l'homme est apparu sur terre, il a œuvré sans cesse, pour assouvir ses ambitions et asservir son environnement pour mieux l'adapter à ses besoins quotidiens. L'intérêt d'avoir à sa disponibilité l'élément nécessaire à sa survie, à savoir l'eau, l'a poussé à développer des techniques d'acheminement de cette ressource puisée, essentiellement, des puits ou des rivières.

Des divers récipients antédiluviens, Seghia, Delou, Foggaras, Chadouf, Noria, Vis d'Archimède, aux pompes modernes, les Chinois, les Grecs et les Romains furent les pionniers dans l'utilisation des systèmes rotatifs pour véhiculer l'eau. [69]

L'apparition de l'énergie électrique a boosté l'évolution dans la technique des pompes à principe rotatif, des turbines et des pompes centrifuges, en vue d'obtenir de meilleurs rendements, de plus grand débits et de plus hautes pressions.

A noter que près d'un siècle, aucun grand principe relatif aux pompes n'est découvert. Seules les techniques de fabrication ainsi que la diversité des substances utilisées ont permis une large avancée de ce domaine, notamment dans le milieu industriel dans lequel deux tiers des moteurs sont destinés aux pompages des divers fluides. [70]

Concevoir et réaliser une station de pompage est une tâche complexe, qui doit tenir compte des contraintes résultantes de l'hydraulique, de la tarification de la fourniture de l'énergie électrique, tout en assurant un bon équilibre entre l'investissement et le coût de fonctionnement. [71]

Le choix de la pompe doit se faire en s'appuyant sur l'analyse de la demande et ses fluctuations journalières et saisonnières et de la possibilité d'extension dans l'avenir.

L'alimentation en énergie est assurée, généralement, par deux sources distinctes, empruntant deux chemins de câbles différents. Pour plus de sécurité, un groupe électrogène de secours assure le relais, en cas de l'indisponibilité des deux lignes électriques.

Les tarifs de fourniture de l'énergie électrique peuvent varier considérablement, selon la période de consommation et pour ne pas conduire à des coûts d'exploitation exorbitants, il est nécessaire de stocker l'eau dans des réservoirs et de mettre en place des systèmes permettant de maintenir la distribution dans des conditions dégradées.

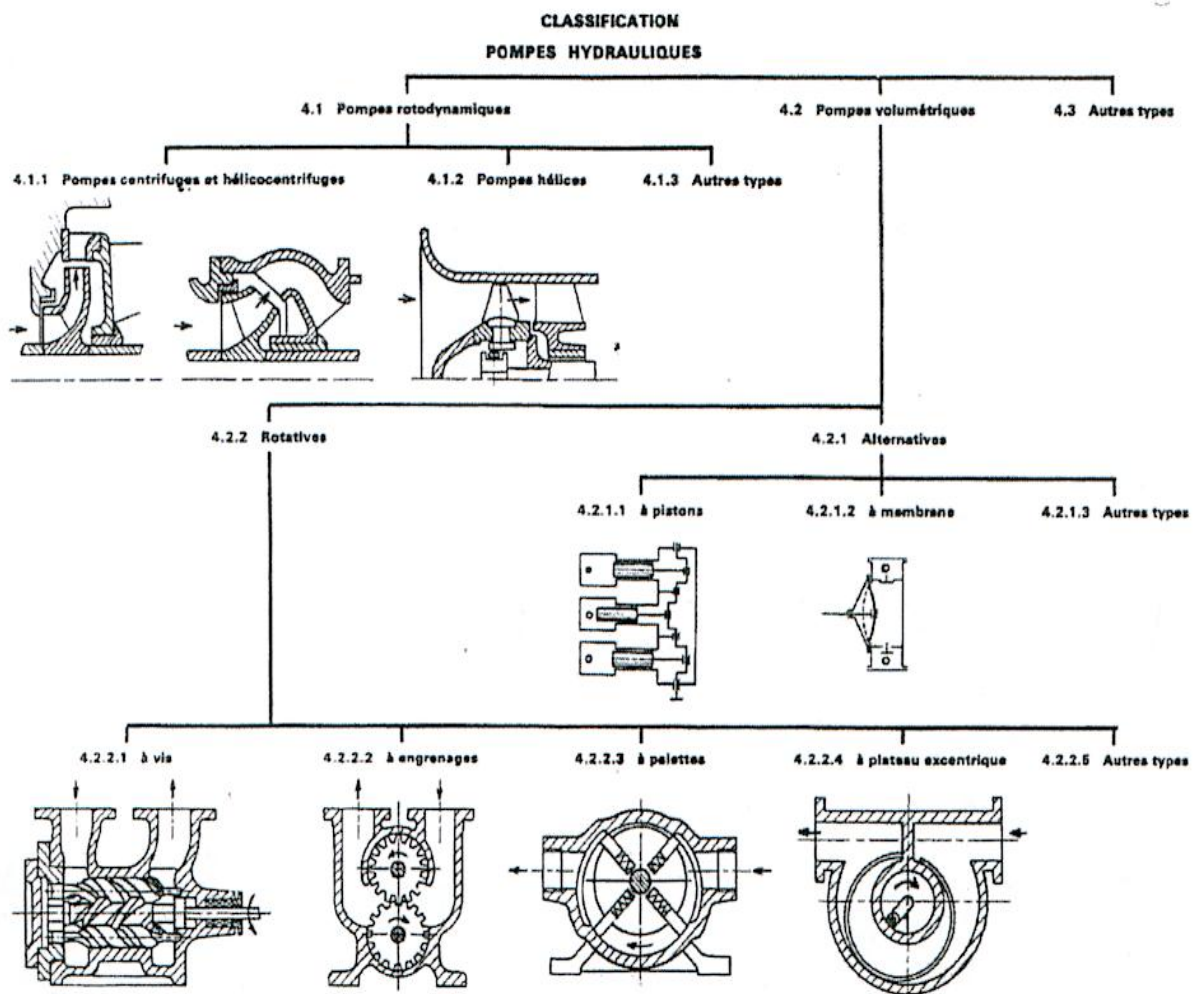
Après étude et analyse, il faudra définir le débit et le nombre de pompes à installer où la configuration la plus utilisée est de deux pompes avec une autre de secours.

IV.2 Généralités

Le pompage est une opération effectuée par des organes nommés « Pompes » qui assurent le déplacement d'un fluide d'un point à un autre, lorsque la pesanteur n'assure pas cette tâche.

Afin d'assurer le mouvement des organes de la pompe, il est nécessaire, au préalable, de transmettre l'énergie indispensable aux moteurs qui transforment l'énergie thermique ou électrique en une énergie mécanique retransmise au fluide, soit sous forme d'énergie cinétique appelée « débit » ou bien sous forme d'énergie potentielle appelée « pression ». [70]

IV.3 Classification des pompes



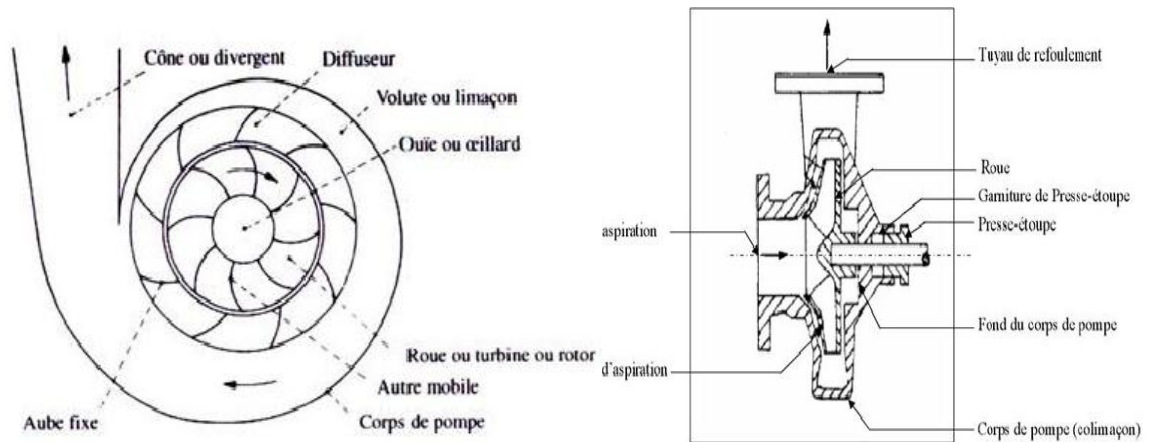
Classification des pompes hydrauliques
Figure (IV.1)

Dans le domaine du pompage d'eau brute et d'eau potable, du traitement et évacuation des eaux usées ou du pompage des eaux pluviales, les pompes les plus, fréquemment, utilisées restent les pompes centrifuges, mais ne laissent pas les autres modèles de pompes en expectative, car elles trouvent leurs applications dans des domaines bien précis. [72]

IV.3.1 Pompe Centrifuge

IV.3.1.1 Constitution d'une pompe centrifuge

Une pompe centrifuge se compose de : [71][73]



Pompes centrifuges
Figure (IV.2)

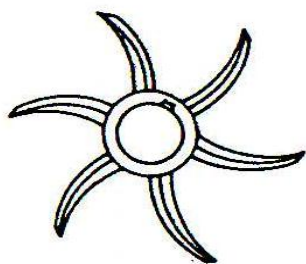
a) Distributeur

Il sert à distribuer l'eau avec une vitesse et une direction convenables dans l'axe de la pompe appelé « ouïe » ou « œillard » précédé, à l'amont, par la canalisation d'aspiration.

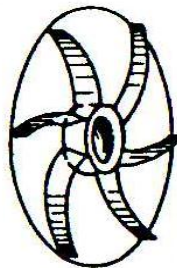
b) Roue, turbine, rotor ou mobile

Constitué par un moyeu porté par un arbre et muni d'aubes tournant à l'intérieur de deux coquilles formant le corps de la pompe. [71][74]

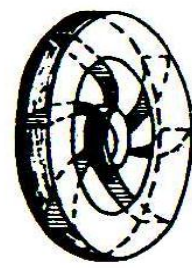
Les aubes peuvent être fixées sur un ou deux cotés à des disques



Rotor ouvert



Rotor demi-ouvert



Rotor fermé

Différents types de rotor
Figure (IV.3)

c) Fonctionnement

Le principe de fonctionnement des pompes centrifuges repose sur le fait de l'accroissement entre l'entrée et la sortie de la roue de l'énergie potentielle et de l'énergie cinétique, donc, de l'énergie mécanique.

L'énergie cinétique est transformée en énergie pression ou énergie potentielle par un ralentissement progressif obtenu dans une pièce placée à l'extérieur de la roue, qui peut être, un diffuseur lisse, un diffuseur à ailettes, un colimaçon ou un volute qui se termine par un cône divergeant qui contribue encore à ralentir la vitesse du fluide en la récupérant sous forme de pression.

L'eau entre par le centre de la roue et sort à la périphérie, décrivant une trajectoire centrifuge d'où le nom donné à ces pompes. [75]

IV.3.1.2 Différents types de pompes centrifuges

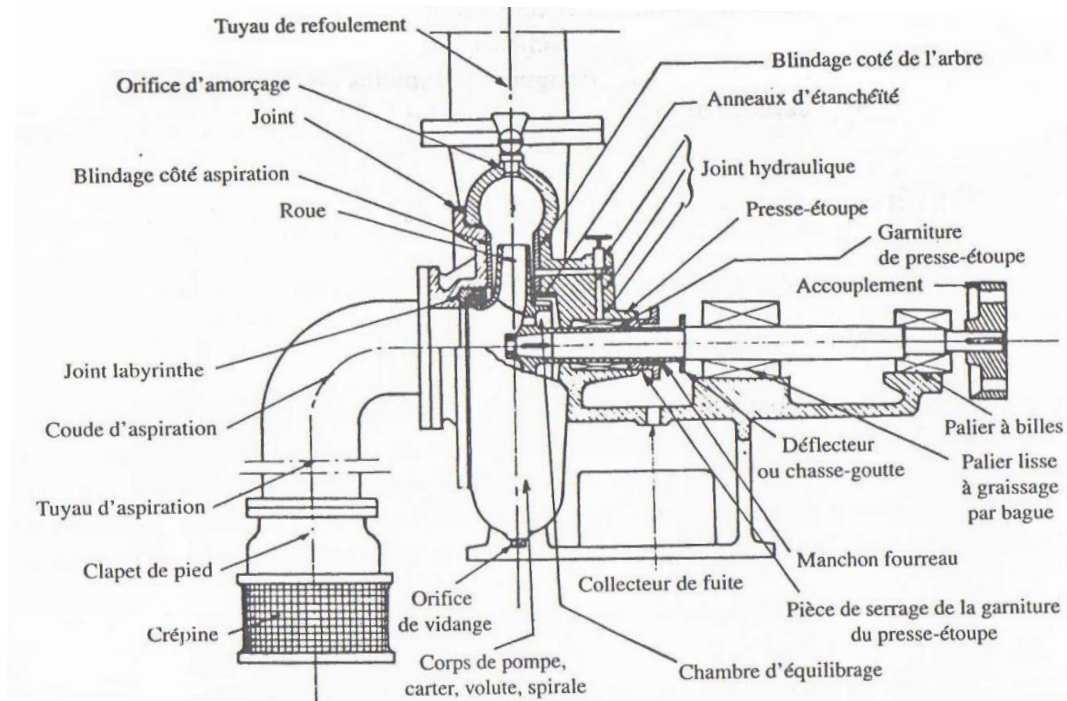
Le classement des types de pompes centrifuges existants se fait suivant le nombre de roues, la forme des aubes de la roue, la direction de l'axe, horizontale ou verticale, la position de la pompe par rapport au niveau de l'aspiration et selon le type d'effluent à pomper. [76]

IV.3.1.2.1 Nombre de roues

IV.3.1.2.1.1 Pompes monocellulaires

Il existe plusieurs dispositions : [71]

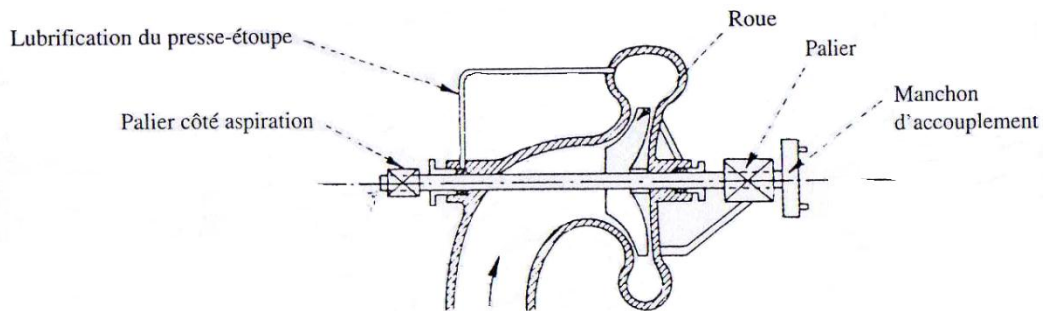
a) Une seule roue avec une seule aspiration (ouïe) dans l'axe de la roue montée en porte à faux :



Pompe centrifuge à un étage et une aspiration à une ouïe « roue en porte-à-faux »
Figure (IV.4)

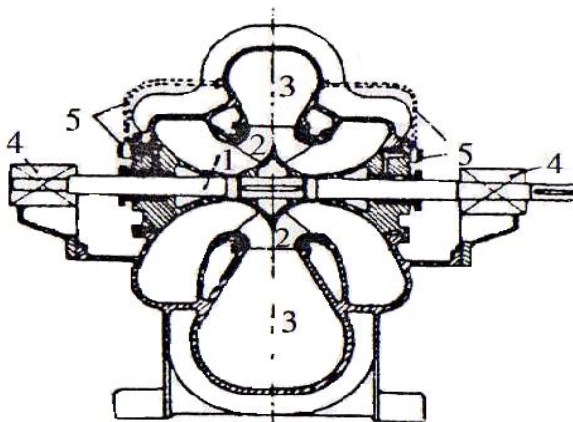
La bonne répartition des filets liquides sur l'ouïe de la roue offre d'excellentes conditions hydrauliques de fonctionnement, mais c'est une disposition qui fatigue les paliers, raison pour laquelle elle n'est adoptée que pour les petites pompes.

b) Une seule roue avec une seule aspiration dans son axe, et, pour améliorer les conditions mécaniques, un deuxième palier est placé du côté de l'aspiration au détriment de la bonne répartition des filets liquides sur l'ouïe de la roue.



Pompe centrifuge à un étage et une aspiration à une ouïe
Figure (IV.5)

c) Deux roues accolées comportant deux ouïes d'entrée, une disposition assez fréquente pour les grosses pompes à gros débit et à hauteur de refoulement relativement faible (100 mètres de colonne d'eau). La roue est supportée par deux paliers extérieurs réalisant ainsi un bon équilibre.



- 1- Arbre
- 2- Roue
- 3- Volute
- 4- Palier
- 5- Tube et raccord d'alimentation des garnitures du presse-étoupe

Pompe centrifuge à deux roues accolées, deux ouïes, joint horizontal
Figure (IV.6)

d) Deux groupes de roues accolées : c'est l'équivalent de quatre pompes monocellulaires couplées en parallèle. La forme des trajectoires des filets liquides cause des pertes par frottement, ce qui diminue le rendement.

IV.3.1.2.1.2 Pompes multicellulaires

La technique consiste à grouper plusieurs roues en série, le refoulement de la première pompe communique avec l'aspiration de la suivante et ainsi de suite. La pression obtenue en

sortie de pompe est le produit entre le nombre de roues supposées identiques et la pression obtenue par une roue, avec un débit identique traversant toutes les roues. [71][77]

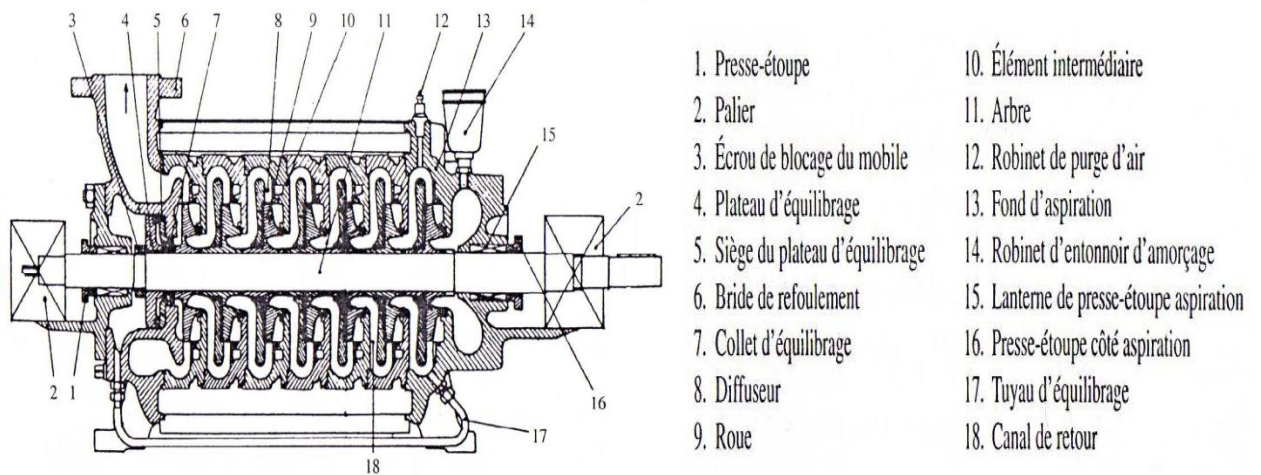
En pratique, deux solutions sont possibles :

a) Pompes en série ou compounds :

Dans le but de réduire les pertes de charge, la conduite de refoulement de la première pompe communique avec l'ouïe de la suivante par une canalisation à faible courbure.

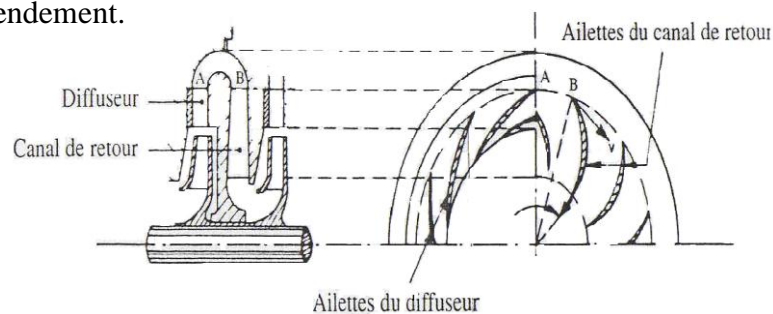
b) Pompes multicellulaires :

Dans ce cas, l'ensemble des roues et des conduites intermédiaires est contenu dans un seul corps sous un volume plus réduit. L'eau qui sort du diffuseur de la première roue est ramenée par un canal de retour à l'œillard de la roue suivante.



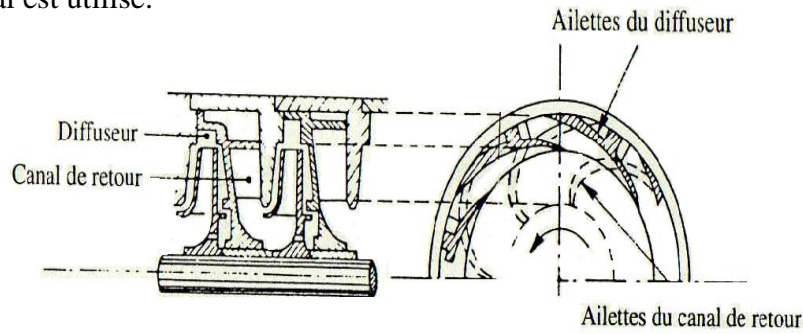
Pompe centrifuge multicellulaire
Figure (IV.7)

Afin de diminuer, progressivement, la vitesse du fluide, donc, augmenter sa pression, les canaux de retour sont, généralement, munis d'ailettes qui permettent, par là même, un changement de direction de la vitesse d'une manière à lui donner une direction radiale à l'entrée de la roue suivante et éviter une pré-rotation à l'entrée de cette roue, ce qui diminue sensiblement le rendement.



Disposition du diffuseur et du canal de retour dans les pompes pour puits profonds
Figure (IV.8)

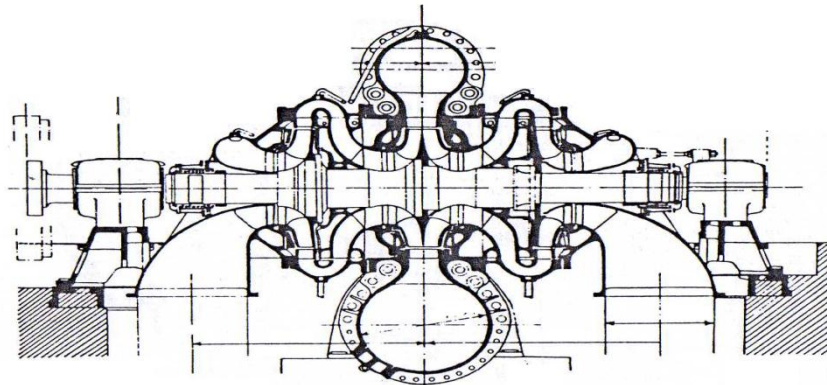
Dans le cas des pompes multicellulaires immergées pour les puits profonds, un diffuseur spécial est utilisé.



Pompe centrifuge à un étage et une aspiration à une ouïe
Figure (IV.9)

IV.3.1.2.1.3 Couplage des roues en série et en parallèle

Pour obtenir de gros débits, les roues sont couplées en parallèle et pour atteindre de grandes hauteurs, elles sont couplées en série, par ces deux modes de couplage, des pompes comportant plusieurs roues clavetées sur le même arbre et fonctionnant en série et en parallèle sont conçues pour subvenir aux besoins de débit et de hauteur. [71]

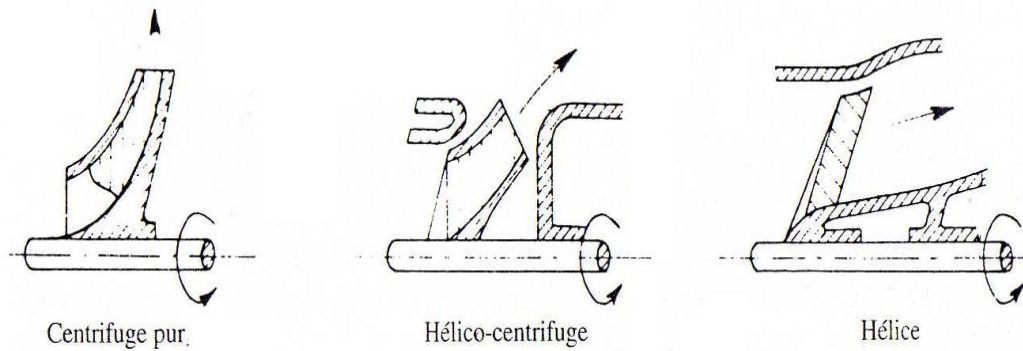


Pompe centrifuge à double aspiration à deux étages de refoulement
Figure (IV.10)

IV.3.1.2.2 Différentes formes des aubes de la roue

Suivant la forme des aubes de la roue, il en résulte : [71][74]

- Pompes du type centrifuge pur** : A la sortie des aubes mobiles, la vitesse de l'eau est dans un plan perpendiculaire à l'axe.
- Pompes hélico-centrifuge** : La vitesse de l'eau à la sortie des aubes est inclinée sur l'axe.
- Pompes hélices ou hélicoïde** : La vitesse de l'eau à la sortie des aubes mobiles est parallèle à l'axe sur une trajectoire hélicoïdale des filets liquides.



Différentes formes des aubes de la roue
Figure (IV.11)

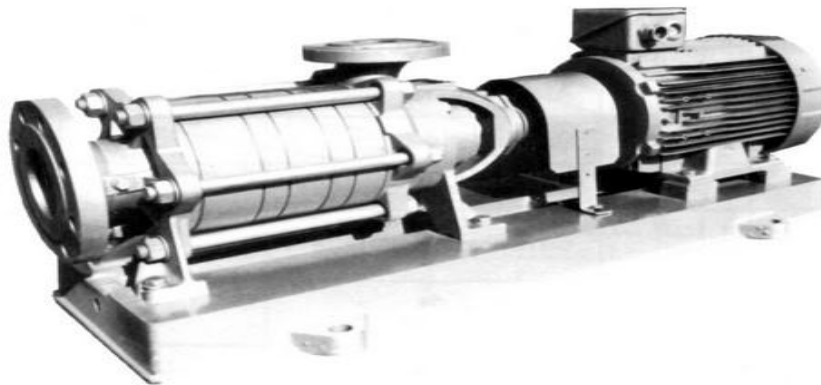
IV.3.1.2.3 Pompes à axe horizontal ou vertical – position de la pompe par rapport au plan d'eau d'aspiration

Les pompes peuvent être à axe horizontal ou à axe vertical et peuvent être placées soit en surface, alors elles sont émergées, ou, en profondeur, alors elles sont immergées. [71]

IV.3.1.2.3.1 Pompe de surface

a) Pompe de surface à axe horizontal

La pompe et le moteur sont raccordés par un accouplement, parfois par un spacer, permettant l'enlèvement de la pompe sans démontage du moteur. [71]



Pompe centrifuge à un étage et une aspiration à une ouïe
Figure (IV.12)

b) Pompe de surface à axe vertical

Pour les mêmes performances que celles à axe horizontal, les pompes à axe vertical sont adoptées lorsqu'un gain d'encombrement au sol est recherché. Dans le cas où la pompe doit être placée en zone inondable, une tringlerie d'entraînement directe ou à cardan offre la possibilité de placer le moteur à sec. [71]



Groupe de pompage de surface multicellulaire à axe vertical
Figure (IV.13)

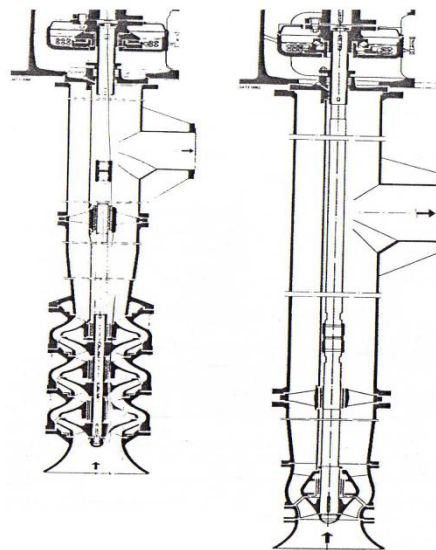
IV.3.1.2.3.2 Pompes immergées

Ces pompes sont conçues spécialement pour l'équipement des puits profonds.

a) Pompe immergée à axe vertical commandée par un moteur placé en surface

La pompe est entraînée par un arbre commun au moteur et qui passe dans l'axe de la canalisation de refoulement. Parfois, l'arbre est contenu dans un fourreau étanche contenant de l'huile ou de l'eau filtrée et le plus souvent, l'arbre tourne à l'intérieur de la canalisation de refoulement. [71]

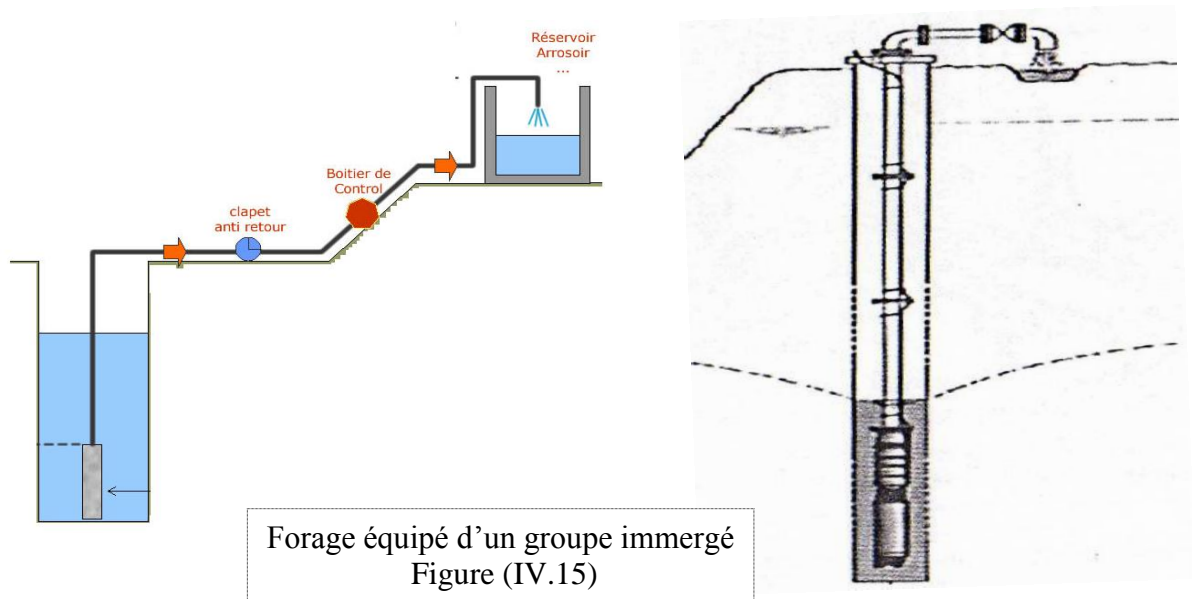
Ce type de pompe présente plusieurs avantages dont la hauteur manométrique d'aspiration diminuée par la suppression des pertes de charge dues aux coudes, encombrement réduit, moteur éloigné de l'ambiance humide de la pompe, visite et entretien très faciles, la pompe étant immergée ce qui écarte le problème d'amorçage, ..., sans oublier la possibilité de pomper des eaux chargées par utilisation des roues hélices ou hélico-centrifuges à faible nombre d'aubes.



Pompe à axe vertical commandée par un moteur placé en surface
Figure (IV.14)

b) Groupe de pompage à moteur immergé

La pompe, généralement multicellulaire, est accouplée directement au moteur placé, le plus souvent, au-dessous de la pompe et l'ensemble est immergé dans le puits de forage. [71]



Tandis que, le stator est placé dans une carcasse étanche, le rotor du moteur, du type cage d'écureuil, tourne dans l'eau. L'entrée du câble électrique dans le moteur demeure un point délicat dans l'étanchéité du groupe. Il faudra éviter une tension d'alimentation insuffisante, surcharges ou toutes autres conditions pénibles de marche à cause du refroidissement difficile du stator. Afin d'éviter ce genre de désagrément, les moteurs sont dotés de chemises de refroidissement créant un passage forcé de l'eau pompée le long du moteur. Quelques précautions s'imposent dans le réglage des temps de rampes d'accélération et de décélération des démarreurs électroniques. [71]

Pour les mêmes caractéristiques de débit et de hauteur (Q-H), le rendement des groupes immergés est plus faible de ceux muni de moteur en surface.

IV.3.1.2.4 Type d'effluent spécifique à pomper

Il existe des pompes conçues spécialement pour des eaux chargées d'assainissement, des eaux pluviales, des eaux industrielles,...

Ce groupe de pompage est dit submersible, car, pouvant travailler en immersion et en émergence partielle. L'installation immergée stationnaire est la mieux adaptée aux postes de relèvement. Le groupe immergé est relié à sa canalisation de refoulement par un accouplement rapide, permettant une mise en place et un démontage automatique à partir de la surface. L'installation en fosse sèche présente l'avantage de pouvoir accéder directement aux groupes de pompage sans relevage intermédiaire. [71]

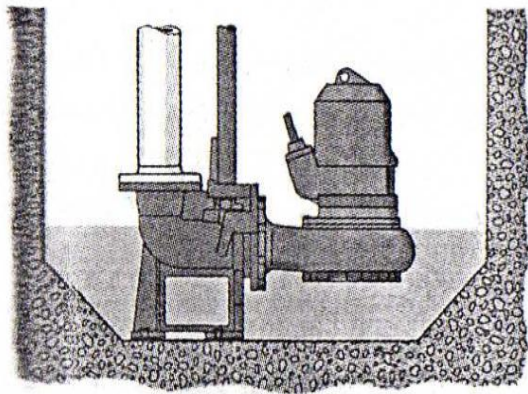


Fig. (a) : Immersée stationnaire

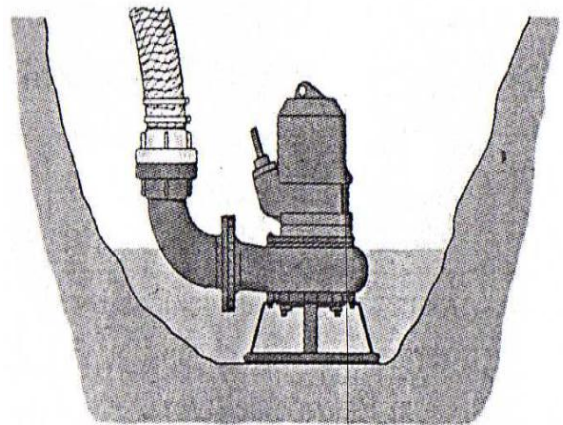


Fig. (b) : Immersée transportable

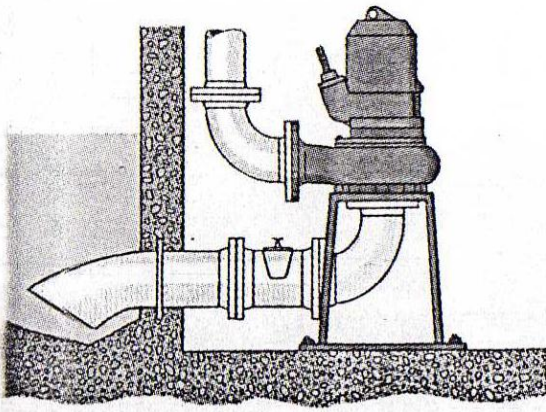


Fig. (c) : Verticale en fosse sèche

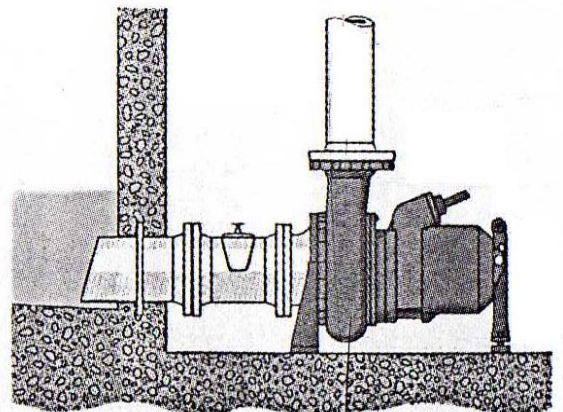


Fig. (d) : Horizontale en fosse sèche

Pompes spéciales pour eaux chargées
Figure (IV.16)

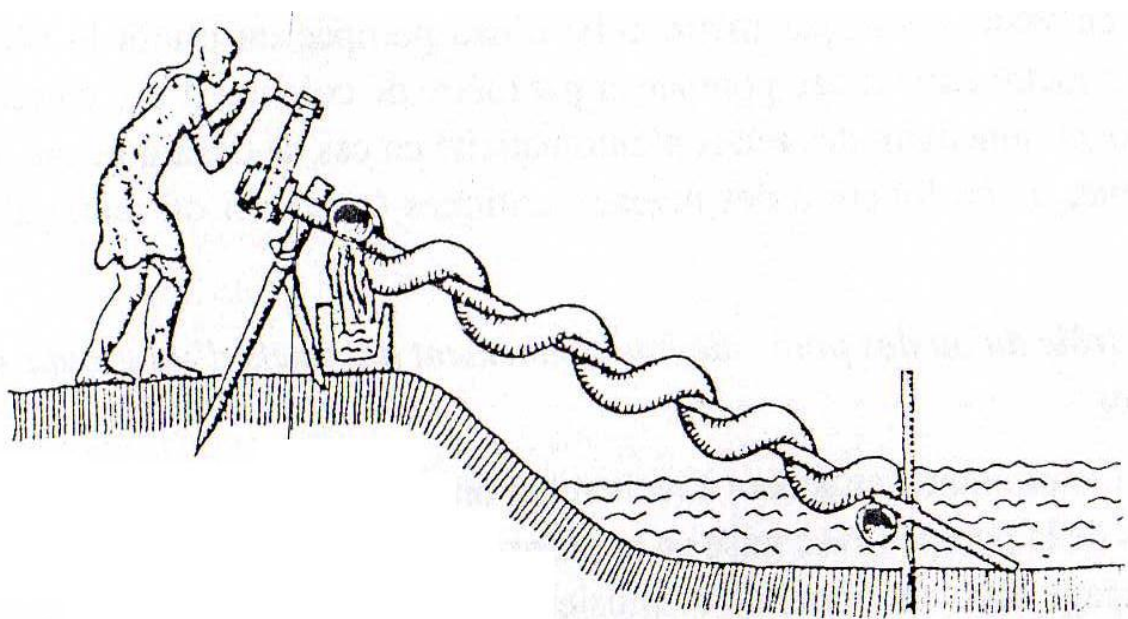
IV.3.2 Autres types de pompes

Dans quelques applications particulières, l'utilisation d'un autre type de machines élévatoires que les pompes centrifuges s'avère nécessaire.

IV.3.2.1 Machines élévatoires simples – vis d'Archimède

Imaginée par Archimède de Syracuse au III^e siècle avant Jésus christ, sans doute la plus ancienne des pompes, cette vis composée de cuir enroulé autour d'un axe équipé, à son extrémité de manivelle. Lorsque la portée inférieure du tuyau est plongée dans l'eau, le mouvement rotatif fait monter l'eau dans le tuyau. [71]

C'est ce même dispositif, valable aujourd'hui encore, qui est utilisé, généralement, en amont des stations d'épuration pour le relevage des effluents d'arrivée, connu sous la dénomination de « Vis d'Archimède ». Ces machines permettent l'élévation jusqu'à 2 m³/s de débit à des hauteurs d'élévation assez faible avec des rendements environnant 65%. [71]

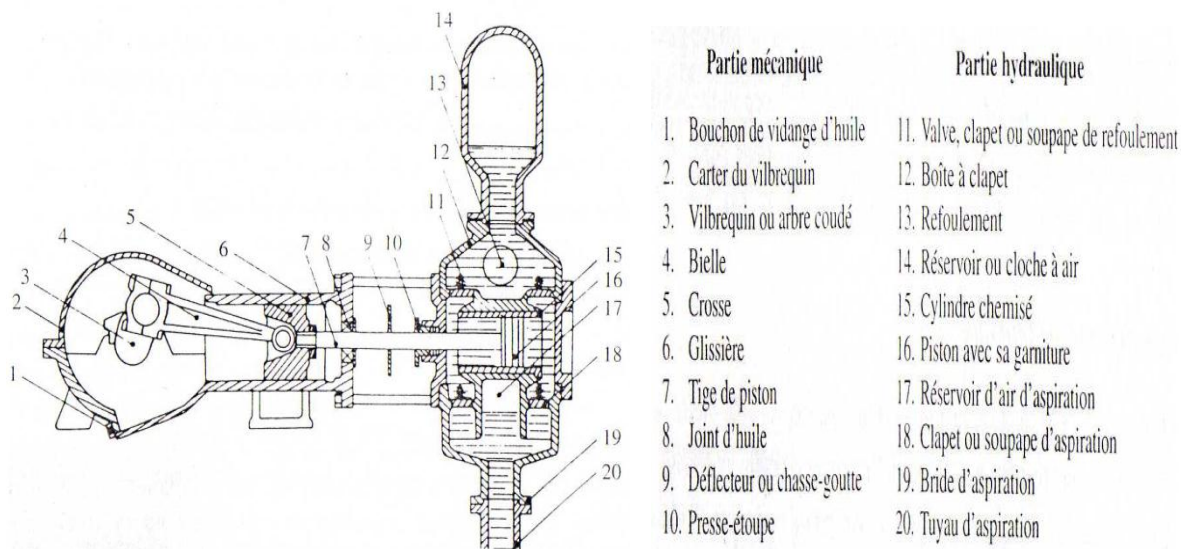


Vis d'Archimède
Figure (IV.17)

IV.2.2 Pompe à piston

Un genre de pompe découvert, vraisemblablement, au cinquième siècle avant l'ère chrétienne où des modifications et des perfections ont permis d'obtenir des rendements de l'ordre de 80 à 90%. [71]

IV.3.2.2.1 Pompe aspirante et foulante



Pompe à piston horizontale à double effet
Figure (IV.18)

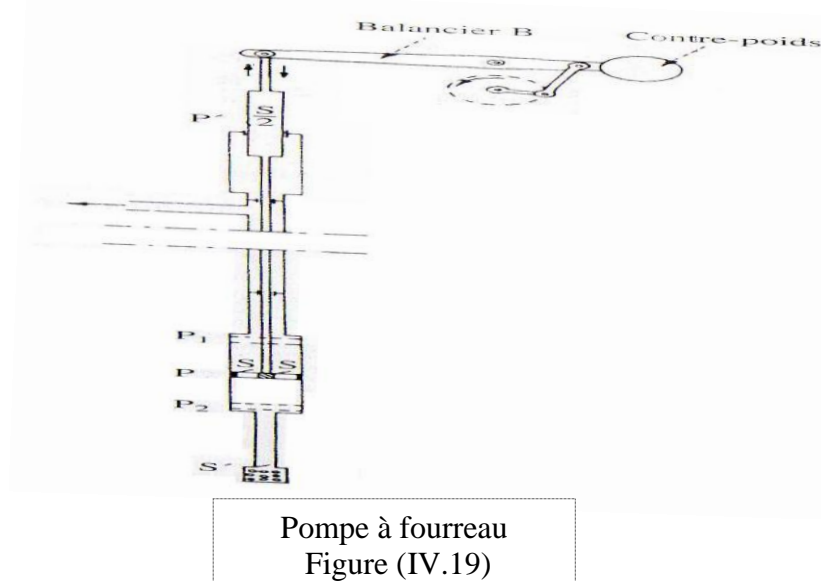
Elle se compose d'un piston entraîné par un système de bielle-manivelle, se déplaçant d'un mouvement rectiligne alternatif à l'intérieur du cylindre constituant le corps de la

pompe. Un système de soupapes ou clapets d'aspiration et de refoulement permet de conserver au liquide la direction convenable et s'oppose au retour du liquide en arrière sous l'influence de la pesanteur et de la pression de refoulement. [71]

La pompe est dite « à simple effet » dans le cas où le liquide n'est admis que d'un seul côté, et dite « à double effet », si le liquide est admis alternativement de chaque côté du piston, ce qui permet une régularisation du débit. [71]

IV.2.2.2 Pompe à fourreau

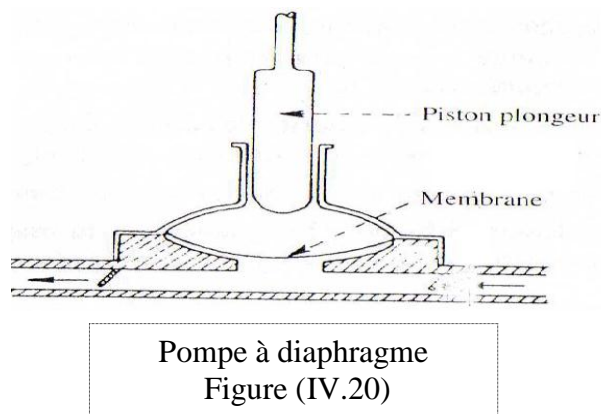
La pompe à fourreau est utilisée sur les puits profonds et forages. Le cylindre à axe vertical est constitué de la canalisation de refoulement où passe la tringlerie dépassant les 100 mètres qui ne travaille qu'à la traction pour éviter le flambement.



Le piston P est percé d'orifices commandés par des soupapes s'ouvrant vers le haut et jouant le rôle de soupapes de refoulement. La partie inférieure est munie de crépine et d'un clapet de pied ou clapet d'aspiration s'ouvrant vers le haut. Le mouvement alternatif de l'ensemble mobile est engendré par un balancier B muni d'un contre poids C. [71]

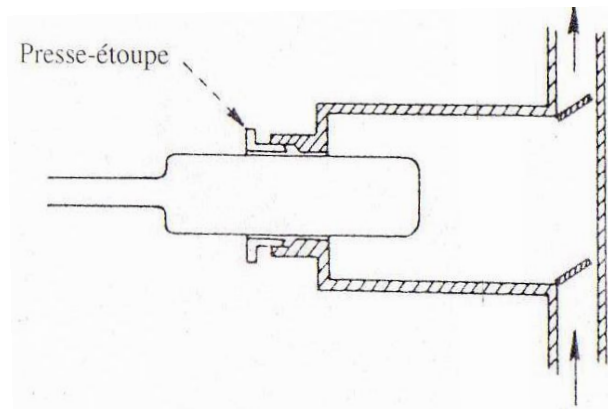
IV.2.2.3 Pompe à diaphragme

Notamment, utilisée pour le pompage des liquides chargés.



IV.2.2.4 Pompe à piston plongeur

C'est une pompe qui réalise de fortes pressions à partir de 30 à 40 bars, utilisée généralement d'épreuve pour essais de canalisation, de presse hydraulique, ...etc. [71]



Pompe à piston plongeur
Figure (IV.21)

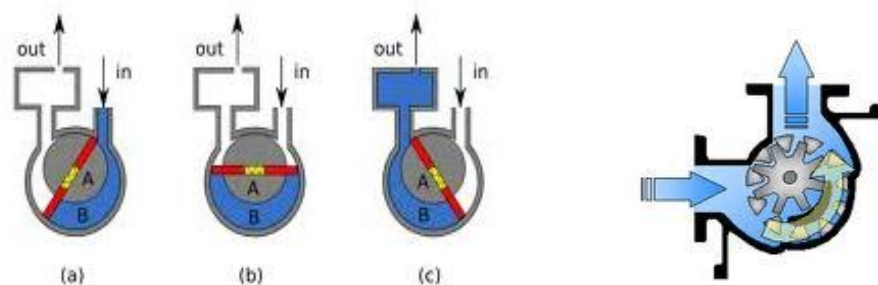
IV.3.2.2.5 utilisations des pompes à piston

La complication mécanique due à la différence, entre la vitesse du moteur et celle de la pompe, le fort couple demandé au démarrage et le risque d'accident sont les raisons principales pour lesquelles l'emploi des pompes à piston se raréfie.

Par contre, pour des débits, relativement, faibles à des hauteurs manométriques importantes, ces pompes sont très avantageées dans le domaine de forage et l'injection des boues à haute pression. [71]

IV.3.2.3 Pompe rotative

Hormis le fait que la variation du volume du corps de cette machine est obtenue par des organes animés par un mouvement circulaire, son principe de fonctionnement est identique à celui des pompes à piston. [71]

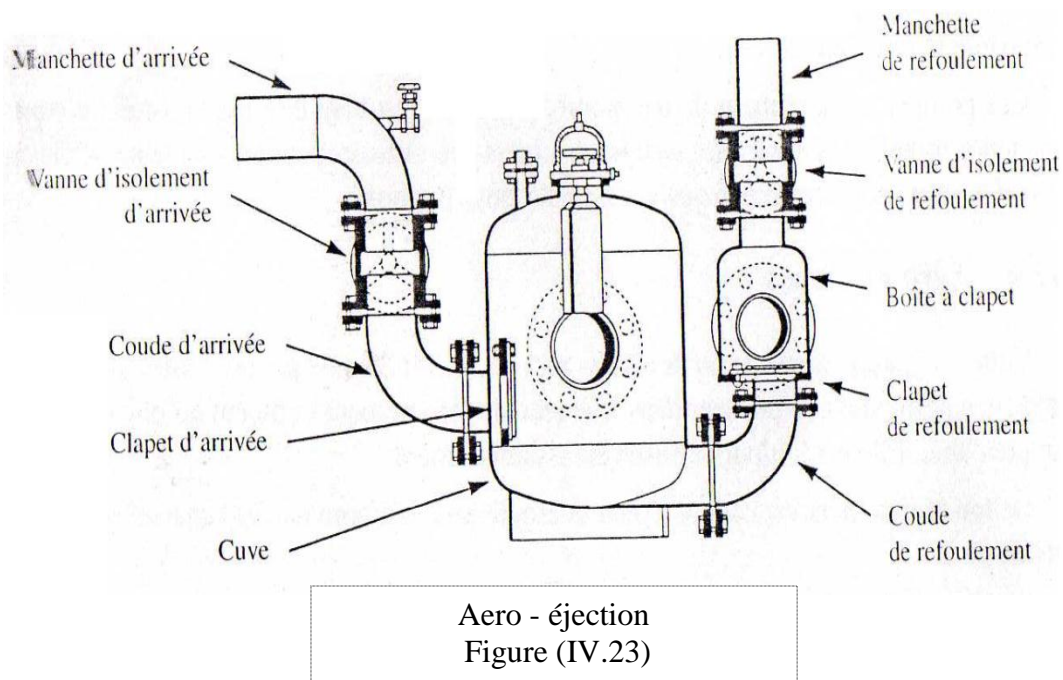


Pompes rotatives
Figure (IV.22)

IV.3.2.4 Aéro-éjecteurs

Utilisée en assainissement, cette technique, apparue au début du XXe siècle, fonctionne par admission d'air dans une cuve permettant de pousser l'effluent dans le réseau de refoulement.

L'appareil se compose d'une cuve équipée d'un clapet d'arrivée, d'un départ de refoulement et d'un détecteur de niveau et atteint un débit nominal d'environ 200 chasses par heure, soit 250 m³/h avec une hauteur manométrique totale pouvant atteindre les 50 mètres de colonne d'eau. [71]



IV.4 Hydraulique de pompage

IV.4.1 Hauteur manométrique totale

Pour véhiculer un liquide d'un endroit à un autre, la pompe doit fournir une certaine pression appelée hauteur manométrique totale, cela dépend des conditions d'aspiration et de refoulement.

La hauteur manométrique est la somme de la hauteur géométrique ou hauteur totale de refoulement située entre le point le plus haut et le point le plus bas du rabattement de la nappe et des pertes de charge dans le tube d'aspiration, la crépine, le clapet, la ou les vannes, ...etc.

$$\text{Hmt} = (\text{H}_a + \text{H}_r) + \text{Jc} + \text{Pr} \quad \dots (\text{IV. 1})$$

Hmt : Hauteur manométrique totale [mce]

H_a : Hauteur d'aspiration

H_r : Hauteur de refoulement

J_c : Perte de charge

P_r : Pression résiduelle [mce] à la sortie du tube de refoulement.

A savoir que plus la hauteur manométrique totale est élevée, plus, le débit fourni par la pompe est faible. [78][79]

IV.4.2 Hauteur d'aspiration

La hauteur d'aspiration dans un réseau de pompage est la cote verticale mesurée entre la surface du réservoir d'aspiration et l'axe de la pompe. Cette hauteur est, directement, liée à la charge hydrostatique.

La hauteur théorique d'aspiration d'une pompe est de 10.33 mètres à la pression atmosphérique au niveau de la mer avec une eau à 0°C de température.

Cette hauteur ne peut être atteinte à cause des phénomènes de cavitation et des diverses pertes dues à la charge dans la tuyauterie, à l'altitude, à la température de l'eau, la viscosité de l'eau et à l'état de la pompe.

La hauteur pratique d'aspiration maximale est située autour des 7 mètres à température ambiante.

Dans le cas où la hauteur maximale est atteinte, il faudra placer une pompe intermédiaire, mettre le réservoir en pression, diminuer la température du fluide,...etc. [80]

IV.4.3 Pertes de charge

Les pertes de charge sont dues aux frottements du liquide contre les parois, plus au moins lisses, de la tuyauterie, aux changements de diamètres, aux courbes, aux accessoires tels que les tés, les vannes, les coudes, ... etc.

Pour le calcul des pertes de charge, la formule de Cole brook est appliquée à tous les fluides, mais, son inconvénient majeur reste la complexité de son expression mathématique, c'est pourquoi quelques formules empiriques équivalentes sont encore en usage.

La formule de Darcy définit la perte de charge d'une canalisation.

$$Jc = \frac{\lambda.V^2}{2.g.D} \quad \dots (IV.2)$$

Avec Jc : perte de charge en mètres de hauteur du fluide circulant dans la conduite par mètre.

λ : coefficient de perte de charge, V : vitesse moyenne du fluide, g : pesanteur, D : diamètre intérieur de la conduite. [81]

IV.4.4 Hauteur totale de pompage

$$H=H_s+H_d \quad \dots(IV.3)$$

Avec H_s : hauteur statique ou la distance entre le niveau statique de l'eau dans le puits jusqu'au point le plus élevé auquel l'eau doit être pompée.

Et H_d : somme des pertes linéaires et des pertes singulières.

a) **Pertes de charge linéaires** [71] [73]

$$\Delta H_1 = \lambda \cdot \frac{Lv^2}{2 \cdot g \cdot D} \quad \text{Avec } v = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

b) **Pertes de charge singulières (locales)** [73]

Les pertes singulières sont dues aux divers changements de section.

$$\Delta H_2 = \varepsilon \cdot \frac{v^2}{2g} = \varepsilon \cdot \frac{8Q^2}{\pi^2 D^2 g} \quad \text{avec } \varepsilon: \text{coefficient de pertes de charges locales.}$$

$$H_d = \Delta H_1 + \Delta H_2 = \left(\lambda \frac{L}{D} + \varepsilon \right) \left(\frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g} \right) = K_{fr} \cdot Q^2 \quad \text{avec } K_{fr} \text{ constante de canalisation.}$$

La hauteur totale de pompage est : $H = H_s + K_{fr} \cdot Q^2 \quad \dots (IV.4)$

Avec $K_{fr} = \frac{8}{g\pi^2 D^4} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{L}{D} + \varepsilon \right) \quad \dots (IV.5)$

IV.4.5 Puissance d'une pompe

La puissance de la pompe se calcule à l'aide du théorème de Bernoulli. L'énergie hydraulique est considérée comme étant la somme de l'énergie cinétique déterminée par le mouvement liquide dans le tube et d'une énergie potentielle stockée, soit sous la forme d'un accroissement de pression, soit sous celle d'une augmentation de hauteur. [82]

La puissance hydraulique fournie par la pompe :

$$P_h = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_{mt} \quad \dots (IV.6)$$

Tel que ρ : masse volumique, g : pesanteur, Q : débit,

H_{mt} : hauteur manométrique totale.

La puissance du moteur nécessaire pour entrainer la partie hydraulique est toujours supérieure à la puissance absorbée par l'arbre, compte tenu des pertes diverses dues à la transmission, d'erreurs de calculs, des pertes de charges produites au niveau de la pompe et du couple de démarrage.

IV.4.6 Charge nette à l'aspiration NPSH

Soit une pompe centrifuge dont l'axe supposé horizontal est à une hauteur h_A au-dessus du plan d'eau à l'aspiration, représentée par la figure (IV.24). [71]

Si P_A est la pression absolue à l'entrée de la roue au point A et V_A la vitesse en ce point et si j_A est la perte de charge totale entre les points C et A d'un filet liquide partant de la surface libre à l'aspiration en C et passant en A, le théorème de Bernoulli appliqué entre les deux points considérés donne:

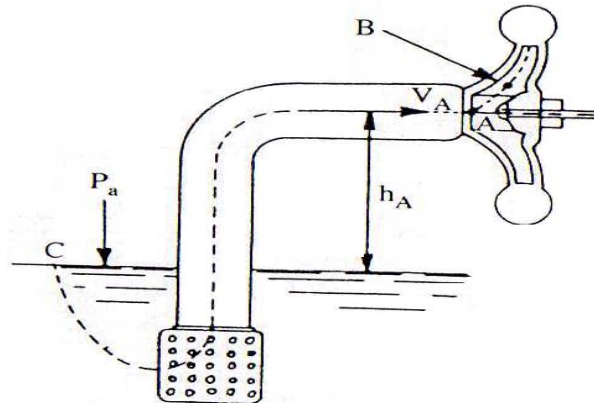
$$\frac{P_a}{\omega} = \frac{P_A}{\omega} + \frac{V_A^2}{2g} + j_A = h_A \Rightarrow \frac{P_a}{\omega} = \frac{P_A}{\omega} - \frac{V_A^2}{2g} - j_A \quad \text{et pour } P_a \text{ et } h_A \text{ données,}$$

avec V_A varie comme Q et j_A varie comme $Q^2 \Rightarrow \frac{P_a}{\omega} = f(Q)$ est une parabole

$$NPSH = \frac{P_A}{\omega} - h_v \quad (IV.7)$$

avec
$$h_v = \frac{P_v}{\omega}$$

Hauteur représentative de la tension de vapeur du liquide pompé à la température considérée.



Cavitation d'une pompe centrifuge
Figure (IV.24)

C'est une expression indépendante de la pompe qui dépend de la longueur et du diamètre de la canalisation d'aspiration, des pertes de charge le long de cette canalisation, de la hauteur géométrique d'aspiration.

IV.4.7 Cavitation

La cavitation est un terme employé pour décrire le phénomène qui se produit dans une pompe quand le NPSH est, insuffisamment, disponible. La pression du liquide est réduite à une valeur égale ou inférieure à sa pression de vapeur là où les petites bulles ou poches de vapeur commencent à se former.

La production de cavités dues à des bulles ou poches de vapeur dans la masse liquide en écoulement est génératrice de chocs très violents et d'abrasions mécaniques rapides et spectaculaires pouvant détruire, très rapidement les organes de la pompe (roue et diffuseur).

Le seul moyen d'empêcher les effets indésirables de la cavitation c'est de s'assurer que le NPSH disponible dans le système est plus élevé que le NPSH requis par la pompe. [71]

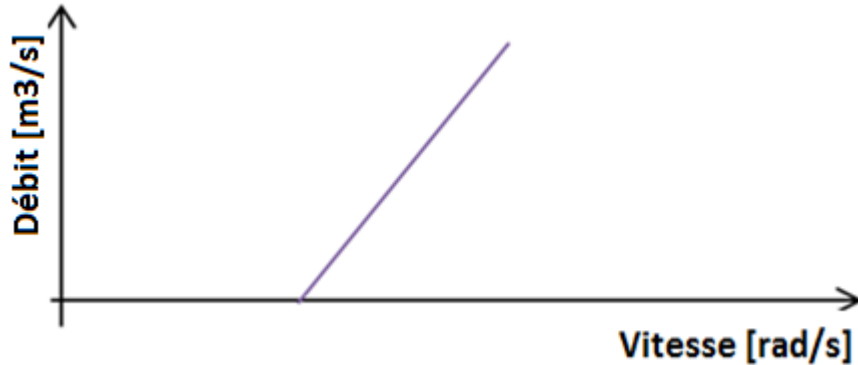


Dégâts de Cavitation sur les éléments d'une pompe centrifuge
Figure (IV.25)

IV.5 Caractéristique de la pompe centrifuge

IV.5.1 Caractéristique « Débit – Vitesse »

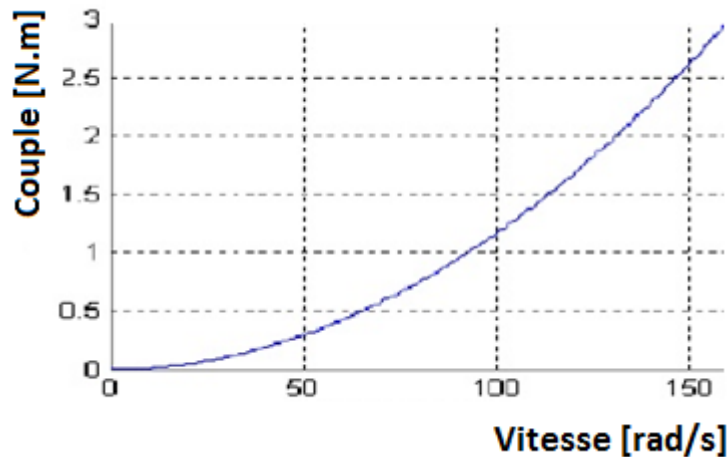
Le débit est proportionnel à la vitesse de rotation du moteur. Toutefois, il faut une vitesse minimale à une Hmt donnée pour obtenir un débit. [83]



Caractéristiques « débits – vitesses » d'une pompe centrifuge
Figure (IV.26)

IV.5.2 Caractéristique « Couple-Vitesse »

Le couple du moteur augmente très rapidement en fonction de la vitesse. La hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur. Le moteur devra, donc, être très rapide pour assurer un bon débit.



Caractéristiques « Couple – Vitesse » d'une pompe centrifuge
Figure (IV.27)

Puisque, le couple de démarrage est limité au couple de frottement de la pompe à vitesse nulle (qui est plus important qu'en rotation), la pompe requiert une vitesse minimale à une Hmt donnée, pour obtenir un débit de départ non nul. [83][84]

Donc, la pompe centrifuge oppose un couple résistant C_r , avec C_s représentant le couple statique, très petit et K_r le coefficient de proportionnalité $[(Nm/rad.s^{-1})^2]$ tel que BRAUNSTEIN et KORNFELD l'ont introduit en 1981: [71]

$$\begin{cases} C_r = K_r \cdot \omega^2 + C_s \\ P_{mec} = K_r \cdot \omega^3 \end{cases} \quad \dots (IV.8)$$

IV.5.3 Caractéristique « Débit-Hauteur »

Les constructeurs fournissent les courbes $Q(Hmt)$ maximale et minimale correspondant aux diamètres maximaux et minimaux possibles de la roue. [85][86]

Si la charge est une pompe monocellulaire à roue radiale, elle est caractérisée par un modèle qui sert à déterminer la dépendance de la charge hydraulique appliquée sur le fluide par la roue à aubes Hmt [mètre] en fonction du débit Q [m³/s].

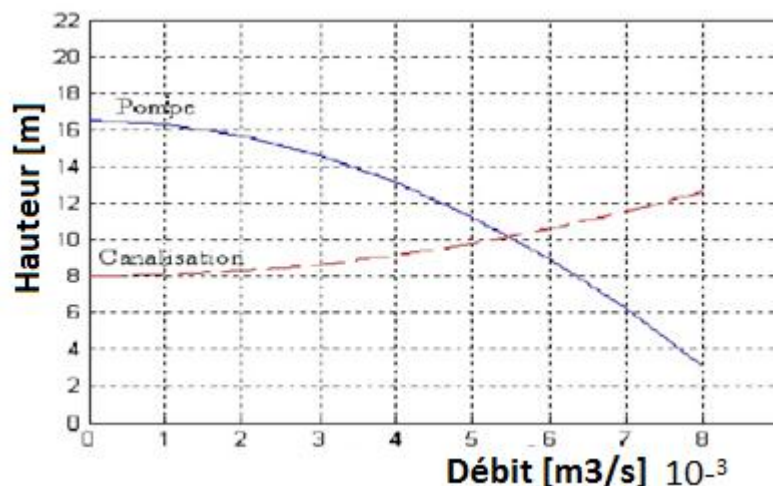
Le modèle utilisé est identifié par l'expression de la hauteur manométrique totale qui est donnée par le modèle de PELEIDER-PETERMAN:[87]

$$Hmt = K_0 \cdot \omega^2 + K_1 \cdot \omega \cdot Q - K_2 \cdot Q^2 \quad \dots (IV.9)$$

Où K_0 , K_1 et K_2 : des constantes propres de la pompe liées à sa géométrie et qui sont fournies par le constructeur.

ω : vitesse [rad/s], Hmt : hauteur manométrique totale [mètre].

Q : débit [l/min].



Caractéristiques « Hmt – Débit » d'une pompe centrifuge
Figure (IV.28)

La courbe $Hmt(Q)$ est une parabole où le point d'intersection avec l'axe des ordonnées est le point à débit nul. C'est le point dit de « barbotage » où les vannes sont fermées. [85][86]

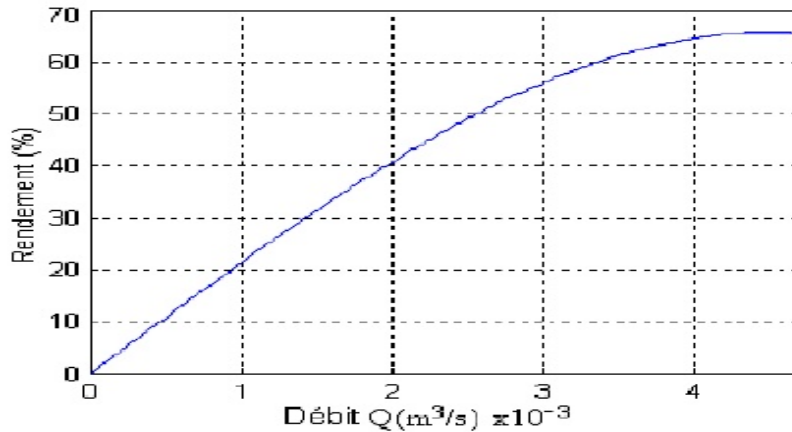
IV.5.4 Caractéristique de rendement de la pompe

Même si, les fabricants donnent, généralement, la courbe du rendement hydraulique, il est possible de la tracer en utilisant la formule suivante : [88]

$$\eta_H = \frac{P_h}{P_{ab}} \quad \dots\dots(IV.10)$$

Avec $P_h = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_{mt} \quad \dots\dots\dots(IV.11)$

Tel que ρ : masse volumique, g : pesanteur, Q : débit, H_{mt} : hauteur manométrique totale et P_{ab} : puissance absorbée par le moteur.



Caractéristiques de rendement d'une pompe centrifuge
Figure (IV.29)

Généralement le rendement maximal du groupe motopompe ne dépasse pas 72%.

IV.5.5 Utilisation des lois de similitude

Une pompe centrifuge fonctionne rarement à régime constant, il se produit, généralement, des variations de régime dues aux nécessités d'exploitation.

Pour une pompe donnée, si une caractéristique $H_{eff}=f(Q)$, $H_n=f(Q)$, $P=f(Q)$ ou $\eta=f(Q)$ est connue à vitesse « N » constante, alors, il est facile d'en déduire toutes les autres caractéristiques correspondantes de la pompe et de toutes les pompes semblables.

La pompe peut conserver un excellent rendement, en fournissant un débit et une hauteur différents, à condition, de modifier sa vitesse de rotation.

Par la caractéristique $H=f(Q)$ à une vitesse donnée et un diamètre de la roue D, il est possible de déterminer les dimensions d'une pompe semblable devant réaliser un débit Q1 sous une pression H1 en tournant à une vitesse N1.

Les lois de similitude permettent de déterminer les performances de débit, de hauteur manométrique totale et de puissance dans le cas où la vitesse de rotation de la pompe passe d'une valeur N1 à une valeur N2 de la manière suivante : [89]

Débit $Q_2 = Q_1 \frac{N_2}{N_1}$... (IV.12)

Puissance du moteur $P_2 = P_1 \cdot \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3$... (IV.13)

Hauteur manométrique totale $H_2 = H_1 \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2$... (IV.14)

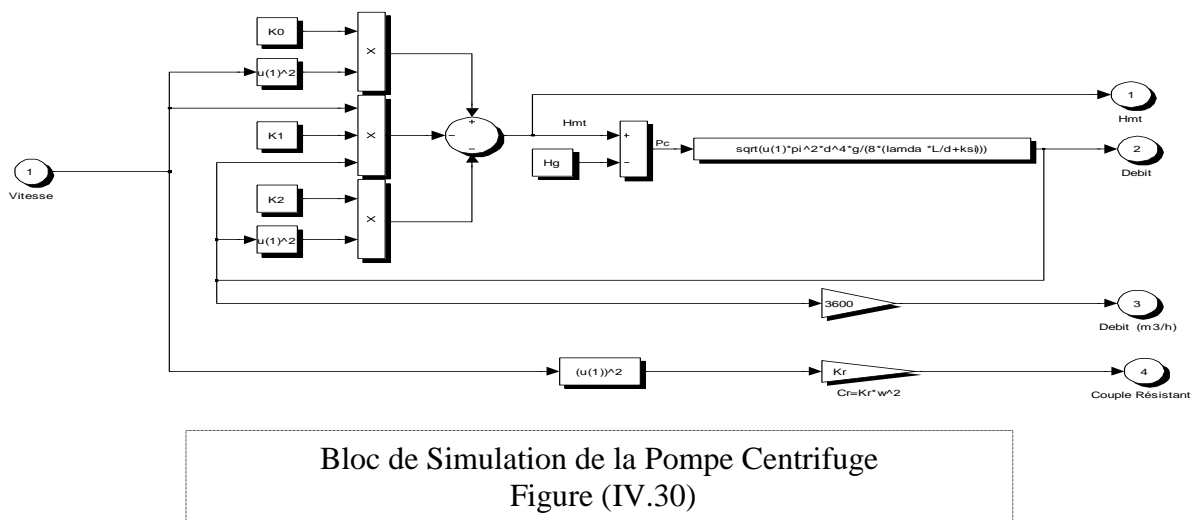
Ces lois de similitude, dont les utilisateurs de ces pompes centrifuges peuvent s'enorgueillir, laissent les différentes applications souples et flexibles aux divers emplois.

IV.6 Application de la MASDE au Pompage

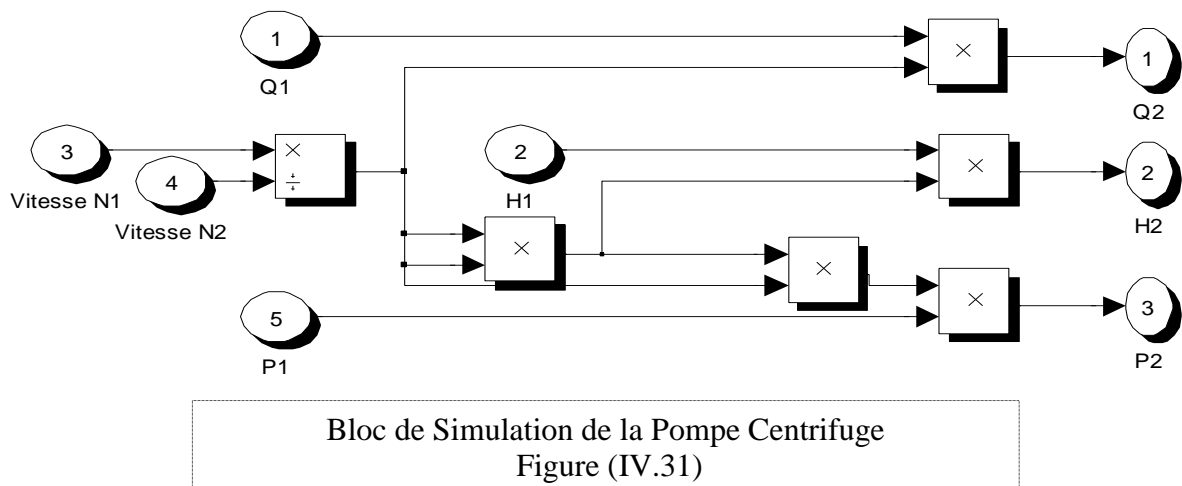
IV.6.1 Modélisation de la pompe centrifuge

Des équations données (IV.1), (IV.3), (IV.4), (IV.5), (IV.8), (IV.9), (IV.12), (IV.13) et (IV.14), la pompe centrifuge est modélisée, pour pouvoir ainsi suivre l'évolution des différents paramètres caractérisant la pompe.

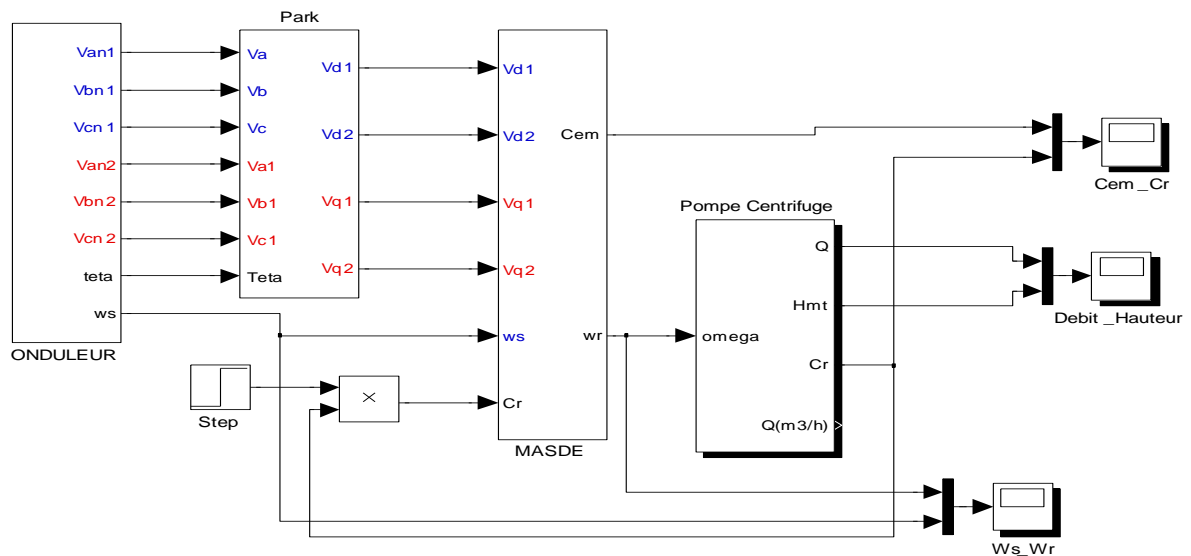
IV.6.1.1 bloc de simulation de la pompe centrifuge



IV.6.1.2 Lois de similitude



IV.6.2 Bloc de simulation globale de la MASDE- Pompe centrifuge



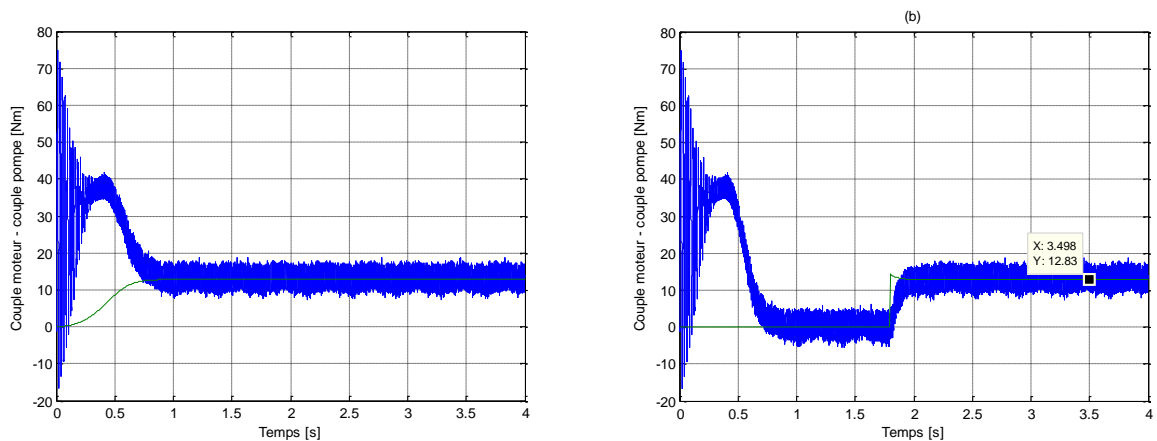
Bloc de simulation global de la MASDE couplée à la Pompe Centrifuge
Figure (IV.32)

IV.6.3 Simulation numérique et interprétation des résultats

Pour certaines caractéristiques, Il est judicieux d'effectuer deux simulations, la première consiste à coupler directement à $t=0$, la pompe au moteur, dont les courbes sont notées par l'indice (a), puis la deuxième indicée (b), où, la pompe est connectée après le démarrage du moteur avec une sorte d'embrayage à $t=1.8s$.

IV.6.3.1 Couple du moteur – Couple résistant

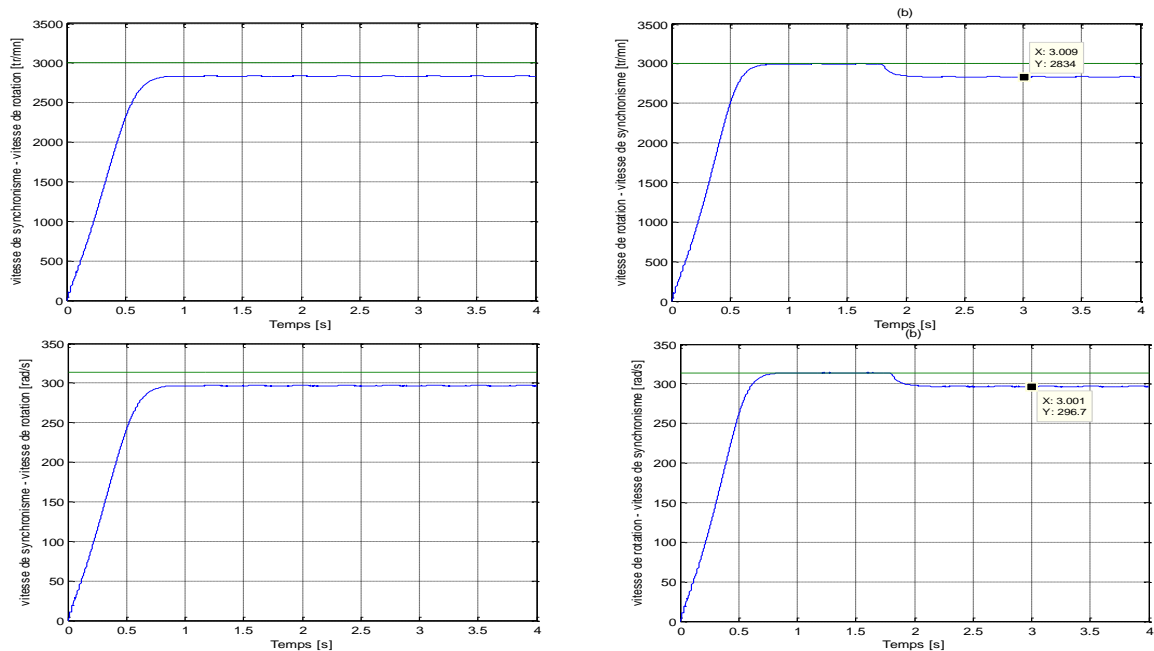
Après le démarrage du moteur, le couple oscille autour d'une valeur de 40 Nm avant que le couple résistant, qui est proportionnel au carré de la vitesse de rotation, se coïncide autour d'une valeur de 12.83 Nm après un laps de temps de « 0.8s ».



Couple moteur – couple pompe
Figure (IV.33)

Dans le cas où la charge est connectée à $t=1.8s$, le couple de la pompe et celui du moteur, prennent soudainement des valeurs oscillantes autour de « 12.83 Nm ».

IV.6.3.2 Vitesse de synchronisme – vitesse de rotation

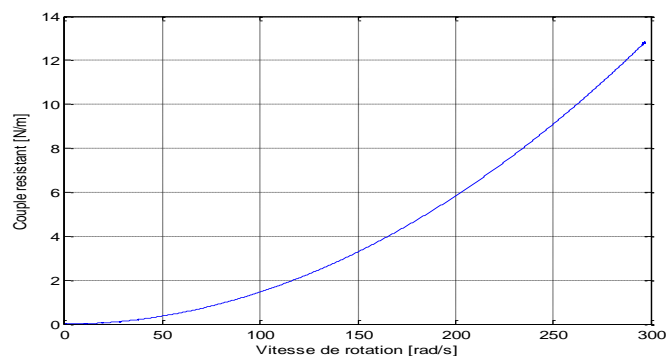


Vitesse de synchronisme – vitesse de rotation
Figure (IV.34)

Les figures (IV.354) représentent les allures de la vitesse de rotation et de la vitesse de synchronisme, en [tr/mn] et en [rad/s]. La vitesse de rotation de la pompe est de 297 rad/s correspondant à 2836 tr/mn.

IV.6.3.3 Caractéristique « Couple – Vitesse de rotation »

Le couple augmente très rapidement en fonction de la vitesse de rotation du moteur.



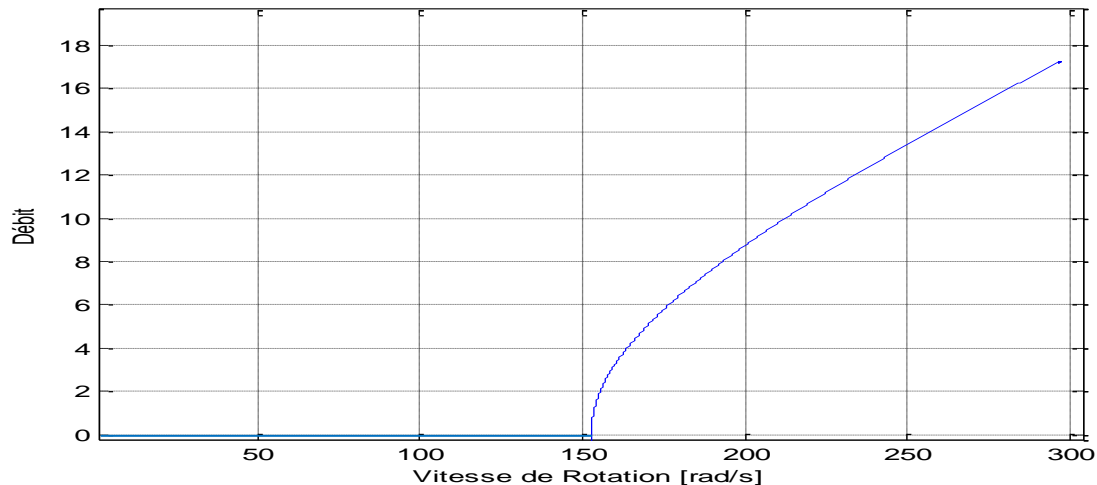
Caractéristique « Couple-Vitesse de rotation »
Figure (IV.35)

L'allure de la figure (IV.35), montre l'évolution du couple en fonction de la vitesse de rotation.

IV.6.3.4 la caractéristique « Débit – Vitesse de rotation »

La pompe doit être entraînée à une certaine vitesse pour quelle puisse fournir un débit.

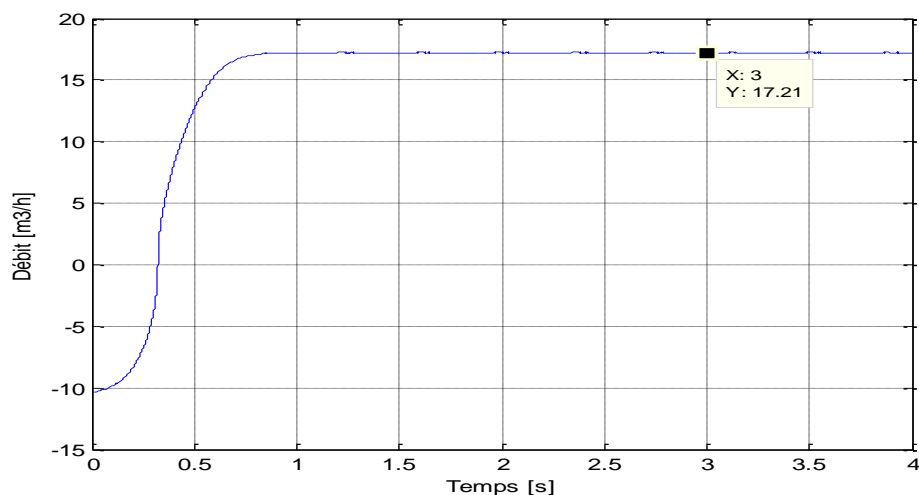
En effet, avant d'atteindre ce niveau de célérité, soit une valeur de 150 rad/s, la tuyauterie de la pompe ne fournit aucun débit, ensuite, le débit augmente avec l'élévation de la vitesse de rotation.



Caractéristique « Débit-Vitesse de rotation »
Figure (IV.36)

Le moteur atteint la vitesse de 150 rad/s en 0,3 seconde, un temps suffisant pour remplir la tuyauterie de refoulement.

IV.6.3.5 Evolution du Débit

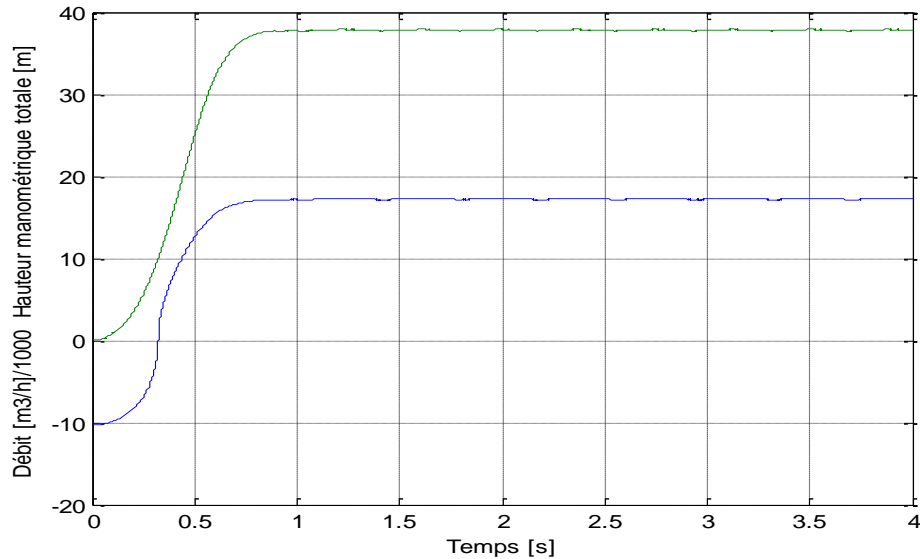


Caractéristique du Débit
Figure (IV.37)

Le débit varie, proportionnellement, à la vitesse de rotation du moteur et au bout « 0,7 seconde », le débit augmente et atteint « $17,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ».

IV.6.3.6 caractéristique « Débit – Hauteur manométrique totale »

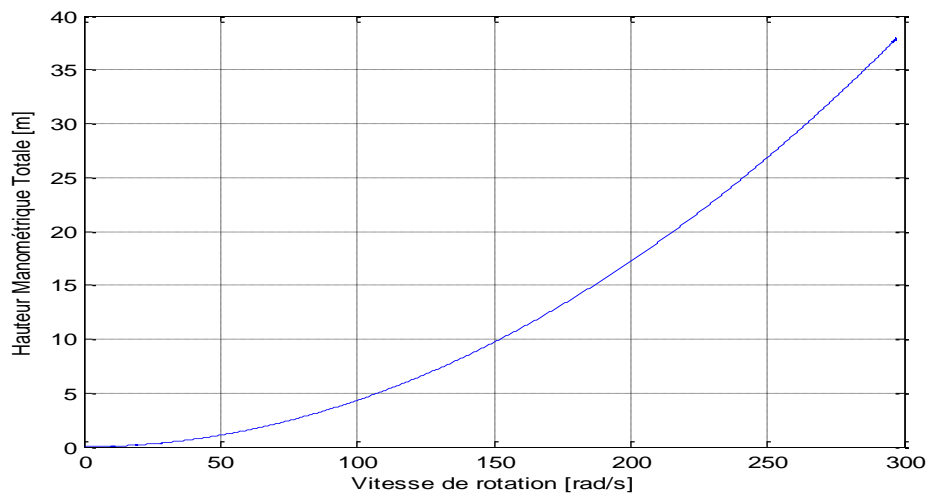
Le débit évolue de la même manière que l'évolution de la hauteur manométrique totale, et qui est semblable à l'allure de la vitesse de rotation.



Caractéristique « Débit – Hauteur manométrique totale »

Figure (IV.38)

IV.6.3.7 « Hauteur manométrique totale – Vitesse de rotation »



Caractéristique « Hauteur manométrique totale – Vitesse de rotation »

Figure (IV.39)

La hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur qui devra être très rapide pour assurer un bon débit. La puissance consommée est proportionnelle au débit et à la hauteur manométrique.

IV.7 Dimensionnement pratique de la pompe centrifuge

La pompe, donc, est un générateur de débit où la pression ne naît que s'il y a une résistance à l'écoulement. En pratique, les hydrauliciens « se facilitent » le travail, en usant de formules simples proches de la théorie, ainsi, avec deux paramètres, le débit Q [m^3/h] et la hauteur manométrique totale H [mce], peuvent caractériser le système de pompage.

IV.7.1 Puissance de la pompe

La puissance de la pompe se calcule à l'aide du théorème de Bernoulli. Pour simplifier au maximum tous ces calculs, les praticiens utilisent la formule suivante :

$$P = \frac{Q.Hmt}{367.\eta} \quad \text{Avec } P \text{ [Watts]} \text{ et un correcteur d'unité d'une valeur de « 367 ».}$$

IV.7.2 Vitesse de l'eau dans les tuyauteries

Pour limiter les pertes de charges et pouvoir diminuer les dépenses d'énergies, il est recommandé de ne pas dépasser la vitesse de circulation de l'eau dans la tuyauterie de 0.5m/s. Pour cela, des tubes de plus gros diamètre sont nécessaires et les formules suivantes permettent un calcul simple du diamètre convenant au débit et de la vitesse d'écoulement.

$$\underline{\text{Diamètre}} : d = 25.Q \quad , \quad \underline{\text{Vitesse}} : V=350.Q/d^2 \quad V \text{ [m/s], } d \text{ [mm]} \text{ et } Q \text{ [m}^3\text{/h].}$$

IV.7.3 Hauteur nette d'amorçage

Il est aussi indispensable de vérifier un autre paramètre pour que la pompe puisse fonctionner normalement. Le paramètre en question est la hauteur nette d'amorçage de la pompe « NPSHa » disponible qui doit être plus grand que celle donnée par le constructeur « NPSHr » d'au moins 0.6 mètre. $NPSHa - NPSHr \geq 0.6 \text{ mètre}$

IV.8 Avantages et inconvénients des pompes centrifuges

Quelques avantages et inconvénients de ce genre de machines peuvent être énumérés, en vue d'encourager ou de dissuader leurs utilisations, tels que : [74][90][91]

IV.8.1 Avantages

- Construction simple en général, une seule pièce en mouvement « le rotor »
- Prix peu élevé
- Encombrement réduit
- Entretien, en général, peu coûteux
- Peu d'influence de l'usure ou de la corrosion sur les caractéristiques

- Grande flexibilité d'utilisation
- Ajustement automatique du débit à la pression
- Puissance absorbée limitée
- ... etc.
-

IV.8.2 Inconvénients

- Limitation de la viscosité
- Débit légèrement instable dans les basses valeurs

IV.9 Domaines d'utilisation

Les pompes centrifuges sont utilisées pour les gros débits et les profondeurs faibles ou moyennes de 10 à 100 mètres. Elles admettent des suspensions chargées de solides et sont les plus utilisées dans le domaine industriel, néanmoins, il existe des applications pour lesquelles elles ne conviennent pas, comme pour les liquides visqueux et les liquides "susceptibles", comme le vin, le lait et la bière, ne supportant pas la très forte agitation, ou, encore moins, comme pompe doseuse où les pompes volumétriques font très bien l'affaire. [92][93].

Les pompes centrifuges ont un domaine d'application très vaste, entre autres, dans des installations d'arrosage, de nettoyage de réservoirs, de transvasement et la circulation de l'eau dans l'horticulture et l'industrie ou encore pour le remplissage et le vidage de conduites et bassins de stockage. La pompe industrielle et agricole trouve, aussi, son intérêt en adduction d'eau, en la circulation d'eau chaude ou d'eau froide, en remplissage de citernes et en irrigation. Ainsi dans les domaines suivants, quelques applications sont citées [94]

Bâtiment et travaux publics

- Pompage temporaire d'eaux usées en dérivation
- Nettoyage et assèchement de regards dans divers réseaux
- Lutte contre les inondations et assèchement
- Epuisement d'eau de mer sur les chantiers de construction de ponts et de ports
- Epuisement d'eau à l'intérieur de tunnels ou sur chantier

Mines

- Système d'épuisement et d'exhaure
- Pompage de boue
- Station de pompage principale
- Pompage de liquides/boues de nature nocive dans la station d'épuration

Assainissement

- Station de pompage d'eaux d'égout
- Homogénéisation dans un bassin de stockage de boues
- Recirculation de boues Digérées
- Pompage de boues
- Stockage d'eaux usées dans un bassin de rétention
- Station de relevage vers une installation d'épuration

Industrie

- Traitement des eaux blanches dans l'industrie papetière
- Evacuation de l'eau
- Evacuation de cendres
- Station de puisage d'eau brute
- Pompage de lisier
- Station de puisage pour l'irrigation

IV.10 Conclusion

Ce chapitre est dédié à une application « le pompage des fluides », et pas des moindres, une application au large et vaste domaine d'application.

Outre la classification classique de ces machines et des différents types de pompes, la pompe centrifuge est la plus utilisée, ce qui favorise, sérieusement, l'étude de son comportement par l'analyse des diverses caractéristiques.

L'utilisation du logiciel « MATLAB Simulink » permet le suivi du comportement de la pompe sans qu'une utilisation réelle du matériel au laboratoire ne soit nécessaire.

La pompe peut conserver un excellent rendement, en fournissant un débit et une hauteur différents, à condition de modifier sa vitesse de rotation et les lois de similitude permettent la déduction des nouvelles performances de la pompe ou d'une autre pompe.

En pratique, les hydrauliciens utilisent des notions plus simples pour dimensionner les systèmes de pompage.

CHAPITRE V

LE SYSTÈME

DE

POMPAGE

PHOTOVOLTAÏQUE

CHAPITRE V

LE SYSTÈME DE POMPAGE

PHOTOVOLTAÏQUE

- 1 Introduction
- 2 L'énergie du soleil
- 3 Le système photovoltaïque
 - 3.1 La cellule photovoltaïque
 - 3.2 Caractéristique d'une cellule photovoltaïque
 - 3.3 Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque
 - 3.3.1 Courant de court-circuit
 - 3.3.2 Tension de circuit ouvert
 - 3.3.3 Facteur de forme
 - 3.3.4 Le rendement
 - 3.4 Modélisation du générateur photovoltaïque
 - 3.4.1 Cellule idéale
 - 3.4.2 Modèle explicite
 - 3.4.3 Modèle à une diode
 - 3.4.4 Modèle à deux diodes
 - 3.5 Association des cellules photovoltaïques
 - 3.5.1 Association en série des cellules photovoltaïques
 - 3.5.2 Association en Parallèle des cellules photovoltaïques
 - 3.5.3 Association hybride des cellules photovoltaïques
 - 3.5.4 Cas de défaillance d'une ou plusieurs cellules
 - 3.5.4.1 Phénomènes de hot spot sur les cellules ombragées
 - 3.5.4.2 Cas de couplage en parallèle
- 4 Générateur photovoltaïque
- 5 Composants d'un système de pompage photovoltaïque
 - 5.1 Modélisation du générateur photovoltaïque
 - 5.2 Convertisseur à pilotage MPPT
 - 5.2.1 Généralités et définition
 - 5.2.2 Modélisation du hacheur Buck-Boost
 - 5.2.3 Modélisation du filtre
 - 5.3 Dimensionnement d'une pompe photovoltaïque
 - 5.3.1 Données de base d'une pompe

5.3.2 Dimensionnement de la pompe

5.3.3 Application

6 Simulation numérique et interprétation des résultats

6.1 Bloc de simulation sous Matlab Simulink

6.2 Ensoleillement

6.3 Association des panneaux photovoltaïques

6.3.1 Mise en parallèle de deux branches ayant 18 panneaux en série

6.3.1.1 Couple électromagnétique

6.3.1.2 Vitesse de rotation

6.3.1.3 Caractéristique « Couple –Vitesse de rotation »

6.3.1.4 Caractéristique « Débit – Vitesse de rotation »

6.3.1.5 Evolution du « Débit » et de la « Hauteur Manométrique Totale »

6.3.1.6 Hauteur manométrique totale – Vitesse de rotation :

6.3.2 Mise en parallèle de trois branches possédant 12 panneaux en série

6.3.2.1 Couple électromagnétique

6.3.2.2 Vitesse de rotation

6.3.2.3 Caractéristique « Couple –Vitesse »

6.3.2.4 Caractéristique « Débit – Vitesse »

6.3.2.5 Evolution du « Débit » et de la « Hauteur Manométrique Totale»

6.3.2.6 Hauteur manométrique totale – Vitesse de rotation

6.3.3 Discussions des résultats

7 Avantages et inconvénients

7.1 Avantages

7.2 Inconvénients

8 Domaines d'applications

9 Conclusion

CHAPITRE V

LE SYSTÈME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE

V.1 Introduction

Le besoin continu de l'humanité à assurer sa survie sur la planète bleue, la pousse sans relâche à redoubler d'efforts dans la recherche de nouvelles sources d'énergie.

Après l'utilisation des combustibles fossiles, du pétrole et du nucléaire dans la production d'énergie électrique, de nouveaux procédés, moins polluants, ont vu le jour, par l'adoption de l'énergie thermique, la géothermie, la marémotrice, la biomasse, la cogénération, l'éolienne, et le solaire. [95][96]

Silencieuse et discrète, avec une facilité remarquable de se fondre aux façades et toitures des bâtisses, l'électricité générée par l'effet photovoltaïque demeure, parmi les autres procédés existants, l'énergie renouvelable par excellence.

Avec une durée de vie d'environ 25 ans, l'utilisation du photovoltaïque est favorisée dans les applications spatiales, l'éclairage, les télécommunications, la réfrigération et le pompage dans les zones rurales et les sites isolés qui sont dépourvus d'approvisionnement en énergie électrique conventionnelle, ce qui provoque un handicap certain. [97]

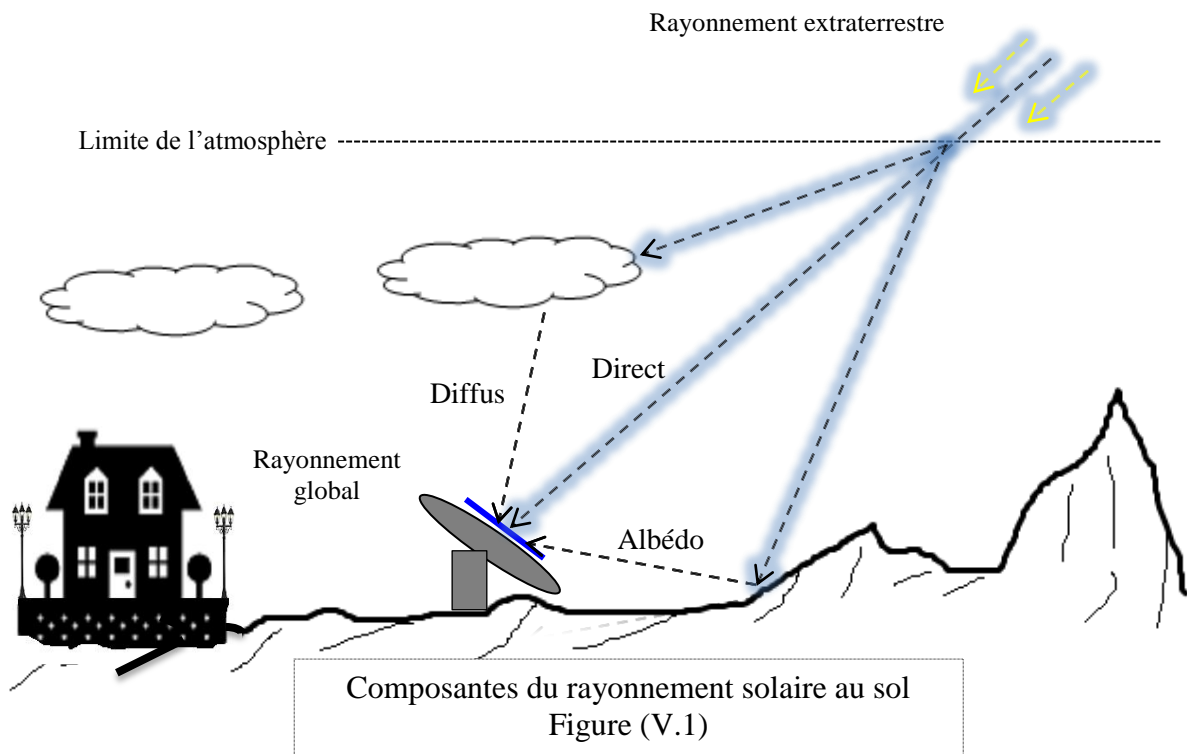
Avec un bon rendement, une fiabilité excellente et une autonomie de fonctionnement, le «pompage photovoltaïque» est l'une des applications les plus répandues dans le monde qui consiste à faire fonctionner une motopompe avec une source de génération photovoltaïque, utilisée, généralement, pour le pompage de l'eau sanitaire, de l'eau pour les camps et les campings, l'irrigation, l'alimentation en eau potable pour les villages et les bases de vie et l'abreuvement du bétail. [96]

V.2 L'énergie du soleil

Le soleil est un astre d'une grande importance pour l'homme, et, grâce à la quantité énorme d'énergie qu'il dégage, environ 386 millions de mégawatts par seconde, la vie sur terre est possible par l'apport d'énergie thermique et de lumière, permettant la présence d'eau à l'état liquide et la photosynthèse des végétaux.

L'atmosphère terrestre reçoit un rayonnement électromagnétique émis par le soleil d'une puissance moyenne de « $1.37 \pm 3\% \text{ kW/m}^2$ » et en absorbe une partie, de manière que

la quantité d'énergie arrivant sur terre dépasse rarement $1,2 \text{ kW/m}^2$. Comme la surface de la Terre est arrondie, la quantité de rayonnement solaire incident n'est pas la même, partout, les tropiques recevant le plus de chaleur et les régions polaires le moins. L'ensoleillement est défini par l'intensité de ce rayonnement solaire reçu sur un plan à un moment donné et il varie selon la latitude, l'heure, la saison, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et les divers autres phénomènes météorologiques. [98][99]



Le plus souvent, l'ensoleillement est exprimé en « heures de soleil maximum », équivalent au nombre d'heures par jour où l'éclairement est en moyenne de 1000 W/m^2 .

Le rayonnement global est la somme du rayonnement reçu, directement, du Soleil, de celui, diffus, provenant de la voûte céleste et du rayonnement réfléchi par le sol. [98]

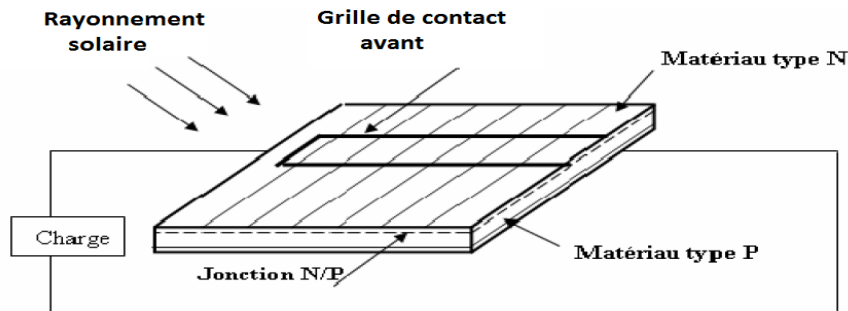
V.3 Le système photovoltaïque

Même, si les BECQUERELS furent les premiers à observer en 1839, la capacité des semi-conducteurs à transformer la lumière du soleil en électricité, les premières cellules PV à oxyde cuivreux (CuO) ne sont apparues qu'en 1930, puis en sélénium (Se) et il a fallu attendre jusqu'à 1950 pour fabriquer la première photopile en silicium (Si) par la compagnie Bell téléphone. [97]

V.3.1 La cellule photovoltaïque

Une cellule solaire comprend une base de silicium de type P couverte d'une mince couche de type N. Au voisinage de la jonction, apparaît un champ électrique qui maintient la séparation des charges positives et des charges négatives.

Des contacts métalliques, en forme de grille, sont déposés sur chaque face de la cellule et constituent les électrodes de sortie de la photopile. La cellule photovoltaïque peut être représentée comme une diode plate sensible à la lumière. [100]



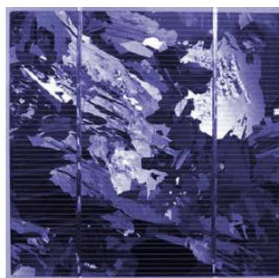
Description de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque
Figure (V.2)

Lorsque la cellule est éclairée par une radiation lumineuse d'énergie « $h\nu$ » supérieure ou égale à l'énergie de la bande interdite E_g du semi-conducteur, les photons sont captés et absorbés en transmettant leur énergie à des électrons, un couple électron-trou est créé, c'est l'effet photovoltaïque. Ces charges sont refoulées par le champ électrique interne de la jonction PN vers ses extrémités ce qui va créer une différence de potentiel appelée tension photovoltaïque. Si une charge est appliquée aux bornes de la cellule, cette tension génère un courant appelé courant photovoltaïque.

Pour des raisons économiques, le matériau le plus utilisé pour la fabrication des cellules photovoltaïques reste le silicium avec ses nombreuses formes, cristallin, multi cristallin, amorphe, en couche mince,...etc. Par contre, pour les applications spatiales, avec un rendement plus élevé, les cellules multicouches présentent une meilleure fiabilité ainsi qu'une faible détérioration de leur caractéristique au cours du temps.



Silicium monocristallin



Silicium Polycristallin

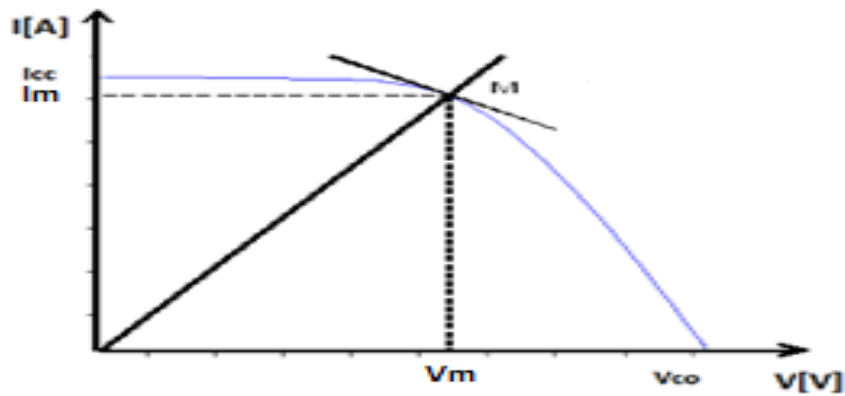


Silicium amorphe

Quelques Cellules photovoltaïques
Figure (V.3)

V.3.2 Caractéristique d'une cellule photovoltaïque

La caractéristique d'une cellule photovoltaïque est identique à celle d'une photodiode, mais en convention générateur.



Caractéristique type d'un générateur photovoltaïque
Figure (V.4)

V.3.3 Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivants :

V.3.3.1 Courant de court-circuit

C'est le courant pour lequel la tension « V » aux bornes de la cellule ou du générateur photovoltaïque est nulle. Dans le cas idéal où la résistance série « R_s » est nulle et la résistance en parallèle « R_p » est de l'ordre de l'infini, ce courant se confond avec le photo courant I_{ph} , par contre dans le cas contraire, avec « $V=0$ », il en résulte : [101]

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \cdot \left(\exp\left(\frac{eR_s \cdot I_{cc}}{AKT_c}\right) - 1 \right) - \frac{I_{cc} \cdot R_s}{R_p} \quad \dots (V.1)$$

Pour la plupart des photopiles, la résistance série est faible, d'où le terme $\left(\exp\left(\frac{eR_s \cdot I_{cc}}{AKT_c}\right) - 1 \right)$ peut être négligé devant I_{ph} .

L'expression approchée du courant de court-circuit est alors : $I_{cc} = \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_p}\right)}$... (V.2)

V.3.3.2 Tension de circuit ouvert

C'est la tension maximale « V_{co} » pour laquelle le courant débité par la photopile ou le générateur photovoltaïque est nul. $I_{ph} - I_{sat} \cdot \left(\exp\left(\frac{eV_{co}}{AKT_c}\right) - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_p} = 0$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{co} = \left(\frac{AKT_c}{e}\right) \cdot \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1\right) \quad \dots (V.3)$$

Elle reflète la tension de seuil de la jonction PN en absence de la lumière. En négligeant le courant qui passe dans la résistance parallèle « R_p », « V_{oc} » est exprimée comme suit : [101]

$V_{oc} = \frac{A \cdot K \cdot T_c}{e} \ln\left(1 + \frac{I_{ph}}{I_{sat}}\right)$ et avec $I_{cc} \gg I_{sat}$ et la tension thermique est $V_t = A \cdot K \cdot T_c / e$.

$$V_{oc} = \frac{A \cdot K \cdot T_c}{e} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_{sat}}\right) = V_t \cdot \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_{sat}}\right) \quad \dots (V.4)$$

Ou bien encore $V_{oc} = V_{ocref} + \beta \cdot \Delta T + \alpha \cdot (E_s - E_{sref}) \dots (IV.5)$

V_{ocref} : Tension à circuit ouvert de référence [volts]

α : Coefficient de variation de courant à circuit ouvert en fonction de la température [A/°C].

β : Coefficient de variation de la tension de court-circuit en fonction de la température [V/°C].

ΔT : Variation de la température [°C]

E_s : Ensoleillement,

E_{sref} : Ensoleillement de référence

V.3.3.3 Facteur de forme

Le facteur de forme FF reflète la qualité de la cellule par rapport à une cellule idéale où « FF = 1 ». Il est défini comme étant le rapport entre la valeur maximale de la puissance de la photopile pouvant être extraite « $V_m \cdot I_m$ » sous les conditions standards de mesures et le produit entre le courant de court-circuit et la tension du circuit ouvert « $V_{cc} \cdot V_{co}$ ».[101]

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{cc} \cdot V_{co}} \dots (V.6)$$

Pour une cellule de fabrication industrielle, le facteur de forme est de l'ordre de 70%.

V.3.3.4 Le rendement

Le rendement (η) des cellules photovoltaïques est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale de sortie délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente

« P_{in} ».

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{V_m \cdot I_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot V_{co} \cdot I_{cc}}{P_{in}} = \frac{P_m}{E_s \cdot S} \dots (V.7)$$

Avec S représentant la surface effective des cellules. Il est, évidemment, possible d'agir sur le facteur de forme, le courant de court-circuit et ou la tension à circuit ouvert pour améliorer le rendement des cellules photovoltaïques. [102]

$$E_{\text{électrique}} = E_{\text{Lumineuse}} - E_{\text{Thermique}}$$

Avec $E_{\text{électrique}}$: Energie disponible aux bornes de la cellule photovoltaïque.

$E_{\text{Lumineuse}}$: Energie incidente (flux lumineux).

$E_{\text{Thermique}}$: Pertes thermiques par convection, par rayonnement et par conduction.

$$\eta = \frac{E_{\text{Electrique}}}{E_{\text{Lumineuse}}} \dots \dots \dots (V.8)$$

V.3.4 Modélisation du générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque considéré est un générateur élémentaire composé d'une seule cellule photovoltaïque, il est décrit par sa caractéristique « courant – tension » $I=f(V)$, et le modéliser, revient à approximer ses sorties qui sont la tension et le courant, en fonction des deux entrées qui sont l'éclairement et la température. De nombreux modèles mathématiques, dont les plus fréquents sont le modèle à une exponentielle et celui à deux exponentielles, sont développés pour identifier les multiples paramètres d'une cellule solaire, possédant un comportement non linéaire, afin d'améliorer son rendement. [103] [104]

V.3.4.1 Cellule idéale

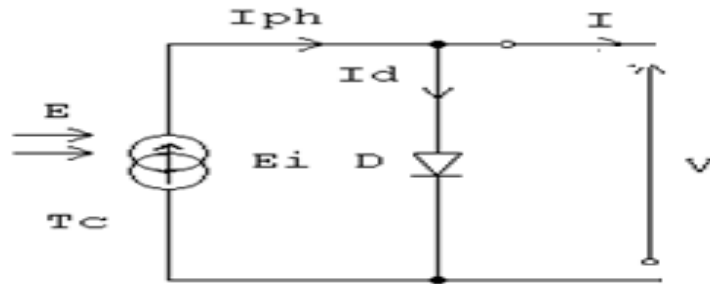


Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale
Figure (V.5)

La loi de Kirchhoff appliquée au circuit électrique équivalent, d'une cellule idéale, donne l'expression du courant photovoltaïque engendré par les radiations lumineuses :

$$I_{ph} = I + I_d \quad \dots (V.9)$$

Avec
$$I_d = I_{sat} \cdot \exp\left(\frac{eV}{AKT_c} - 1\right) \quad \dots (V.10)$$

Et I_{sat} : Courant de saturation de la diode D T_c : Température de la cellule en Kelvin
 e : Charge élémentaire d'un électron K : Constante de Boltzmann
 A : facteur d'idéalité V : Tension de sortie

V.3.4.2 Modèle explicite

Le modèle de Rauschenbach offre des équations qui permettent de générer la courbe caractéristique $I=f(V)$ de la figure (V.4) d'une cellule solaire à partir de la tension à circuit ouvert « V_{co} », la tension à puissance maximale « V_m », le courant de court-circuit « I_{cc} » et le courant à puissance maximale « I_m ». [105] [106] [107]

Le courant aux bornes de la cellule photovoltaïque est tel que :

$$I = I_{cc} \cdot \left[1 - C1 \cdot \left[\exp\left(\frac{V}{V_{co} \cdot C2}\right) - 1 \right] \right] \quad \dots (V.11)$$

Les constantes $C1$ et $C2$ sont définies par :

$$\begin{cases} C1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{cc}}\right) \cdot \exp\left(\frac{-V_m}{V_{co} \cdot C2}\right) \\ C2 = \frac{\left(\frac{V_m}{V_{co}} - 1\right)}{\ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{cc}}\right)} \end{cases} \quad \dots (V.12)$$

La tension « V_m » correspondante au maximum de puissance est calculée par l'équation :

$$V_m = V_{mref} [1 + \Delta V_m (T_j - T_{jref})] + K1 V_T \ln\left(\frac{E_s}{E_{sref}}\right) + K2 \left[V_T \ln\left(\frac{E_s}{E_{sref}}\right) \right]^2 \quad \dots (V.13)$$

- « V_{mref} » est la tension au point de puissance maximale en condition standard. [107-a]
- « ΔV_m » est le coefficient de température de la tension au point de puissance maximale.
- « $K1$ » et « $K2$ » sont des paramètres constants.

Le courant « I_m » correspondant au maximum de puissance est obtenu par :

$$I_m = I_{mref} \cdot \left(\frac{E_s}{E_{sref}}\right) [1 + \Delta I_m (T_j - T_{jref})] \quad \dots \dots (V.14)$$

- « I_{mref} » est le courant au point de puissance maximale en condition standard.
- « ΔI_m » est le coefficient de température du courant au point de puissance maximale.

Pour d'autres niveaux d'ensoleillement E [W/m²] et de température T [°C], il est possible d'utiliser quelques équations afin d'obtenir de nouveaux points à partir des points de référence. [108][109]
$$\Delta T = T_j - T_{jref} \quad \dots (V.15)$$

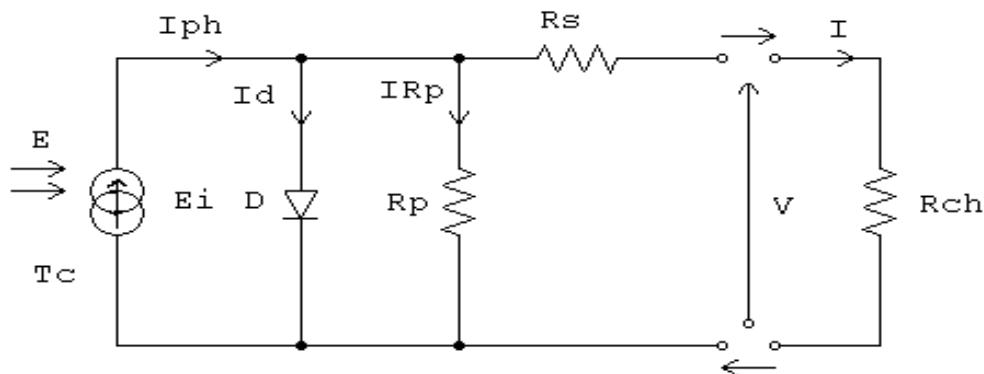
$$\Delta I = \alpha \cdot \left(\frac{E_s}{E_{sref}} \right) \cdot \Delta T + \left(\frac{E_s}{E_{sref}} - 1 \right) \cdot I_{cc} \quad \dots (V.16)$$

$$\Delta V = -\beta \cdot \Delta T - R_s \cdot \Delta I \quad \dots (V.17)$$

$$\begin{cases} I_{new} = I_{ref} + \Delta I \\ V_{new} = V_{ref} - \Delta V \end{cases} \quad \dots (V.18)$$

V.3.4.3 Modèle à une diode

le modèle à une diode caractérise le fonctionnement d'une seule cellule photovoltaïque avant de le généraliser à un nombre plus important de cellules photovoltaïques couplées en série et ou en parallèle, communément appelé « Module Photovoltaïque ». [110]



Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle à une Diode
Figure (V.6)

La résistance shunt est due à un courant de fuite par l'effet de bord autour de la cellule solaire et la résistance interne de la cellule est représentée par la résistance série qui dépend, principalement, de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles. La source de courant modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique et la diode placée en parallèle modélise la jonction PN. [110]

- D : Diode représentant la jonction PN de la cellule V : la tension de sortie
- I : le courant délivré par le module I_d : Courant de diode
- R_{ch} : Résistance de charge qui impose le point de fonctionnement sur la cellule.
- I_{ph} : le courant photovoltaïque engendré par les radiations lumineuses

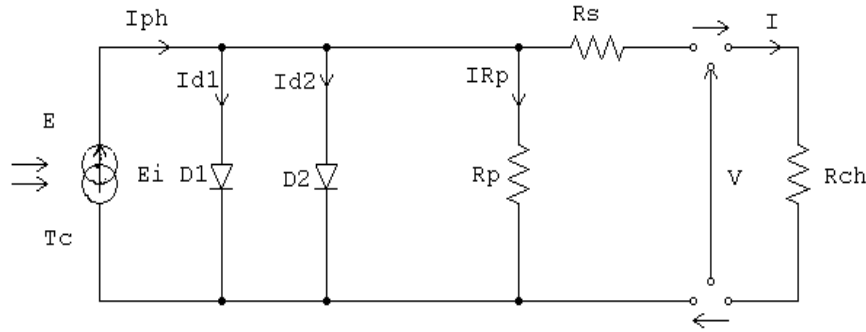
D'après la loi des nœuds de Kirchhoff, le courant généré par le module est donné par :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{Rp} \quad \dots (V.19)$$

Le courant « I_{ph} » est directement dépendant du rayonnement solaire « E_s » et de la température de la cellule « T_j » tel que : [104]

V.3.4.4 Modèle à deux diodes

Le modèle à deux diodes considère le cas d'une cellule solaire idéale comprenant une source de courant « I_{ph} » qui modélise le photo courant généré et deux diodes en parallèles, la branche de la diode D1 représente le courant de diffusion « I_{d1} » dans la base et l'émetteur et la branche de la diode D2 représente le courant « I_{d2} » de génération-recombinaison dans la zone de charge d'espace de la jonction « ZCE ». [104][110].



Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle à deux Diodes
Figure (V.7)

Avec les mêmes expressions des courants « I_{ph} » et « I_{Rp} » que celles du modèle à une diode et selon la loi des nœuds de Kirchoff le courant généré « I » est donné par : [111]

$$I = I_{ph} - (I_{d1} + I_{d2}) - I_{Rp} \quad \dots \dots \dots (V.28)$$

Avec

$$\begin{cases} I_{d1} = I_{sat1} \cdot \left[\exp\left(\frac{e(V+R_s I)}{A \cdot K \cdot T_j}\right) - 1 \right] \\ I_{sat1} = P_4 \cdot T_j^3 \exp\left(\frac{-E_g}{K \cdot T_j}\right) \end{cases} \quad \dots (V.29)$$

Et

$$\begin{cases} I_{d2} = I_{sat2} \cdot \left[\exp\left(\frac{e(V+R_s I)}{2 \cdot A \cdot K \cdot T_j}\right) - 1 \right] \\ I_{sat2} = P_5 \cdot T_j^3 \exp\left(\frac{-E_g}{2 \cdot K \cdot T_j}\right) \end{cases} \quad \dots (V.30)$$

Le courant total s'écrit :

$$\begin{aligned} I = P1 \cdot E_s \cdot [1 + P2 \cdot (E_s - E_{sref}) + P3 \cdot (T_j - T_{jref})] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \\ - \left[P_4 T_j^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{K \cdot T_j}\right) \right] \cdot \left[\exp\left(\frac{e \cdot (V + R_s \cdot I)}{A \cdot K \cdot T_j}\right) - 1 \right] \\ - \left[P_5 T_j^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2 \cdot K \cdot T_j}\right) \right] \cdot \left[\exp\left(\frac{e \cdot (V + R_s \cdot I)}{2 \cdot A \cdot K \cdot T_j}\right) - 1 \right] \end{aligned} \quad (V.31)$$

V.3.5 Association des cellules photovoltaïques

Selon le besoin en énergie, Les cellules photovoltaïques peuvent être regroupées en série et ou en parallèle. Cependant, le fonctionnement de l'ensemble est modifié si l'une des cellules associées est occultée par effet de l'ombre ou de défaillance,...etc.

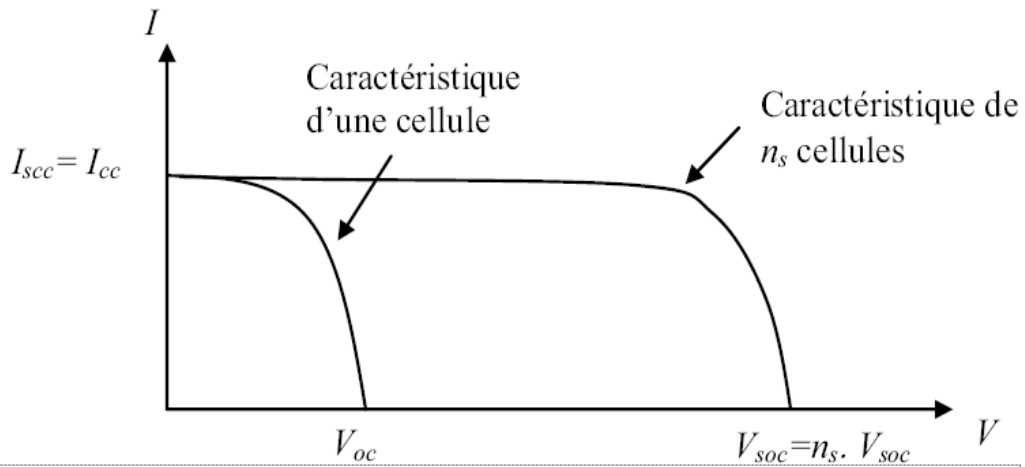
V.3.5.1 Association en série des cellules photovoltaïques

Les cellules sont connectées en série et la tension aux bornes de l'assemblage est égale à la somme des tensions délivrées par chacune des cellules. Dans ce cas, le courant qui traverse les cellules est le même, mais, les cellules peuvent fonctionner à des tensions différentes. [112]

$$V = \sum_{i=1}^{n_s} V_i \quad \dots (V.32)$$

V: Tension de l'assemblage, V_i : tension d'une cellule et n_s : Nombre de cellules en série.

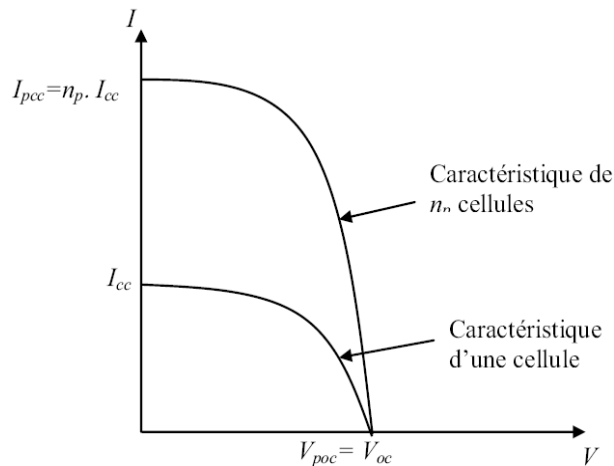
Si une cellule ne recueille qu'une faible partie de l'énergie solaire reçue par les cellules voisines, elle ne peut délivrer qu'un courant limité, ce qui entrainera l'échauffement de la cellule en question et provoquer son claquage.



Caractéristique résultante d'un groupement en série de n_s cellules identiques
Figure (V.8)

V.3.5.2 Association en Parallèle des cellules photovoltaïques

Les cellules sont connectées en parallèle et le courant de l'ensemble sera égal à la somme des courants produits par chacune des cellules.



Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de n_p cellules identiques
Figure (V.9)

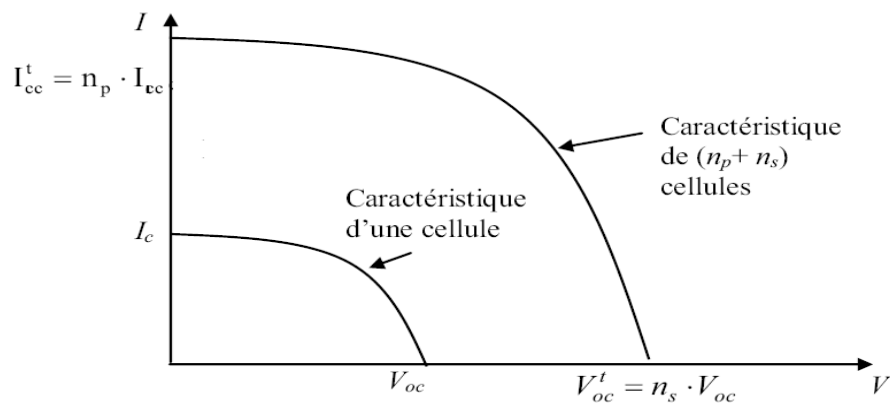
Dans ce cas, les cellules délivrent la même tension mais elles peuvent fonctionner avec des courants différents. $I = \sum_{i=1}^{np} I_i \dots (V.33)$

I: Courant de l'assemblage, I_i : Courant d'une cellule et np : Nombre de cellules en parallèle.

Cependant, si une cellule est cachée, elle devient réceptrice, ce qui cause une perte d'une partie de la puissance produite par les cellules fonctionnant normalement.

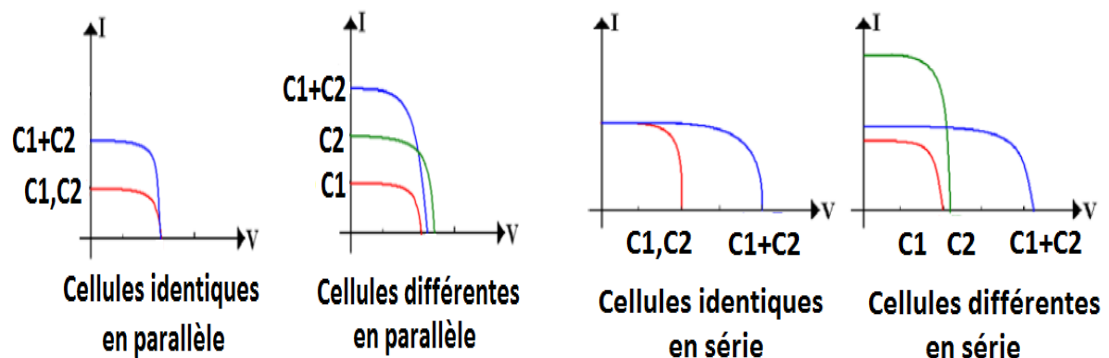
V.3.5.3 Association hybride des cellules photovoltaïques

Le courant total de court-circuit et la tension à vide totale issus de l'association de cellules photovoltaïques en série et ou en parallèle sont : $\begin{cases} I_{cc}^t = n_p \cdot I_{cc} \\ V_{co}^t = n_s \cdot V_{co} \end{cases} \dots (V.34)$



Caractéristique résultante d'un groupement hybride de « n_p+n_s » cellules identiques
Figure (V.10)

La caractéristique d'un générateur photovoltaïque constitué de « n_s » cellules en série et ou « n_p » cellules en parallèle garde une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire dans le cas où toutes les cellules reçoivent la même irradiation et sont soumises à la même température. Dans le cas où un déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule apparaît et selon la figure (V.11), l'allure du générateur photovoltaïque prend une allure différente que celle d'une cellule élémentaire. [112-a]



Allures des différentes associations de cellules photovoltaïques
Figure (V.11)

La connexion des cellules non identiques génère plus de pertes que celles identiques, ce qui impose une contrainte de reproductibilité dans leurs fabrications.[113]

V.3.5.4 Cas de défaillance d'une ou plusieurs cellules

Dans le cas où une cellule, couplée en série ou en parallèle, ne reçoit qu'une faible partie de l'énergie solaire recueillie par les autres cellules, elle est dite « cellule occultée », ce qui affecte, sérieusement, la marche normale de l'ensemble. Selon la manière où les cellules sont connectées, des mesures sont prises afin d'éviter des désagréments à l'équipement.

V.3.5.4.1 Phénomènes de hot spot sur les cellules ombragées

Si dans un module photovoltaïque, l'une des cellules reliées en série se retrouve ombragée, le courant, alors, ne peut plus circuler et la cellule se comporte comme un récepteur et accumule le courant produit en amont, ce qui engendre une dissipation d'une puissance sous forme de chaleur dépassant les 100°C en provoquant son claquage, un phénomène connu sous le nom de « hot spot ».

Pour limiter la tension inverse maximum susceptible de se développer aux bornes d'une cellule, il est nécessaire de placer une diode parallèle, appelée « diode by-pass », soit par les fabricants de modules photovoltaïques lors de leurs façonnages, soit par les installateurs lors de l'association de modules en série dans les boîtes de jonction.[114]

V.3.5.4.2 Cas de couplage en parallèle

Dans le cas de couplage en parallèle, si une ou plusieurs cellules sont occultées, les autres deviennent réceptrices, de fait que la tension de fonctionnement est supérieure à la tension de circuit ouvert. Bien qu'une cellule puisse dissiper un courant important, il est préférable de disposer d'une diode en série dite « diode anti-retour », laquelle empêche, également, de gaspiller dans une autre cellule occultée une partie de la puissance produite par les cellules fonctionnant normalement.

V.4 Générateur photovoltaïque

Selon les technologies, une cellule solaire élémentaire ne génère qu'une puissance inférieure à « 2 Watts » sous une tension comprise entre 0.5 et 1.5V. Pour que ce genre de générateur soit exploitable, il est nécessaire de connecter plusieurs cellules en série, pour augmenter la tension d'utilisation, et en parallèle, pour satisfaire le besoin en courant. [115]

Le module photovoltaïque est une connexion en série et en parallèle d'un ensemble de cellules solaires, générant une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière. Pour une utilisation extérieure, les cellules sont encapsulées dans une enveloppe supérieure et inférieure en verre ou en composé plastique avec un encadrement en aluminium.

Les modules photovoltaïques peuvent, en conséquence, être assemblés en série et ou en parallèle, composant ainsi, le générateur photovoltaïque, appelé aussi « champ de modules photovoltaïques ». [116]

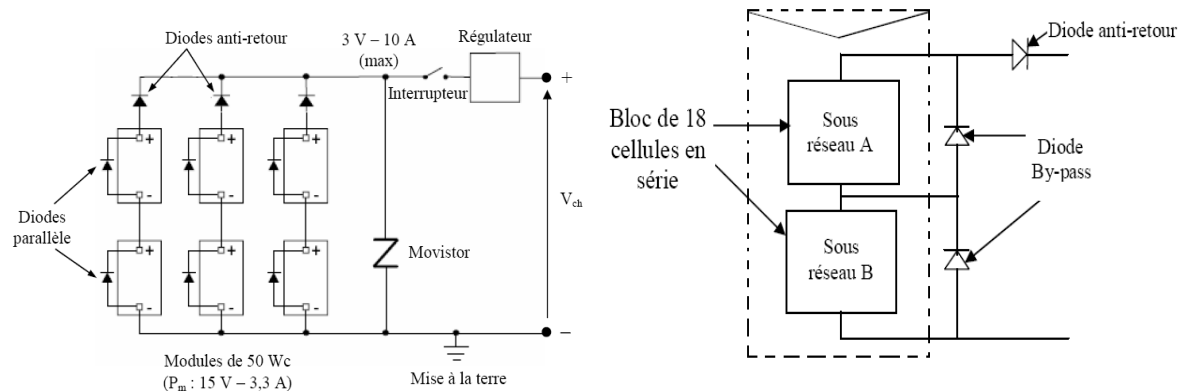
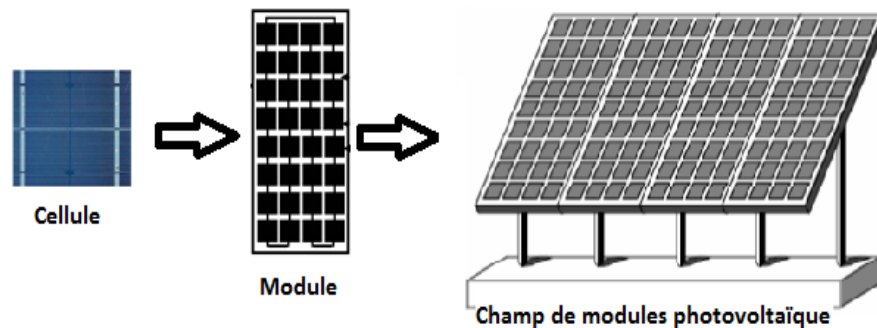


Schéma électrique équivalent du montage série – parallèle avec protection « diode by-pass » et « diode anti retour ». Figure (V.12)

Afin d’assurer la protection électrique d’une installation photovoltaïque, des diodes « anti-retour » sont utilisées pour éviter les courants négatifs dans les générateurs photovoltaïques et des diodes « by-pass » sont mises en série pour permettre l’exploitation du reste du panneau non éclairé. Pour protéger l’installation contre les surtensions causées par la foudre, un varistor à oxyde métallique (Movistor) est installé à l’entrée du conditionneur. [95]



Allures des différentes associations de cellules photovoltaïques Figure (V.13)

V.5 Composants d’un système de pompage photovoltaïque

Le pompage solaire est une technologie intéressante pour l’alimentation en eau avec un débit et une hauteur manométrique totale limités ayant pour maximum $Q_{max}=100 \text{ m}^3/\text{j}$ à $HMT= 10$ mètres. Au-delà, la surface des panneaux solaires à installer devient vite importante et l’installation très onéreuse.

Le système de pompage photovoltaïque peut fonctionner avec des batteries de stockage, ou bien, directement, au fil du soleil dit « fil de l’eau ». Si pour le système à batteries, une autonomie est assurée, mais, avec une élévation du coût global de l’installation,

le pompage sans batteries est considéré comme un système plus simple, plus fiable et moins coûteux, où l'eau est pompée dans un château d'eau, similaire à un accumulateur, avant de la distribuer par gravité en cas de besoin. Les performances dépendent de l'ensoleillement, de la température ambiante ou bien, encore, du rendement des modules photovoltaïques, des différents convertisseurs, du moteur et de la pompe utilisés.

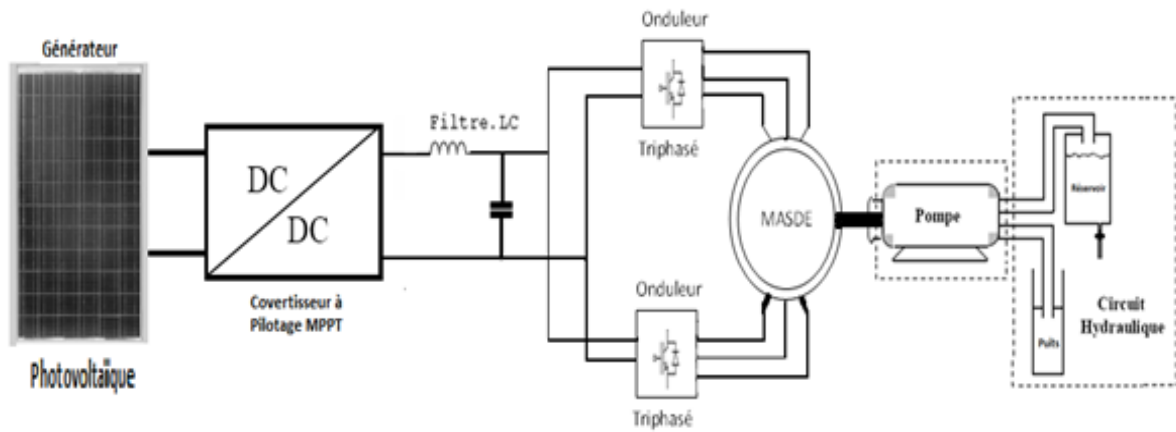


Schéma de l'installation photovoltaïque
Figure (V.14)

V.5.1 Modélisation du générateur photovoltaïque

Afin de réduire les coûts et les risques de mauvaises manœuvres dans la phase d'évaluation et d'apprentissage des systèmes complexes, l'utilisation d'outils informatiques de simulation numérique s'avère nécessaire pour modéliser le générateur photovoltaïque et prendre un support permettant une étude du comportement du système, sans avoir recours à la pratique.[117]

Des diverses études effectuées ont montré que le modèle à deux diodes est le plus proche de la réalité et présente des erreurs, relativement, faibles par rapport aux autres modèles étudiés. Le choix se portera donc, sur ce modèle où les deux diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d'une part en surface du matériau et d'autre part dans le volume du matériau. [118]

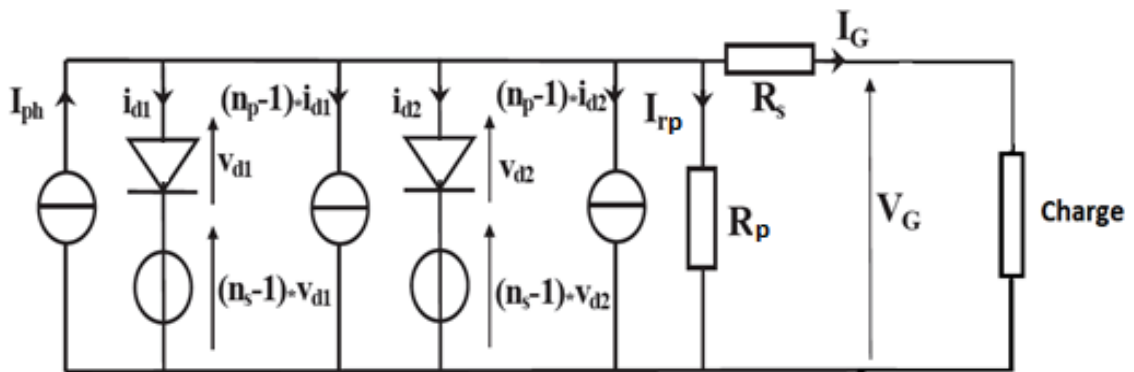


Schéma électrique du « modèle à deux diodes » pour un groupe de panneaux
Figure (V.15)

$$\begin{array}{llll}
I_G = n_p \cdot I & I_d = n_p \cdot i_d & I_{rp} = n_p \cdot i_{rp} & R_s = \frac{n_s}{n_p} \cdot r_s \\
V_G = n_s \cdot V & V_d = n_s \cdot v_d & I_{ph} = n_p \cdot i_{ph} & R_p = \frac{n_s}{n_p} \cdot r_p
\end{array}$$

Chaque groupe de panneaux nécessite un nombre « ns*np » de cellules élémentaires groupées en série/parallèle, avec « ns » représentant le nombre de cellules en série sur une branche et « np » le nombre de branches en parallèles. Dans le cas où toutes les cellules utilisées sont identiques et fonctionnent dans les mêmes conditions, la figure (V.15) représente le schéma électrique équivalent du générateur photovoltaïque symbolisé par deux diodes représentant les phénomènes de polarisation de la jonction PN. [118-a]

Le panneau, ainsi défini, peut être représenté par un quadripôle possédant deux variables d'entrées, à savoir l'ensoleillement E_s [W/m³] et la température de jonction des cellules T_j [°C], et deux variables de sortie, présentées par le courant fourni par le groupe de panneaux I_G [A] et par la tension délivrée par le groupe de panneaux V_G [V].

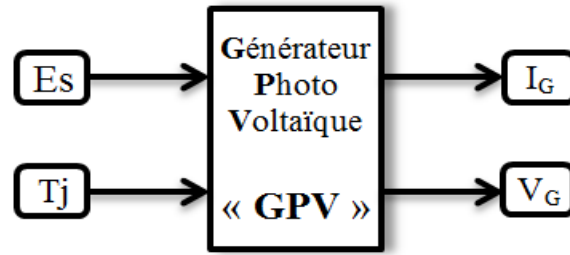


Schéma Bloc du Générateur Photovoltaïque
Figure (V.16)

Le courant délivré par le panneau photovoltaïque est donné par la relation suivante :

$$\begin{aligned}
I_G = P1 \cdot E_s \cdot [1 + P2 \cdot (E_s - E_{sref}) + P3 \cdot (T_j - T_{jref})] - \frac{V_G + R_s \cdot I_G}{R_p} \\
- \left[P_4 T_j^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{K \cdot T_j}\right) \right] \cdot \left[\exp\left(\frac{e \cdot (V_G + R_s \cdot I_G)}{A \cdot K \cdot T_j}\right) - 1 \right] \\
- \left[P_5 T_j^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2 \cdot K \cdot T_j}\right) \right] \cdot \left[\exp\left(\frac{e \cdot (V_G + R_s \cdot I_G)}{2 \cdot A \cdot K \cdot T_j}\right) - 1 \right] \quad (V.35)
\end{aligned}$$

A partir des relevés expérimentaux, l'identification des huit paramètres du modèle à deux diodes est réalisable par la résolution de l'équation $I_G=f(I_G, V_G, E_s, T_j)$ dont les différentes valeurs sont : [119]

$$\begin{array}{lllll}
P1=03,40 \cdot 10^{-3}, & P2=0, & P3=0,20 \cdot 10^{-5}, & P4=450, & P5=72, \\
A=1, & R_s=0,58 & \text{et} & R_p=160.
\end{array}$$

V.5.2 Convertisseur à pilotage MPPT

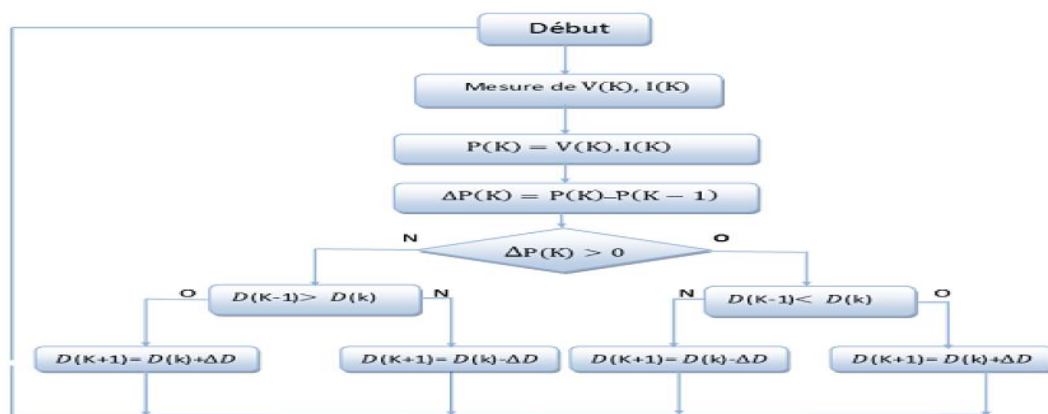
V.5.2.1 Généralités et définition

Introduit pour la première fois en 1968 dans le cadre d'applications spatiales ayant pour générateur électrique des panneaux solaires photovoltaïques, le MPPT, de

l'anglais « Maximum Power Point Tracking », est le principe permettant de suivre le point de puissance maximale d'un générateur électrique dont la caractéristique $I=f(V)$ est fortement non linéaire, et en conséquence, pour un même éclairement, et selon la charge, la puissance délivrée sera différente. Un contrôleur MPPT permet, donc, de piloter le convertisseur statique reliant la charge et le panneau photovoltaïque de manière à fournir, en permanence, le maximum de puissance à la charge.

La méthode Perturbation et Observation (P&O : perturb and observe) est, sans doute, la plus simple pour faire une recherche du point maximal de puissance. Elle est basée sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de la tension de référence V_{ref} , puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie en vue d'une éventuelle correction du rapport cyclique du convertisseur (DC-DC).[120]

L'organigramme de l'algorithme « Perturb & Observ » résume la logique à suivre pour une recherche fructueuse du point de fonctionnement du système en imposant les consignes adéquates du rapport « α », noté « D ».[121]



Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation
Figure (V.17)

Ainsi, le système adapte en permanence la tension aux bornes du générateur photovoltaïque afin de se rapprocher du point de puissance maximum, sans, jamais, l'atteindre précisément. D'autres algorithmes différents existent ainsi que des solutions entièrement analogiques, parfois, assez simples à mettre en œuvre.

Dans le cas de pompe, un type particulier d'adaptateur de charge est le commutateur de Champ, un dispositif qui permet de modifier l'agencement série-parallèle des modules en fonction de la charge ou de l'éclairement

V.5.2.2 Modélisation du hacheur Buck-Boost

Il est impératif de maintenir le rendement d'une conversion de puissance élevé, pour épargner le circuit électronique d'un excès d'échauffement. Il est évident donc, de recourir aux éléments passifs (inductance, capacité) et aux commutateurs de puissance.

Selon le niveau de puissance, le commutateur peut être un « Mosfet », pour une puissance de quelques kW, un « IGBT » ou un thyristor pour des puissance élevées.

Le hacheur, fréquemment, utilisé dans les systèmes photovoltaïques est de type dévolteur-survolteur « Buck - Boost » qui présente une alternative pour extraire le maximum de la puissance. Ainsi, pour un ensoleillement faible, le convertisseur fonctionne en Boost ou survolteur et pour un ensoleillement conséquent, la variation du rapport cyclique, impose un fonctionnement en Buck ou dévolteur.[122]

Pour une période de hachage T et un rapport cyclique α , le commutateur est, d'abord, amorcé pendant une période « αT » où la diode D est bloquée et l'inductance L emmagasine une certaine quantité d'énergie, le condensateur C , supposé préalablement chargé, alimente la charge. Le reste de la période, la diode conduit et le commutateur bloqué, l'inductance restitue l'énergie emmagasinée au condensateur et à la charge.

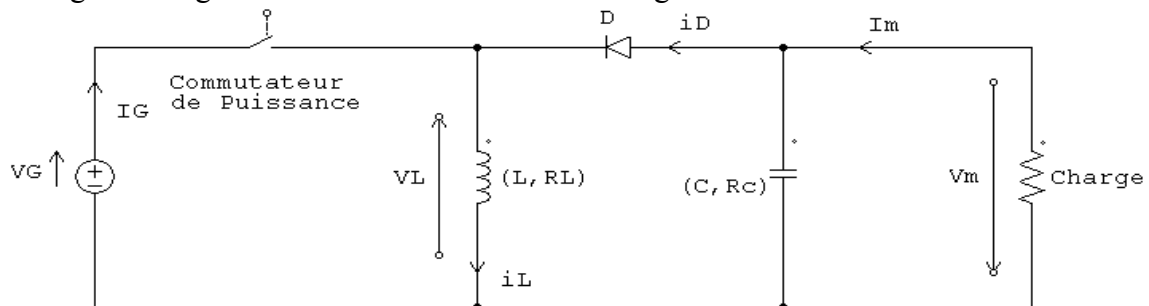


Schéma du Hacheur Buck - Boost
Figure (V.18)

le rapport cyclique α ajuste la tension et le courant de sortie tel que [123]:

$$\begin{cases} V_m = \frac{-\alpha}{1-\alpha} \cdot V_G \\ I_m = \frac{1-\alpha}{\alpha} \cdot I_G \end{cases} \quad \dots (V.36)$$

Après introduction des paramètres réels du circuit, La relation devient :

$$V_m = \frac{-\alpha}{1-\alpha} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{R_L}{R} \cdot (1-\alpha)\right)} V_G \quad \dots (V.37)$$

Le modèle moyen du hacheur est alors donné par :

$$\begin{cases} R_L i_L + L \cdot \frac{d}{dt} \cdot i_L = 2\alpha \cdot V_G \\ i_c(t) = C \cdot \frac{d}{dt} \cdot V_c + \frac{(V_m - V_c)}{R_c} = (1-\alpha) i_L - \frac{V_m}{R} \end{cases} \quad \dots (V.38)$$

V.5.2.3 Modélisation du filtre

Pour venir à bout des hautes fréquences, il est nécessaire d'utiliser un filtre passe-bas « LC », représenté par la figure (V.19).[124]

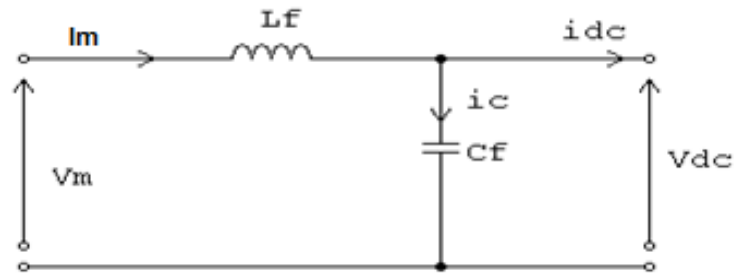


Schéma du filtre passe-bas
Figure (V.19)

Les équations caractérisant le filtre sont comme suit :

$$\begin{cases} V_m = L_f \cdot \frac{d}{dt} i_m + V_{dc} \\ \frac{d}{dt} V_{dc} = \frac{1}{C_f (i_m - i_{dc})} V_m \end{cases} \quad \dots (V.39)$$

La fréquence de coupure est de $f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}}$

V.5.3 Dimensionnement d'une pompe photovoltaïque

V.5.3.1 Données de base d'une pompe [125]

a) Le débit (Q)

C' est la quantité d'eau que la pompe peut fournir durant un intervalle de temps donné. En pompage, le débit est, habituellement, donné en litres par heure [l/h] ou gallons par heure [g/h]. En pompage solaire, le débit est souvent exprimé en $[m^3/j]$.

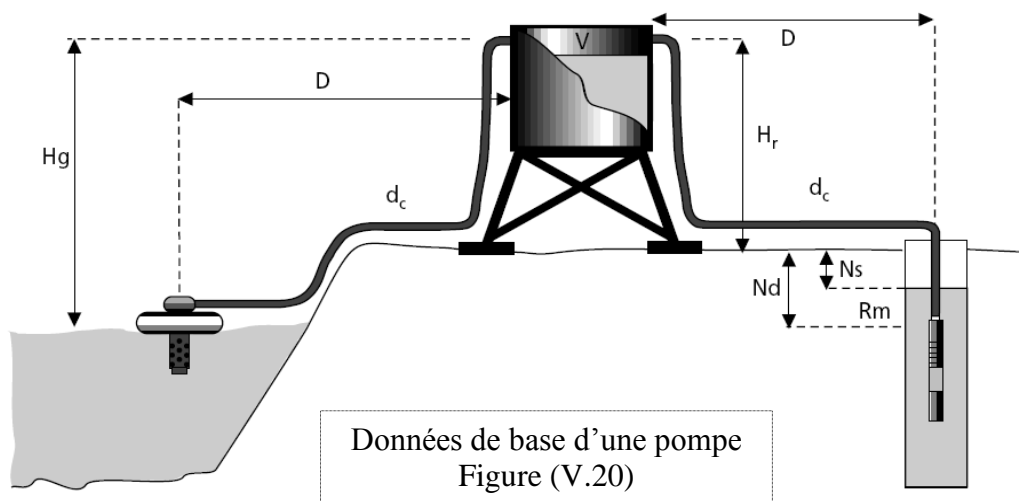
b) La hauteur manométrique totale (HMT)

est la différence de pression en mètres de colonne d'eau entre les orifices d'aspiration et de refoulement. Cette hauteur peut être calculée comme suit :

$$HMT = H_g + P_c \quad \dots (V.40)$$

Où P_c : pertes de charge produites par le frottement de l'eau sur les parois des conduites.

$H_g = H_r + N_d$: la hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée et le plan d'utilisation.



c) Niveau statique (Ns)

Le niveau statique d'un puits ou d'un forage est la distance du sol à la surface de l'eau avant pompage.

d) Niveau dynamique (Nd)

Le niveau dynamique d'un puits ou d'un forage est la distance du sol à la surface de l'eau pour un pompage à un débit moyen.

e) Rabattement (R)

Le rabattement est la différence entre le niveau dynamique et le niveau statique et

$R_m = N_d - N_s$: représente le rabattement maximal acceptable avant de stopper la pompe.

V.5.3.2 Dimensionnement de la pompe

Le dimensionnement d'une installation autonome nécessite, au préalable, tout en suivant les étapes suivantes, la connaissance de quelques paramètres.[126]

1- **Evaluation des besoins en eau**: Les besoins réels en eau de l'utilisateur durant l'année, doivent être déterminés, afin de prévoir la capacité du réservoir et acquérir l'autonomie du système.

2- **Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire** : La puissance hydraulique nécessaire pour déplacer l'eau d'un point à un autre est donnée par :

$$P_H = \rho \cdot g \cdot HMT \cdot Q_v \quad \dots (V. 41)$$

3- **Détermination de l'énergie solaire disponible** : La détermination de l'énergie solaire disponible est basée sur les calculs des valeurs moyennes journalières, mensuelles, de l'irradiation solaire disponible, par consultation des données climatiques de la région, notamment, l'irradiation, ombres, températures, brouillard, microclimat,...etc.

4- **Choix des composants** :[129]

4.1)-Dimensionnement des panneaux :

La puissance du générateur photovoltaïque « P_g » est fonction de l'énergie journalière demandée par la charge « E_c », de la durée de pompage « $T_{pompage}$ », nécessaire pour satisfaire les besoins journaliers en eau et des pertes dues à la poussière sur les panneaux et leurs températures.

$$P_g = \frac{E_c}{T_{pompage}(1-\sum pertes)} \quad \dots (V. 42)$$

Si le volume du réservoir d'eau est V [m³] sous un débit nominal Q_n [m³/h], la durée de pompage sera :

$$T_{pompage} = \frac{V}{Q_n} \quad [heures] \quad \dots (V. 43)$$

La méthode la plus simple pour déterminer le nombre de panneaux à utiliser, consiste à calculer, « P_s », la puissance normalisée du panneau sous les conditions « Noct » d'un panneau standard à partir des données d'irradiation du lieu et ensuite chercher combien de panneaux sont nécessaires, pour compenser la consommation.

Le nombre de panneaux nécessaires sera donc : $N_p = \frac{P_g}{P_s}$... (V.44)

4.2)-Dimensionnement du moteur :

De la puissance mécanique « P_{mec} » et de la valeur du rendement du moteur « η_{moteur} » à utiliser, il est possible de déterminer la puissance électrique « P_{elec} » indispensable pour le fonctionnement du moteur.

$$P_{elec} = \frac{P_{mec}}{\eta_{moteur}} \quad \dots (V.45)$$

A ne pas omettre la consommation de l'onduleur possédant un rendement « $\eta_{onduleur}$ », ce qui rend la puissance délivrée nécessaire :

$$P_{délivrée} = \frac{P_{elec}}{\eta_{onduleur}} \quad \dots (V.46)$$

Le besoin de la charge en énergie électrique est évalué en tenant compte de la durée journalière de pompage tel que :

$$E_c = P_{délivrée} T_{pompage} \quad \left[\frac{KWh}{j} \right] \quad \dots (V.47)$$

4.3)-Dimensionnement de la pompe :

Avec un débit « Q » et une hauteur manométrique totale « HMT » supposés connus, la puissance mécanique « P_{mec} » délivrée par une pompe ayant un rendement « η_{pompe} » est :

$$P_{mec} = \frac{P_h}{\eta_{pompe}} \quad (V.48)$$

V.5.3.3 Application :

Pour le besoin en eau potable d'un village dépourvu d'énergie électrique conventionnelle, le recours au pompage photovoltaïque au fil du soleil, s'avère une solution intéressante à long terme.

En effet un château d'eau, d'une capacité de 150 m^3 , est érigé dans le but d'asservir l'unique puits du village dont le besoin en eau dans la journée n'excède pas cette capacité dans les cas les plus défavorables.

Ces calculs permettent de dimensionner le champ photovoltaïque et le nombre de panneaux envisageables à cette application de débit nominal « $Q_n=30 \text{ m}^3/\text{h}$ » et d'une hauteur manométrique totale « $HMT=17 \text{ m}$ ».

Puissance hydraulique :

$$P_H = \rho \cdot g \cdot HMT \cdot Q_n = 1000 * 9,81 * 17 * \frac{30}{3600} \simeq 1390 \text{ W}$$

Puissance mécanique :

La pompe centrifuge ayant un rendement d'environ 55% a besoin d'une énergie mécanique de : $P_{mec} = \frac{P_H}{\eta_{pompe}} = \frac{1390}{0.55} \simeq 2527 \text{ W}$

La puissance mécanique est, généralement, donnée par le constructeur de la pompe, pour pouvoir choisir le moteur d'entraînement.

Puissance électrique :

Le rendement des moteurs à courants alternatifs est au voisinage de 85% d'où :

$$P_{elec} = \frac{P_{Méc}}{\eta_{moteur}} = \frac{2527}{0.85} = 2973 \text{ W}$$

Puissance électrique demandée :

La puissance électrique, réellement demandée, inclue la consommation des convertisseurs statiques utilisés dans la chaîne d'énergie, notamment, l'onduleur possédant un rendement autour de 95% :

$$P_{délivrée} = \frac{P_{elec}}{\eta_{onduleur}} = \frac{2973}{0.95} = 3129 \text{ W}$$

Durée de pompage : $T_{pompage} = \frac{V}{Q_n} = \frac{150}{30} = 5 \text{ heures}$

Energie journalière demandée : $E_c = P_{délivrée} T_{pompage} = 3129 * 5 = 15645 \frac{Wh}{j}$

La puissance du générateur photovoltaïque :

Les pertes de puissance attribuables à la température et à la poussière sont supposées présenter un cinquième de la puissance délivrée par l'ensemble des modules.

$$P_g = \frac{E_c}{T_{pompage}(1 - \sum pertes)} = \frac{P_{délivrée}}{(1 - \sum pertes)} = \frac{3129}{(1 - 0,2)} \approx 3911 \text{ W}$$

Nombre de panneaux :

Le modèle du panneau utilisé est le panneau de type SIEMENS SM 110-24, ayant une puissance nominale normalisée de 110Wc. $N \geq \frac{P_g}{P_s} = \frac{3911}{110} = 35,55$ panneaux.

Le nombre de panneaux est, donc de, 36 panneaux.

V.6 Simulation numérique et interprétation des résultats :

V.6.1 Bloc de simulation sous Matlab Simulink:

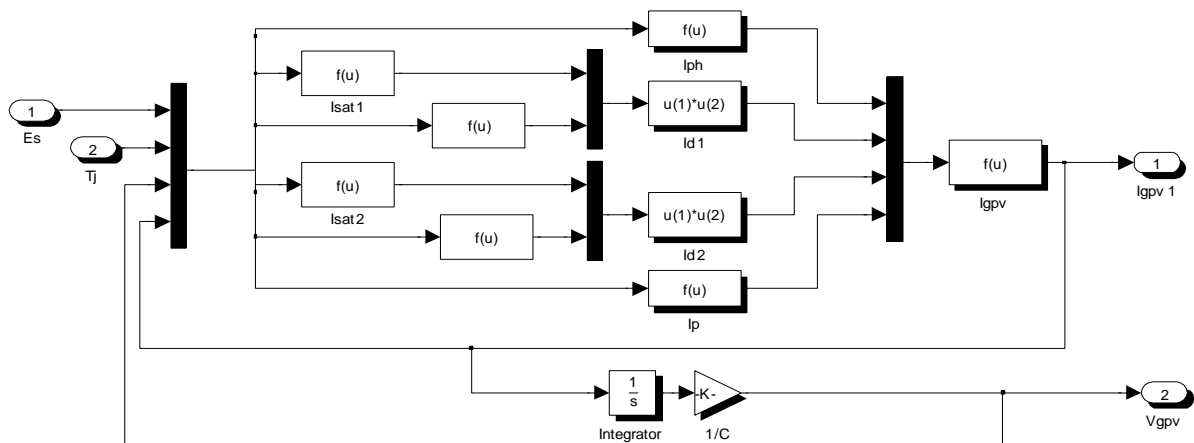
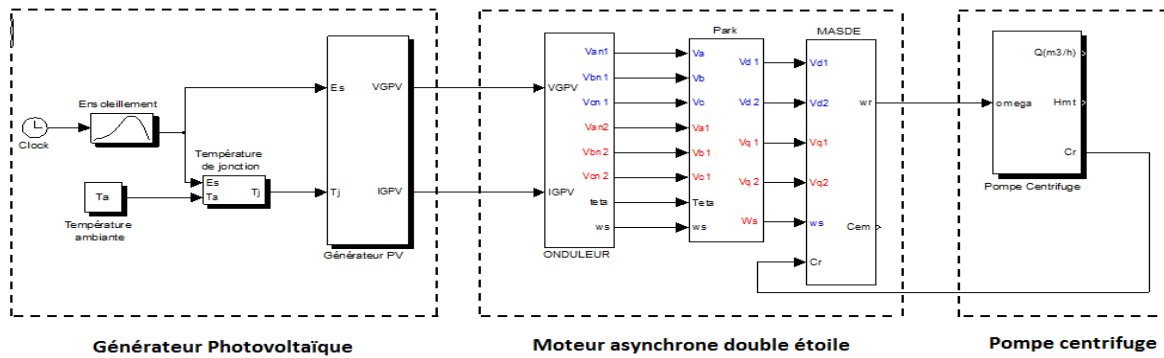


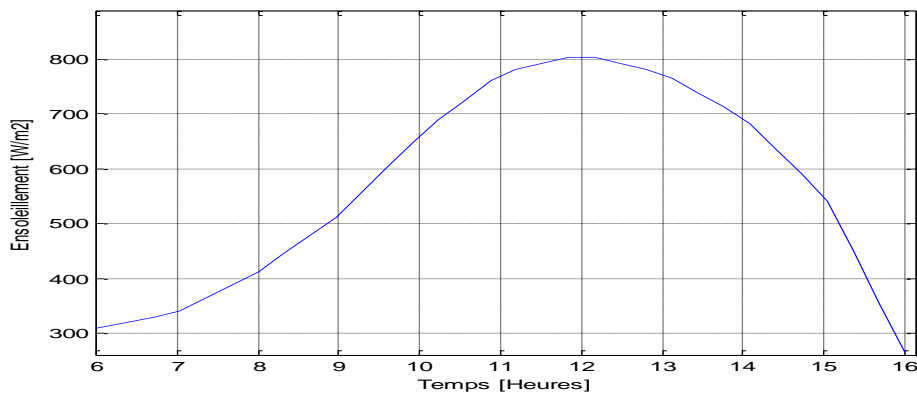
Schéma Bloc du Générateur Photovoltaïque
Figure (V.21)



Bloc de simulation global de la motopompe alimentée par le générateur photovoltaïque
Figure (V.22)

V.6.2 Ensoleillement

La simulation est réalisée pour une journée d’été où la variation de l’ensoleillement est représentée par l’allure figure (V.21). [128]



Variation de l’ensoleillement au cours d’une journée d’été
Figure (V.23)

V.6.3 Association des panneaux photovoltaïques

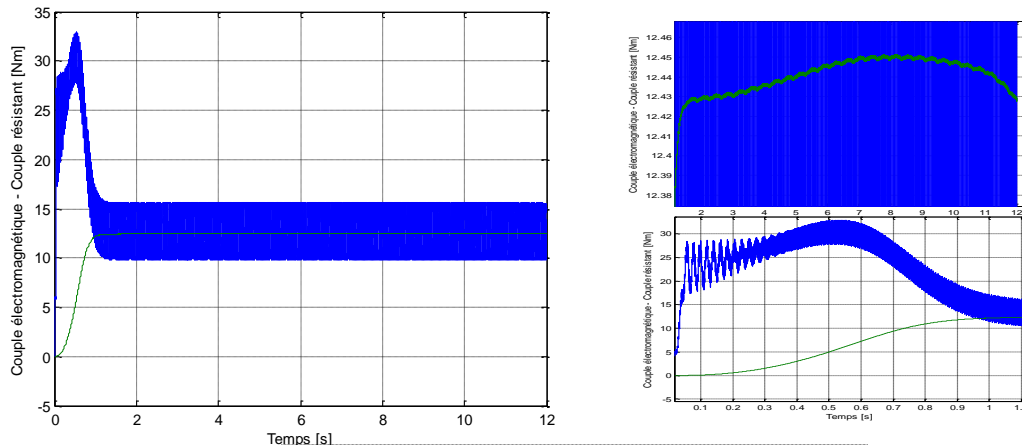
Les 36 panneaux photovoltaïques, nécessaires pour générer la puissance utile au fonctionnement de l’installation, peuvent être regroupés, selon le besoin, en tension et en courant. Deux configurations vont être traitées et simulées pour les considérer, ensuite, comme support de comparaison, de diverses grandeurs caractéristiques.

V.6.3.1 Mise en parallèle de deux branches ayant 18 panneaux en série

V.6.3.1.1 Couple électromagnétique

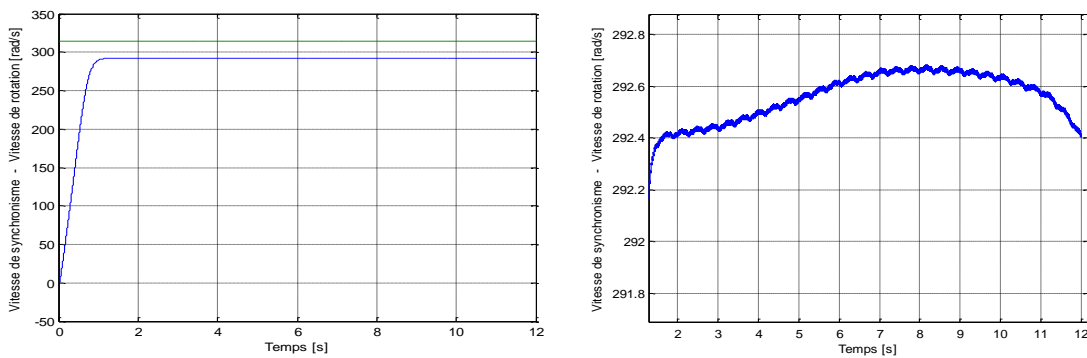
Au démarrage, le couple de la machine oscille, atteignant les 32 Nm, avant de se stabiliser, avec quelques ondulations, autour d’une valeur de 12.5 Nm. La pompe, à son tour, oppose un couple résistant, qui croît, rapidement, pendant un laps de temps de 1.2s, avant de

suivre l'évolution du couple moteur. Quelques fluctuations du couple de la pompe, découlant d'une variation de l'ensoleillement consigné, sont, également, observées.



Couple électromagnétique - Couple résistant
Figure (V.24)

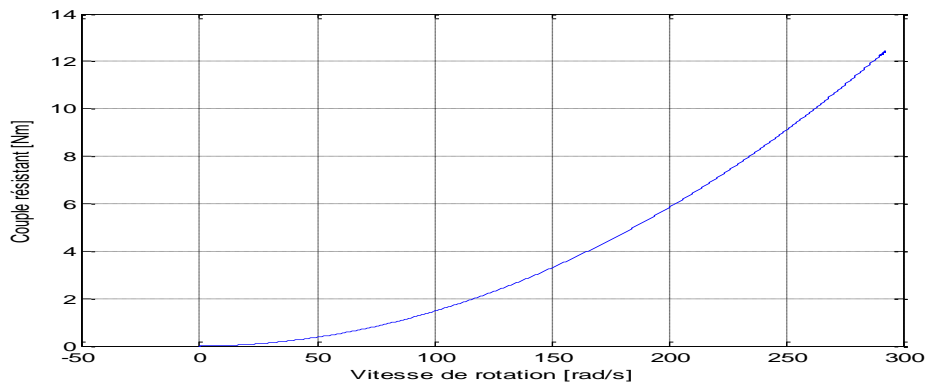
V.6.3.1.2 Vitesse de rotation



Vitesse de synchronisme - Vitesse de rotation
Figure (V.25)

Juste après le démarrage, la vitesse de rotation de l'ensemble Moteur-Pompe augmente rapidement atteignant une valeur avoisinant les 292 rad/s. A noter que la vitesse réagit aux diverses variations de l'ensoleillement.

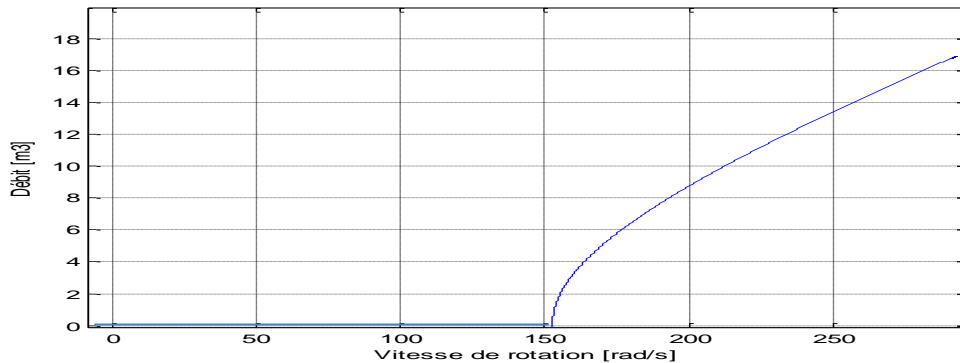
V.6.3.1.3 Caractéristique « Couple – Vitesse de rotation »



Caractéristique « Couple – Vitesse de rotation »
Figure (V.26)

Au début, le couple résistant et la vitesse de rotation sont nuls. Au fur et à mesure que la vitesse de rotation de l'ensemble moteur-pompe augmente, le couple résistant augmente, aussi, d'une manière presque linéaire.

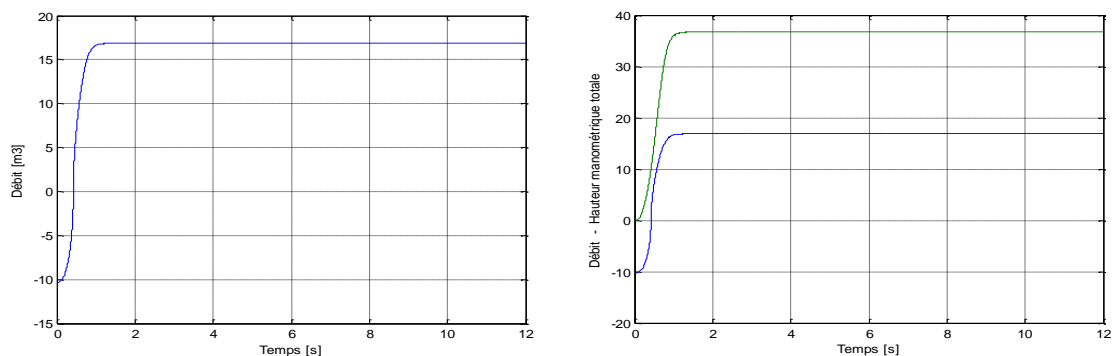
V.6.3.1.4 Caractéristique « Débit – Vitesse de rotation »



Caractéristique « Débit – Vitesse de rotation »
Figure (V.27)

Avant d'atteindre une certaine vitesse, aux environs de 150 rad/s, la pompe tourne sans fournir de débit à sa sortie. Au-delà de cette vitesse, le débit augmente jusqu'à atteindre son maximum, correspondant à une vitesse maximale.

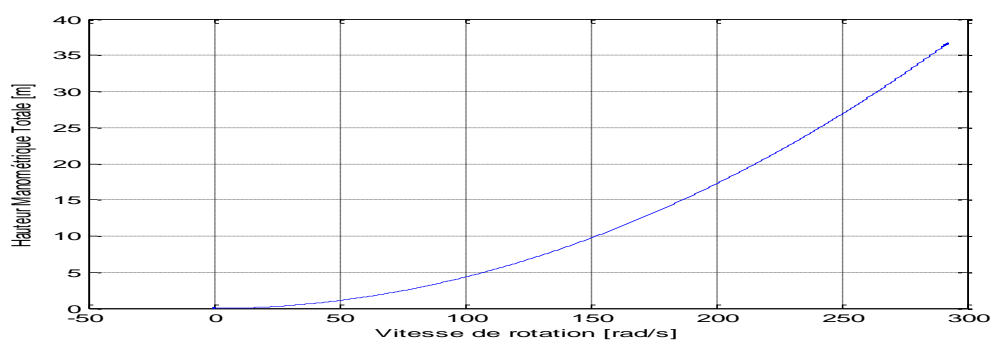
V.6.3.1.5 Evolution du « Débit » et de la « Hauteur Manométrique Totale »



Caractéristique « Débit – Hauteur manométrique totale »
Figure (V.28)

Le débit et HMT évoluent de la même manière que la vitesse de rotation. Des fluctuations sont, quand même, observées au moment où l'ensemble change de valeur.

V.6.3.1.6 Hauteur manométrique totale – Vitesse de rotation

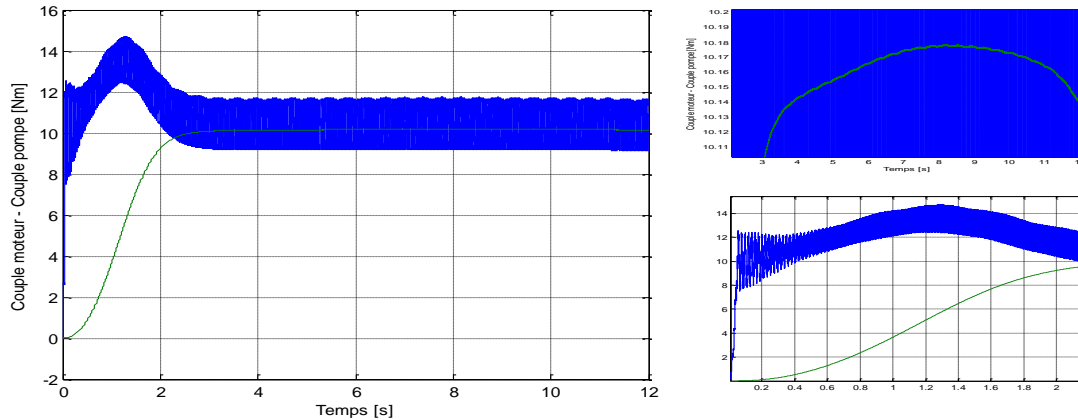


Caractéristique « Hauteur manométrique totale – Vitesse de rotation »
Figure (V.29)

L'évolution de la hauteur manométrique totale en fonction de la vitesse de rotation est semblable à celle du couple résistant.

V.6.3.2 Mise en parallèle de trois branches possédant 12 panneaux en série

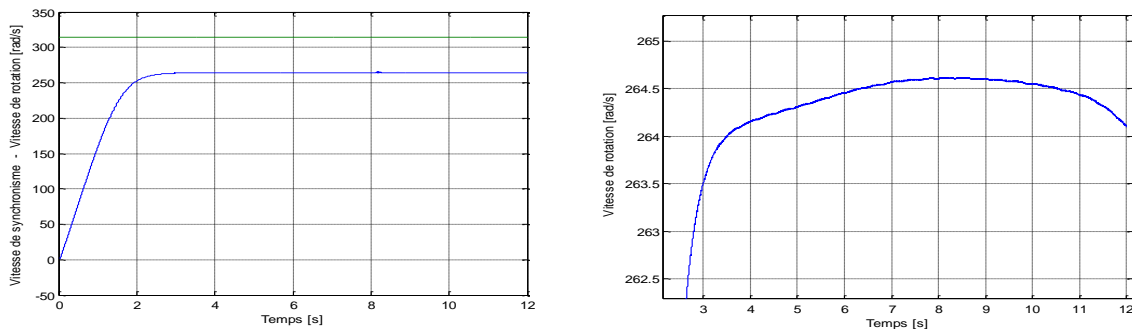
V.6.3.2.1 Couple électromagnétique



Couple moteur – Couple pompe
Figure (V.30)

Au début, le couple moteur prend des valeurs importantes au moment où le couple de la pompe varie en fonction du carré de la vitesse de rotation. La variation de l'ensoleillement, donc de la tension à la sortie du générateur photovoltaïque, induit une variation du couple.

V.6.3.2.2 Vitesse de rotation

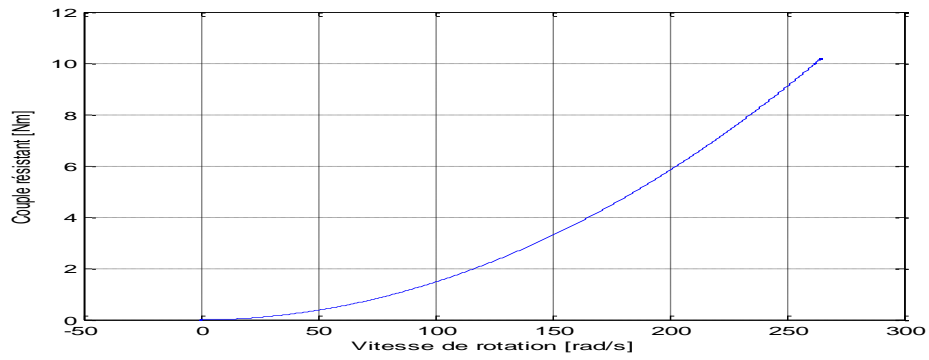


Vitesse de synchronisme – Vitesse de rotation
Figure (V.31)

La vitesse de rotation augmente selon l'allure de la figure (V.29) et elle réagit aux diverses variations de l'ensoleillement.

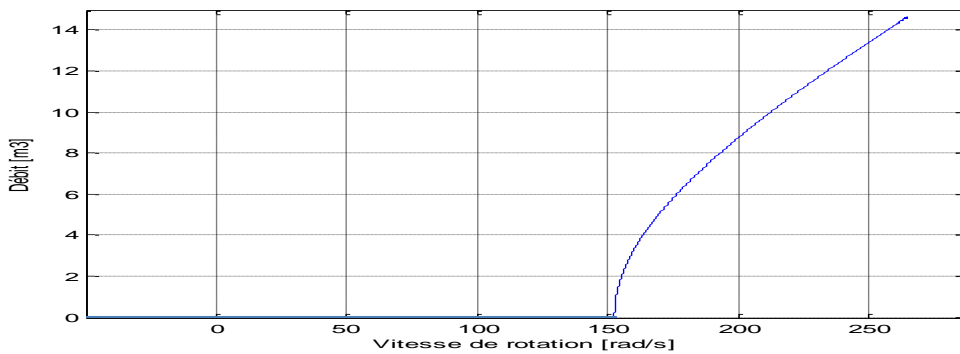
V.6.3.2.3 Caractéristique « Couple – Vitesse »

Le couple de démarrage est, bien sûr, limité au couple de frottement de la pompe à l'arrêt qui s'avère plus important qu'en rotation.



Couple résistant – Vitesse de synchronisme
Figure (V.32)

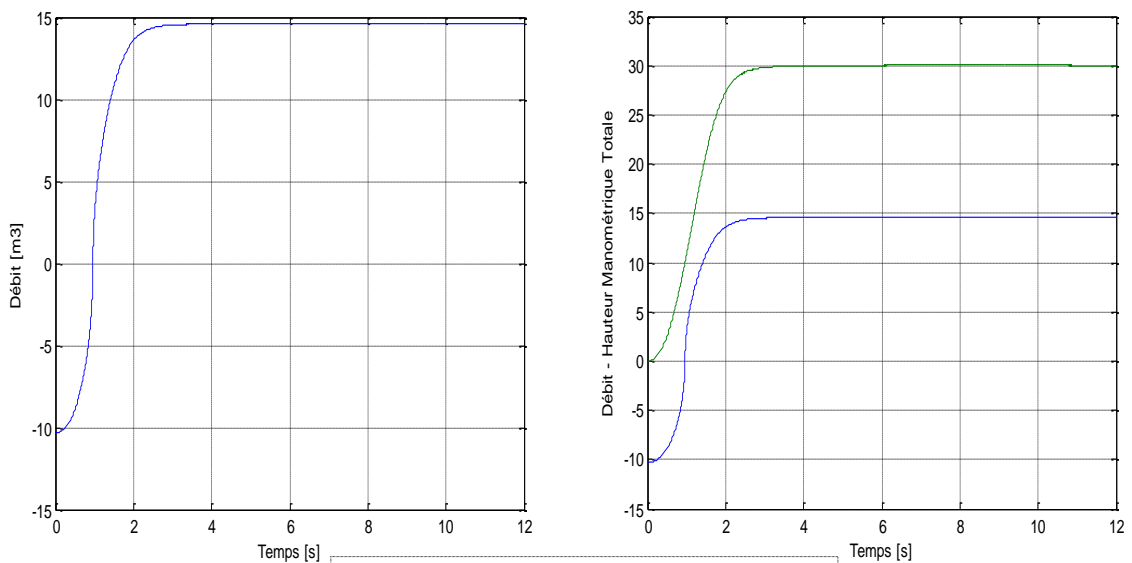
V.6.3.2.4 Caractéristique « Débit – Vitesse »



Couple résistant – Vitesse de rotation
Figure (V.33)

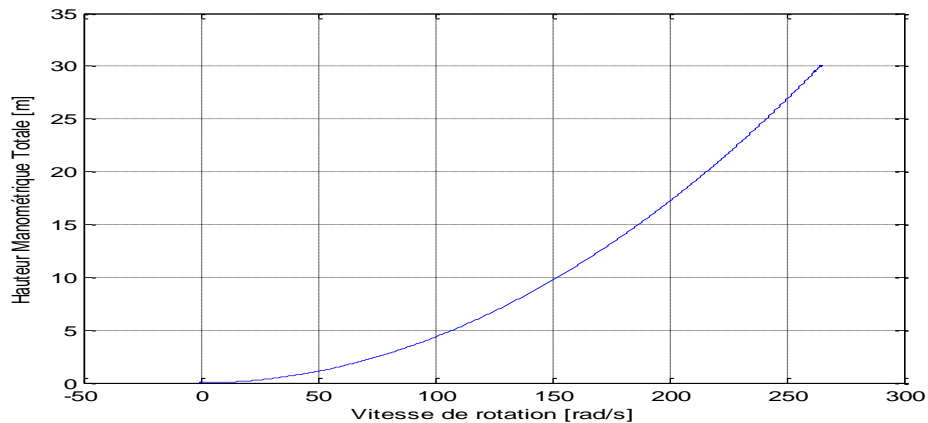
Le débit de la pompe centrifuge varie avec la vitesse de rotation, néanmoins, il faut une certaine vitesse minimale pour amorcer la pompe et obtenir un débit.

V.6.3.2.5 Evolution du « Débit » et de la « Hauteur Manométrique Totale »



Couple résistant – Vitesse de rotation
Figure (V.34)

V.6.3.2.6 Hauteur manométrique totale – Vitesse de rotation



Caractéristique « Hauteur manométrique totale – Vitesse de rotation »
Figure (V.35)

L'allure de la variation de la hauteur manométrique totale est semblable à l'allure de la variation du couple résistant qui obéit, convenablement, à la variation en fonction du carré de la vitesse de rotation.

V.6.3.3 Discussions des résultats

Le couple de la pompe, sa vitesse de rotation, le débit pompé, ainsi que la hauteur manométrique, obéissent à la variation de l'éclairement. Toutefois, l'usage de la technique de recherche du point de puissance maximale permet de surmonter le handicap d'un faible éclairement. Il est judicieux, par contre, de préciser que la technique « perturb & observ » n'est pas tout à fait fiable, dans le cas d'une variation brusque de l'éclairement.

Le besoin d'un fort courant au démarrage nécessite un couplage des panneaux, de telle manière, à avoir leurs courants s'additionner, puis, revenir au couplage fournissant une tension nécessaire au fonctionnement.

Il est intéressant de signaler que la combinaison des modules photovoltaïques offrant une tension élevée permet de fournir à l'ensemble moteur-pompe une vitesse de rotation plus importante, ce qui procure une augmentation du couple et de la quantité d'eau pompée. La nécessité à la pompe d'acquérir une certaine vitesse pour pouvoir offrir un débit, demeure une condition incontestable pour les deux cas de figures étudiés.

V.7 Avantages et inconvénients

V.7.1 Avantages[127][128][129]

L'énergie solaire présente davantage d'avantages par rapport aux autres sources d'énergies, dites, renouvelables dont l'essentiel se résume comme suit :

✓ Une haute fiabilité qui la rend, particulièrement, appropriée aux régions isolées, du fait qu'elle ne comporte pas de pièces mobiles.

✓ Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques fournit une simplicité de montage et de démontage et permet une adaptation des applications de puissances, allant du milliwatt au Mégawatt.

✓ Coûts de fonctionnements très faibles, ne nécessitant, ni surveillance permanente, ni personnel hautement spécialisé, ce qui lui procure le caractère de système autonome, fonctionnant sans approvisionnement en combustible.

✓ La technologie photovoltaïque offre un produit fini, non polluant, silencieux, n'entraînant aucune perturbation du milieu.

✓ Possibilité de combinaison avec d'autres sources d'énergies offrant une meilleure fiabilité du système.

✓ Haute résistance aux conditions atmosphériques hostiles, ce qui lui assure une longévité assurée.

V.7.2 Inconvénients [127][128][129][130]

Quelques contrariétés sont à signaler quant à l'utilisation de ce genre de générateur, ce qui ne diminue nullement pas ses qualités.

✓ Le manque de compétitivité par rapport aux générateurs Diesel

✓ Le coût élevé de la fabrication du module photovoltaïque, nécessitant une maîtrise du processus technologique.

✓ Le faible rendement de conversion d'un module photovoltaïque.

✓ L'augmentation du coût global du générateur photovoltaïque dans le cas d'utilisation des batteries de stockage et des régulateurs.

V.8 Domaines d'applications [127][128][129][130]

L'énergie photovoltaïque trouve son compte dans des divers secteurs dont quelques applications sont énumérées en ce qui suit :

✓ Appareils cosmiques sur satellites, navettes spatiales,...etc.

✓ L'approvisionnement en électricité dans les régions isolées assurant des services vitaux à la population, tels que le pompage de l'eau pour la consommation ou l'irrigation, la réfrigération pour la production de glace et la conservation de vaccins, sang, produits agricoles, l'éclairage,...,etc.

✓ Electrification des stations-relais de télévision, radio, téléphone, émetteur-récepteur,...,etc.

✓ Le générateur photovoltaïque connecté au réseau en zone urbaine

✓ Centrales de puissances photovoltaïques ou hybrides connectées au réseau d'électricité national.

✓ L'alimentation de petits appareils tels que : calculatrices, montres, chargeurs de batteries, radios, lampes de poche, luminaires de jardin, systèmes d'alarme, jouets, fontaines,..., etc.

V.9 Conclusion

Ce chapitre traite le pompage photovoltaïque où un moteur asynchrone à double étoile entraîne la pompe pour pouvoir approvisionner un château d'eau destiné pour la consommation quotidienne d'un village.

Les moteurs à courant continu sont, de plus en plus, délaissés au détriment des moteurs asynchrones triphasés, et maintenant, une expérience nouvelle consiste à introduire les moteurs asynchrones à double étoile, choisis pour leur fiabilité assurée et leur continuité de service en cas de défaillance de ses parties électriques.

Il est primordial, avant d'entamer un projet de pompage photovoltaïque, de connaître au préalable les conditions météorologiques, notamment, en ce qui concerne la durée d'insolation journalière et le rayonnement disponible au cours d'une année, ce qui nécessite des mesures sur site et l'établissement des cartes climatiques de chaque région susceptible d'accueillir une installation photovoltaïque future.

L'évaluation des besoins en eau, la hauteur manométrique totale et le débit sont d'une très grande importance pour évaluer les diverses puissances permettant la détermination de la dimension du champ photovoltaïque.

Une étude plus approfondie, en ce qui concerne, le coût de tous les éléments intervenants dans la chaîne de pompage s'avère indispensable pour investir dans le photovoltaïque au détriment des autres ressources existantes.

Aujourd'hui, l'énergie et l'eau sont des signaux révélateurs du développement des pays. Même si l'Algérie détient des réservoirs, et pas des moindres, en gaz et en pétrole, elle est contrainte, à l'instar des autres pays industrialisés, de développer cette forme d'énergie nouvelle, pour assumer et assurer sa place au rang mondial.

Ainsi, un projet baptisé « Sahara Solar Breeder », en collaboration avec le Japon compte satisfaire la moitié de la demande mondiale en énergie électrique.

C'est un projet basé sur l'utilisation des sables du Sahara pour produire le silicium nécessaire pour la fabrication des panneaux solaires. L'énergie captée sera acheminée par des câbles supraconducteurs souterrains. L'énergie excédentaire servirait à faire fonctionner des usines de dessalement destinées à faire face aux besoins d'irrigation des régions où seraient installés les capteurs solaires. [131]

CONCLUSION

GENERALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

La recherche dans le domaine des machines tournantes ne cesse d'évoluer. En effet depuis l'avènement de l'électricité, l'humanité a, toujours, prôné une philosophie d'une manière à subvenir à ses continuels besoins et de s'imposer en maître des lieux.

Le moteur à courant continu qui, jadis, était la fierté de l'industrie, cède sa place au moteur asynchrone triphasé, puis, vient le moteur multiphasé surplomber le tout, avec ses qualités de haute fiabilité, d'une segmentation de puissance, d'un pouvoir d'élimination d'harmoniques d'espace, de minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques.

Le moteur asynchrone à double étoile est identique au moteur asynchrone triphasé, avec la particularité de posséder une étoile supplémentaire au stator, décalée d'un angle de trente degrés par rapport à la première étoile.

Les avantages que ce moteur offre, étendent le domaine de son utilisation aux secteurs sensibles de la marine, l'armée, l'avionique, ...etc.

L'alimentation, via des onduleurs de tensions, est une obligation dans le milieu industriel. La commande, par modulation de largeurs d'impulsions sinus-triangle, est responsable des ondulations qui surviennent sur le couple, la vitesse, les flux rotoriques et les courants du moteurs.

L'absence d'un fonctionnement en mode dégradé est l'avantage de marque de cet actionneur, qui offre un couple moteur tant qu'au moins deux phases restent actives.

Dans la perspective où les pompes occupent deux tiers des machines tournantes dans l'industrie, il est légitime de choisir le pompage comme application à ce moteur.

Le pompage n'est sûrement pas pour l'eau seulement, mais il est généralisé à tous les processus industriels et à tous les fluides.

L'idée de changer l'alimentation conventionnelle par une alimentation photovoltaïque a germé dans le but d'assurer une continuité de service et une application aux zones isolées. Ainsi il est tout à fait normal d'être optimiste quant à l'avenir de cette ressource disponible pour tous et à l'éventuelle généralisation de son emploi.

Quelques lacunes sont, quand même, à souligner, entre autre, l'étude du régime dégradé lors de l'application au pompage et au pompage photovoltaïque, que si elles sont effectuées, cela consolidera, sans doute, cette analyse.

D'autres points sont sciemment, ni étudiés, ni cités dans ce manuscrit. Une manière de les reporter en perspective pour améliorer ce travail, compte tenu que ce projet n'est qu'une introduction à la recherche.

Néanmoins, quelques perspectives sont citées, avec l'espoir de pouvoir les réaliser à l'avenir, tels que :

- Etude de l'influence des harmoniques d'espace.
- Etude des stratégies de commande de la MASDE.
- Etude de la régulation des courants de phases de la MASDE en mode dégradé.
- Etude du régime dégradé lors de l'application de la charge la pompe.
- Etude du régime dégradé au pompage photovoltaïque.
- Comparer les caractéristiques du couple et de la vitesse lors d'un faible ensoleillement avec celles d'un fonctionnement avec une seule étoile, lors de l'alimentation conventionnelle.
- Etude de la génératrice asynchrone à double étoile.
- Réalisation d'un banc d'essai pour valider les modèles proposés.

L'effort de contribuer à l'étude de la machine asynchrone à double étoile s'achève dans ces notes. Il reste, tout de même, la possibilité d'espérer de poursuivre les recherches liées à sa structure, à son alimentation et aux différentes commandes qui peuvent lui être associées.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [01] : N. Mekkaoui , « Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée », Laboratoire des Systèmes Propulsion-Induction Electromagnétiques Batna, Mémoire de Magister, 2004.
- [02] : D.Hadiouche, « Contribution à l'étude de la machine asynchrone double étoile : modélisation, alimentation et structure », Thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré de Nancy I, faculté des sciences et technique, 2001.
- [03] : R.Lateb, « modélisation des machines Asynchrones et synchrones a aimants avec prise en compte des harmoniques d'espace et de temps : Application à la propulsion marine par POD », Magister en Génie Electrique (E.M.P d'ALGER), Groupe de recherche en Electrotechnique et en Electronique de Nancy, Unité Mixte de Recherche du CNRS 7037, 19 octobre 2006
- [04]: D.Hadiouche, « Modeling of a Double Star Induction Motor for Space Vector PWM control », ICEM 2000.
- [05] : J.Belhadj, « Commande directe en couple d'une machine asynchrone, structure d'observation, Application aux systèmes multi-machine multi-convertisseur », Thèse de Doctorat, ENIT-INPT, juillet 2001.
- [06]: G.B. Kliman, W.J. Premerlani, R.A. Koegl and D. Hoeweler, « A new approach to on-line fault detection in AC motors », IEEE-IAS, Annual meeting Conference, pp. 687-693, CA, 1996.
- [07] : A. Bouden, « Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque », Mémoire de Magister, option : Modélisation Et Commande Des Machines Electriques, Université MENTOURI de Constantine, 2008.
- [08]: L. Benalia, « Commande en tension des moteurs à induction double alimentés », Doctorat en sciences en électrotechnique option : Electricité Industrielle, Université de BATNA, juin 2010.
- [09]: T.F Barton, « The double-Winding Generator », General Electric Review, pp.302-308, June 1929
- [10]: P.L. Alger, E.H. Freiburghouse, D.D. Chase, « Double Windings for Turbine Alternators», AIEE Trans, Vol. 49, pp.226-224, jan.1930.
- [11]: E.E WARD, H. HÄRER, « Preliminary investigation of an inverter - fed 5-phase induction motor », Proc.IEE, Vol.116, n° 6,pp.981-984, June 1969.
- [12]: T.A. Lipo, « a d-q model for six phase's induction machines », Proc. ICEM'80, pp.860-867, Athens, Greece, 1980.
- [13]: E. A. Klingshirn, « High Phase Order Induction Motors-Part II – Experimental Results», IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-102, n°1, pp.54-59, Jan.1983.
- [14]: H.A. Toliyat, T. A. Lipo, W. Coleman, «Analysis of a Concentrated Winding Induction Machine for Adjustable Speed Drive Applications. Part 2 (Motor Design and Performance)», IEEE Trans. Energ. Conv., Vol. 6, No. 4, pp. 684-692, Dec. 1991.
- [15]: J.Belhadj, I.Slama-Belkhodja, M.Pietrzak-David, B.de Fornel, «A multi machine multi-inverter DTC strategy», Electrimacs, 18-21. Electric Drives 1, aout 2002.
- [16]: N.Moubayed, « Alimentation par onduleur de tension des machines multi-étoiles », Thèse de Doctorat de l'INP de Lorraine, 1999.
- [17]: T.H.Liu, J.R.Fu and T.A. Lipo, «A Strategy for Improving the Reliability of Field-Oriented Controlled Induction Motor Drives», IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.29, No. 5, pp. 910-917, Sept./Oct. 1993.
- [18]: J.P.Martin, F.Meibody-Tabar,; B.Davat, «Multiple-phase Permanent Magnet Synchronous Machine supplied by VSIs, Working Under Fault Conditions», Conf. Record of 2000 IEEE IAS Annual Meeting (CD-ROM), , Roma, Italy,8–12 October 2000.
- [19]: E.A.Klingshirn, «High phase order induction motors-part ii – experimental results», IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-102, no. 1, pp.54-59, Jan.1983.

- [20]: G.Seguir, F.Notelet, «Electrotechnique industrielle, technique et documentation», page 484, édition Lavoisier, Paris, 1994,.
- [21]: M.A.Abbas, R.Christen, T.M.Jahns, «Six-phase voltage source inverter driven induction motor», IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. IA-20, No. 5, pp. 1251-1259, Sept./Oct 1984.
- [22]: Z.YE, D.Boroyevich, F.C.LEE, «Modeling and control of zero-sequence current in parallel multi-phase converters», Proc. PESC 2000 (CD-ROM), 18-23, Galway, Ireland, 2000
- [23]: B.Fornel, « Machines asynchrones : commande par contrôle direct de couple », Technique de l'Ingénieur D3623, 2003.
- [24]: H.Hammache, « Etude et réalisation d'une machine asynchrone double étoile : conception, alimentation et commande », Mémoire de Magister de l'Ecole Militaire Polytechnique, Alger, Algérie, Janvier 2007.
- [25]: T.Lameche, « Développement et Implémentation par Logique Floue d'une Commande DTC d'un Moteur à Induction Alimenté par un Onduleur de Tension PWM », Thèse de magister, université de Sétif, 2003.
- [26]: C.Canudas de Wit, « Commande des Moteur Asynchrones - Volume1 - Modélisation Contrôle Vectoriel et DTC », édition Hermès - Science publications, Paris, 2000.
- [27]: G.Strutzer, E.Samigiel, « Modélisation et commande des moteurs triphasés - commande vectorielle des moteurs synchrones - commande numérique par contrôleurs DSP », édition Ellipses, Mars 2000.
- [28]: A.Ivanov-Smolenski, « machines électriques », volume1, édition Mir Moscou, 1983.
- [29]: P.Vidal, « Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation », Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2004.
- [30]: R.Abdesmed, M.Kadjoudj, « Modélisation des machines électriques », Presses de l'université de Batna, Algérie, 1997.
- [31]: Z.Oudjebour, E.M.Berkouk, N.Sami, S.Belkacemi, S.Arezki, I.Messaif, « indirect space vector control of a double start induction fed by two five levels NPCVSI », International conference on Electric Machine, ICEM'04, Poland, 2004.
- [32]: D.Hadiouche, H.Razik, A.Rezzoug, « Study and simulation of space vector PWM control of Double-Stator Induction motor », CIEP, page.42-47, Mexico, 2000 .
- [33]: R.Toufouti, « Contrôle Directe du Couple de la Machine Asynchrone », Thèse de magister, université de Constantine, 2003.
- [34]: E.Merabet, R.Abdesmed, H.Amimeur, F.Hamoudi, « Field oriented control of a dual star induction machine using fuzzy regulators », 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP'07, University of Setif, F10(CDROM), 2007.
- [35]: H.Amimeur, « Contribution à la commande d'une MASDE par mode de glissement », Magister en électrotechnique, Université de BATNA, mai 2008.
- [36]: A.Kalantari, M.Mirsalim, H.Rastegar, « Adjustable speed drive based on fuzzy logic for a dual Three- Phase Induction machine », Amirkabir University of Technology, Tehran- Iran, Proceedings in Electrimacs, Electric Drives II, 18-21 August 2002.
- [37]: R.Pena-Eguiuz, M.Pietrzak-David, V.Riga, B.DeFornel, « Comparison of several speed sensor less Strategy of Two different Dual Drive Induction Motor Control Structures », L2EP, unité mixte de recherche, INPT-ENSEEIH, CIEP 2002, Mexico, IEEE, pp. 41-46, 20-24 October 2002
- [38]: D.Grenier, F.Labrique, H.Buyse, E.Montagne, « Electromécanique : convertisseurs d'énergie et d'actionneurs », 2^e cycle-école d'ingénieur, édition Dunod, Paris 2001.
- [39]: H.Yantour, J.Saadi, A.Khoumsi, « Modélisation et simulation d'une commande directe du couple appliquée à la machine asynchrone (DTC) », 6^e conférence Francophone de Modélisation et Simulation, MOSIM'06, Rabat-MAROC, 3-5 avril 2006
- [40]: T.Lameche, « Développement et implémentation par logique floue d'une commande dtc d'un moteur à induction alimenté par un onduleur de tension PWM », Thèse de magister, université de Sétif, 2003.

- [41] : S. Hamandi, « Commande vectorielle la machine synchrone double étoile à aimants permanents », Thèse de DEA en contrôle industriel à l'université LIBANNAISE, Sept. 2000.
- [42] : K.Dahmanel, « Contribution à la modélisation et à la commande d'une machine asynchrone double étoile alimentée par convertisseurs matriciels », mémoire de magister en automatique option : commande et conduite des systèmes d'énergie électrique école nationale polytechnique département de génie électrique 2004
- [43] : M.Azib, « Etude et Commande d'une MASDE Alimentée par Convertisseurs Matriciels », thèse de magistère en génie électrique, université A.Mira – Bejaia, 2009
- [44] : M.Etique, « Introduction Au Logiciel MATLAB », Yverdon- les –Bains version 1.2, mars 2002.
- [45] : H. Ney, « Equipements de puissance », Editions Fernand Nathan, Paris, 1988.
- [46] : O.Bouakaz, « Contribution à l'analyse des onduleurs multi niveaux », mémoire magister, option électronique de puissance, université de BATNA, 2005.
- [47] : A.Boulahia, « Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique », magister en électrotechnique, option : modélisation et commande des machines électriques, université de Constantine, 2009.
- [48] : S. Alloune, « Commande des machines polyphasées », thèse de magistère en génie électrique, université de Bejaia, Octobre 2005
- [49] : S.Rafa, H.Zeroug, L.Hocine, K.Boudjit, « Simulation sur Matlab/Simulink et implémentation sur DSP/FPGA de la commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents (PMSM) alimenté par un onduleur de tension a Modulation vectorielle », Laboratoire des systèmes électriques industriels, Faculté d'Electronique et d'Informatique. USTHB, Algérie, juin 2011.
- [50] : G.Crellet, G.Clerc, « Actionneurs électriques », édition EYROLLES, France, 1997.
- [51] : B.A.Welchko, T.A.Lipo, T.M.Jahns, S.E.Schulz, « Fault three phase AC motor drive topologies: a comparison of features, cost and limitations», IEEE transactions on power electronics, Vol. 19 pp1108-1116, n°4, July 2004.
- [52] : A.Ibrahim, « Contribution au diagnostic de machines électromécaniques : Exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée », Thèse de Doctorat, école doctorale Sciences, Ingénierie, Santé Diplôme délivré par l'Université Jean Monnet, 2009
- [53] : Y.Crevits, « Caractérisation et commande d'un entrainement polyphasé en mode dégradé », Doctorat de génie électrique, rapport de première année, école polytechnique Lille France, septembre 2009.
- [54] : S.Williamson, S.Smith, C.Hodge, «Fault tolerance in multiphase propulsion motors», journal of marine engineering and technology, n°4, A4, 2004.
- [55] : X.Kestelyn, « Modélisation vectorielle multi machines pour la commande des ensembles convertisseurs-machines polyphasées », Thèse de doctorat en génie électrique à l'université de Lille 1, 04 décembre 2003.
- [56] : A.H.Bonnett and G.C.Soukup, « Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors», IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28(4) :921_937, July/August 1992.
- [57] R.Bigret and J.L.Féron, « Diagnostic - maintenance - disponibilité des machines tournantes », édition Masson, 1995.
- [58] : A. H. Bonnett, « Cause ac motor failure analysis with a focus on shaft failures », IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36(5) :1435_1448, 2000.
- [59] : X.Huangsheng, member IEEE, H.A.Toliyat, senior member IEEE, and L.J.Peteren, member IEEE, « Five-phase induction motor drives with DSPBased control system », IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 17, No.4, pp. 524-533, July 2002.
- [60] :Y.Zhao and Th.A.Lipo, « Modeling and control of a multi-phase induction machine with structural unbalance », Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1996. APEC'96, Conferenc Proceedings 1996, eleventh annual volume 1, p 380-386, March1996.
- [61] : B.A.Welchko,T.M.Jahns and Hitis, « synchronous machine drive response to a single phase open circuit fault», IEEE Transaction on power electronics, vol.17, issu5, 2002.

- [62]: J.P.Martin, F.Meibody-Tabar, B.Davat, «multiple phase permanent magnet synchronous machine supplied by VSIS, working under fault conditions», CDROM, IAS2000.
- [63]: H.A.Toliyat, «Analysis and simulation of five phase variable speed induction motor drives under asymmetrical connections», IEEE transactions on power electronics, vol 13 n°4, pp 748-756, 1998.
- [64]: J.Figueroa, J.Cros, P.Viarouge, « Poly-phase PM brushless DC motor for high reliability application», September, Toulouse, CDROM, EPE 2003.
- [65]: E.Robert-Dehault, M.F Benkhoris, E.Semail, «Study of 5-phases synchronous machine fed by PWM inverters under fault conditions», CDROM, ICEM 2002.
- [66]: H.Xu, H.A.Toliyat, L. J. Peteren, « Modeling and control of five- phase induction motor under asymmetrical fault conditions», Electric Machines & Power Electronics Laboratory Texas A&M University, IEEE 2001
- [67]: M.F.Benkhoris, N.Tali-Maamar, F.Terrien, «Decoupled control of double star synchronous motor supplied by PWM inverter: simulation and experimental results», Laboratoire Atlantique de recherche au génie Electrique (LARGE-GE44)-France, 2002.
- [68]: R.Kianinezhad, B.Nahid-Mobarakeh, member IEE, L.Baghli, F.Betin, member IEEE and G.A.Capolino, «Modeling and control of six-phase symmetrical Induction Machine Under», Fellow IEEE, 2008.
- [69] : L.SAVAY, « Force hydraulique et machines à eau dans l'Antiquité romaine », actes du colloque international Pont du Gard, 20-22 sept. 2006
- [70] : G.Lemasson, « les machines transformatrices d'énergie », tome2, Delagrave, 1982.
- [71]: J.M.Hirtz, « Les stations de pompage d'eau », 6^e édition, Association Scientifique et Technique pour l'eau et l'environnement, éditions Lavoisier TEC & DOC 1991.
- [72] : Technique de l'ingénieur, « mécanique et chaleur, pompes, vide, air comprimé, NB4 », Paris, 1988
- [73] : A.Betka, « optimisation d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil », thèse de magister, centre universitaire, Biskra, 1997.
- [74] : T.Toufik , « Etude de l'influence de la géométrie de l'aubage et de vitesse de rotation de la roue sur les caractéristiques d'une pompe centrifuge », Thèse de magister UHBC, 2000.
- [75] : B.Chikh-Bled et O.Sebbane, « Mise au point d'un banc d'essais : installation de pompage d'eau », mémoire d'ingénieur d'état, Institut de Génie Mécanique, 1996.
- [76] : S.Kazmierczak, P.Anglaret, J.Fillipini, « Technologie Génie Chimique tome 1 », édition CRDP d'Amiens, 2001.
- [77] : M.Hamel , « Etude des performances d'une volute de turbine radiale ou semi axiale », Magister USTO, Oran 2005.
- [78]: B.Equer, « Le Pompage Photovoltaïque : Manuel de cours énergie solaire photovoltaïque», édition Ellipses 1993.
- [79] : J.Royer, T.Djiako, E.Schiller, B.S.Sy « Le pompage photovoltaïque », Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens Bibliothèque nationale du Canada, 1998,
- [80] : M.Arrouf, « Optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompe branché sur un générateur photovoltaïque », Doctorat électronique, Constantine, 2007.
- [81] : K.Benlarbi, « Optimisation floue, neuronale et neuro-floue d'un système de pompage photovoltaïque entraînées par différents machines électriques », Thèse de magister, université de Batna 2003.
- [82] : T.Adamt, « Les Turbopompes », édition Eyrolles, Paris,1976.
- [83] : J. Royer, T. Djiako, « Le Pompage Photovoltaïque », Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, université d'Ottawa/EIER /CREPA, 1998.
- [84]: N.Nooma, S.Taaba, « Groupe motopompe », mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, 2004.
- [85] : A.SAADI « étude comparatif entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque », mémoire de magister en électronique, université Mohamed Khider, Biskra, 2001.

- [86]: A.Moussi, A.Saadi, « étude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque », LARHYSS Journal, n°01, mai 2002.
- [87]: R.P.Mukund, « Wind and solar power systems », PhD, université Merchant Marine, 1999.
- [88]: R.Maouedj, « application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et Bouzaréah », mémoire de magister, université de Tlemcen, 2005
- [89]: A.Dominique, « Cours de mécanique des fluides et agitation », université Henri Poincaré, 2004.
- [90]: K.Benlarbi, « optimisation floue, neuronale et neuro-floue d'un système de pompage photovoltaïque entraînées par différentes machines électriques », thèse de magister université de Batna, 2003
- [91]: A.Meflah, « Modélisation et commande d'une station de pompage photovoltaïque », mémoire magister, université Tlemcen, 2001.
- [92]: J.Royer, T.Djiako, « Le pompage photovoltaïque », manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, Institut de l'Énergie des Pays ayant en commun l'usage du Français, Québec Canada, 1998.
- [93]: P. Schulhof, D. Ballay, « Les stations de pompage d'eau 5^e édition », Travaux de la commission de distribution de l'eau de l'AGHTM, Editions TEC& DOC, Paris, 2000.
- [94]: Flygt Industries, « Eau et assainissement », water and waste water products.02.05.Fr.1,5 M.11.04 892358 Trosa Tryckeri AB 50477, 2005.
- [95]: P.Scherrer Institut, « Le point sur l'énergie », PSI n° 13, mai 2005
- [96]: C.Ruhl, « BP statistical review of world energy 2007 », BP report June 2007
- [97]: S.M.Ait-Cheikh, « Etude, investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques », Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
- [98]: J.Royer, T.Djiako, E.Schiller, B.D.Sy, « Le Pompage photovoltaïque », IEPF, université d'Ottawa, EIER, CREPA., TJ912.pp.65, 1998.
- [99]: T.Benlatreche, « Effets thermo-radiatifs et caractérisation microclimatique des cours intérieures dans les édifices publics », magister architecture, université de Constantine, 2006.
- [100]: B.Azoui, « Concept and realization of three-phase brushless DC motor (BLDCM) for solar application », Thèse Doctorat, université de Batna, mai 2002
- [101]: Y.PANKOW, « Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension », Thèse de Doctorat de l'école nationale d'Arts et Métiers Lille, déc.2004.
- [102]: Ministère Algérien de l'Énergie et des Mines, Direction des Énergies Nouvelles et Renouvelables, « Énergie photovoltaïque », Guide des Énergies Renouvelables, édition 2007
- [103]: A.Maouch, « étude et identification paramétrique d'une cellule photovoltaïque organique », magister en microélectronique, université de Batna, 2011
- [104]: O.Gergaud, B.Multon, H.Benahmed, « Analysis and experimental validation of various photovoltaic system models », 7th international electrimecs congress, Montréal, août 2002.
- [105]: M.Tivanov, A.Patryn, N.Drozdo, A.Fedotov and A.Mazanik, « Determination of solar cell parameters from its current-voltage and spectral characteristics », Solar Energy Mater Solar cells, volume 87, pp.457-165, 2005.
- [106]: E.Radziemska, « Dark I-U-T measurements of single crystalline silicon solar cells », Energy Conversion .Management, Vol.46, pp.1485-1494, 2005.
- [107]: H.S.Rauschenbach, « Solar Cell Array Design Handbook », Van Nostrand-Reinhold, NY, 1980.
- [107-a]: W.Xiao, W.G. Dunford and A.Capel, « a novel modeling method for photovoltaic cells », IEEE Power electronics specialists conference, PESC, Germany, 2004.
- [108]: B.Lee and M.Ehsani, « Advanced simulation model for brushless dc motor drives », Electric Power Components and systems 31, pp. 841–868, 2003.
- [109]: J.Hindmarch, « Electrical machine and their applications », 4th edition, New York, Pergamon press; 1984

- [110]: Y.Pankow, « Etude de l'intégration décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque », Thèse de Doctorat, France, Lille, décembre 2004.
- [111]: M.Djarallah, « contribution a l'étude des Systèmes photovoltaïque résidentiels couples au réseau électrique », Thèse de Doctorat en sciences à l'université de Batna 2008.
- [112]: A.B.Learreta, « Réalisation de Technique MPPT numérique », Rapport de stage projet de fin d'études Ingénieur Technique Industrielle, , Université Virgile, Septembre 2006
- [112-a]: P.Sabatier, « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie », université de Toulouse III, Décembre 2003.
- [113]: M. Chakaroun, « Evaluation de nouveaux concepts d'encapsulation de cellules solaires organiques pour l'amélioration de leur durée de vie », université de limoges, 2010.
- [114]: A.Labouret, M.Villoz, « Energie solaire photovoltaïque », Livre 3^{ème} édition DUNOD, Décembre 2007,
- [115]: A.C.Postor, « Evaluation comparative de chargeurs de batteries pour systèmes photovoltaïques », Projet de fin d'études, université Toulouse, septembre 2002.
- [116]: J.Royer, T.Djiako, « Le Pompape Photovoltaïque », Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, université d'Ottawa/EIER /CREPA, 1998.
- [117]: B.Nouhou, « Conception technico-économique d'un système de pompape autonome photovoltaïque-aérogénérateur », mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de maîtrise en sciences appliquées en génie électrique, 1999.
- [118]: O.Gérgaud, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Thèse de doctorat, école normale supérieure de Cachan, 2002.
- [118-a]: M.Oukachmih, « Les cellules photovoltaïque à base de matériaux organiques discotiques », Thèse de doctorat, université de Paul Sabatier, 2003.
- [119]: T.Diveux, « Implantation d'un système éolien, optimisation algorithmes génétiques », thèse de l'ENSAM (LEPT) soutenue le 29 septembre 2000
- [120]: S.Petibon, «Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 2000.
- [121]: H.N.Zainudin, S. Mekhilef, « Comparaison study of maximum power point tracker techniques for PV systems », Proceeding of the 14th International middle east power systems conference (MEPCON'10), Cairo university, Egypt, december 19-21,2010.
- [122]: J.P.Ferreux, F.Forest, « Alimentation à découpage », Troisième, édition, 2003.
- [123]: C.Chabert, A.Rufer, « Optimisation des convertisseurs de puissance embarqués : Adaptation des Cellules à Lien Alternatif MF et Commutation Douce », Electronique de Puissance du Futur, actes du 8^è colloque, Lille, France, nov./déc. 2000
- [124]: H.Tamrabet, « Robustesse d'un contrôle vectoriel de structure minimale d'une machine asynchrone », Thèse de magister, Université de Batna, 2006.
- [125]: P.Silvestre, «Fundamentos de Hidráulica General», Limusa, Mexico, p381, 1983.
- [126]: A.Hadj Arab, M.Benghanem et A.Gharbi « Dimensionnement des Systèmes de Pompape Photovoltaïque », CDER. Revue des énergies renouvelables. 2005
- [127]: A.Hoque, K.A. Wahid, « New mathematical model of a photovoltaic generator », Journal of Electrical Engineering Vol. EE 28, No. 1, June 2000.
- [128]: B.Mazhari, «An improved solar cell circuit model for organic solar cells», Sol.Energy Mater.Sol.Cells 90 (2006) 1021-1033, 2006.
- [129]: A.Labouret, M.Villoz, « Energie solaire photovoltaïque », Livre 3^{ème} édition DUNOD, Décembre 2007.
- [130]: C.Dumbs, « Développement d'outils pour l'analyse des systèmes hybrides photovoltaïque-diesel », thèse de l'école des mines de Paris, 20 décembre 1999.
- [131]: K.Reguieg, A.Issaad, « Sahara Solar Breesder », 2^e symposium académique ALGERIE-JAPON à Oran, article du journal Liberté, édition du 18,19 mai 2012.

ANNEXES

ANNEXE I

TRANSFORMATIONS UTILES POUR L'ÉTUDE DES MACHINES ÉLECTRIQUES

A1.1 Transformation triphasée – diphasée :

Le but de cette transformation est de passer d'un système « a-b-c » en un système diphasé équivalent « $\alpha - \beta$ » comme le montre la figure A1.1

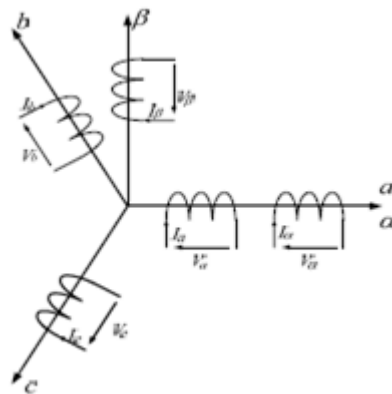


Figure (A1.1)
Représentation schématique d'une transformation triphasée - biphasée

L'axe « α » étant confondu avec l'axe « a »

Il existe deux types de transformation vers le repère « $\alpha - \beta$ » :

La transformation de Clarke qui conserve l'amplitude, mais pas la puissance, ni le couple (le rapport 3/2).

La transformation de Concordia qui conserve la puissance mais pas l'amplitude des grandeurs de phases (rapport $\sqrt{3}/2$).

Soit une grandeur triphasée « $X_{a,b,c}$ », la grandeur diphasée « $X_{\alpha,\beta,0}$ » donnée par la transformation de Concordia sera :

$$X_{\alpha,\beta,0} = \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_o \end{bmatrix} = T_{32} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = T_{32} \cdot X_{a,b,c} \quad \dots \dots \dots (A1.1)$$

$$\text{Avec } T_{32} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad \dots \dots \dots (A1.2)$$

T_{32} est la matrice de passage de Concordia et x_0 est la composante homopolaire.

- Pour passer des grandeurs diphasées aux grandeurs triphasées, il suffit de multiplier $X_{\alpha,\beta,0}$ par la matrice $T_{23}=T_{32}^{-1}$
- Le choix d'une matrice normée (Concordia) est souvent utilisé pour des raisons de symétrie des transformations directe et inverse.
- La matrice de passage de Clarke est donnée :

$$T_{32} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (A1.3)$$

A1.2 transformation de Park

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée – diphasée et d'une rotation. Elle permet de passer du repère « a-b-c » vers le repère « α - β » puis vers le repère « d-q »

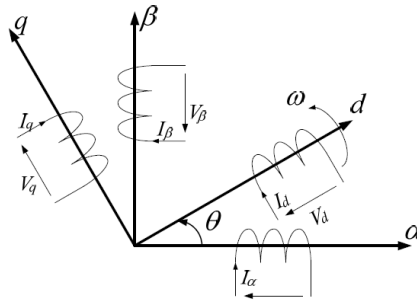


Figure (A1.2)
Représentation schématique d'une transformation de

Le repère « α - β » est un repère fixe par rapport au repère « a,b,c » alors que le repère « d-q » est un repère tournant. L'angle que forme le repère « d-q » avec le repère « α - β » est appelé angle de transformation ou angle de Park.

La matrice de passage est donnée par :

$$P(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ \sin\theta & -\cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (A1.4)$$

Cette matrice de rotation $p(\theta)$ conserve les équivalences énergétiques et magnétiques instantanées et donne les grandeurs continues.

- La transformation inverse $P(\theta)^{-1}$ est utilisée pour obtenir les grandeurs (α - β) à partir des grandeurs « d-q ».
- la transformation $T_{32} \times P(\theta)$ est utilisée pour obtenir les grandeurs « d-q » directement à partir des grandeurs « a,b,c ».

ANNEXE II

AII.1/ PARAMÈTRES DE LA MACHINE ASYNCHRONE À DOUBLE ÉTOILE

Puissance nominale	$P_n = 4,5 \text{ kW}$	Résistance rotorique	$R_r = 2,12 \Omega$
Tension nominale	$V_n = 220 \text{ V}$	Résistance des enroulements de la première étoile statorique	$R_{s1} = 3,72 \Omega$
Courant nominale	$I_n = 6,5 \text{ A}$	Résistance des enroulements de la deuxième étoile statorique	$R_{s2} = 3,72 \Omega$
Nombre de paires de pôles	$p = 1$	Inductance des enroulements de la première étoile statorique	$L_{s1} = 0,022 \text{ H}$
Moment d'inertie	$J = 0,0625 \text{ kg.m}^2$	Inductance des enroulements de la deuxième étoile statorique	$L_{s2} = 0,022 \text{ H}$
Coefficient de frottement	$K_f = 0,001 \text{ Nms/rd}$	Inductance rotorique	$L_r = 0,006 \text{ H}$
Fréquence nominale	$F = 50 \text{ Hz}$	Inductance mutuelle	$L_m = 0,3672 \text{ H}$

AII.2/ PARAMÈTRES DE LA POMPE CENTRIFUGE

Vitesse nominale ω_n	2935 tr/mn
Inertie de la pompe	0,02 Kg.m ²
Débit nominal	21 m ³ /h
Hauteur nominale	12 m
Constante k_0	$4.923410^{-3} \text{ m}/(\text{rad}/\text{sec})^2$
Constante k_1	$1.5826.10^{-5} \text{ m}/(\text{rad}/\text{sec})(\text{m}^2/\text{sec})$
Constante k_2	$-18144 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{sec})^2$

AII.3 PARAMÈTRES DE LA CANALISATION

Hauteur géométrique	$H_g = 10 \text{ m}$
Longueur de la canalisation	$L = 7,4 \text{ m}$
Diamètre de la canalisation	$d = 0,06 \text{ m}$
Coefficient de pertes de charge locales ou singulière	$\xi = 6,3 \text{ m}$
Coefficient de pression de la canalisation	$\lambda = 0,039 \text{ m}$
Gravitation	$g = 9,81 \text{ m}^2/\text{s}$

AII.4 CARACTÉRISTIQUES D'UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE

Les constructeurs des modules photovoltaïques fournissent les paramètres du module « I_{CC} », « I_{OP} », « V_{CO} », « V_{OP} », sous les conditions standards de fonctionnement, avec un éclairement de 1000 W/m^2 et une température de jonction de 25°C .

Panneau solaire de type SIEMENS SM 110-24.

Paramètre	Valeur
Puissance maximale du panneau. « P_{OP} »	110 W
Courant au point de puissance maximale. « I_{OP} »	3,15 A
Tension au point de puissance maximale. « V_{OP} »	35 V
Courant de court-circuit. « I_{CC} »	3,45 A
la tension en circuit ouvert. « V_{CO} »	43,5 V
Coefficient d'incrémentation du courant I_{CC} . « α_T »	1,4 mA/°C
Coefficient d'incrémentation de la tension V_{CO} . « B_T »	-152 mV/°C

الملخص:

المحرك الغير متزامن ثلاثي الأطوار المغذى بواسطة موج التوتير عبارة عن نظام دوّار ذو مزايا متعددة و لكن محدود لمستويات معينة من الإستطاعة، بسبب الإجهادات الكهربائية المتحملة من طرف أشباه النواقل و كذا تواترها الضعيف في التبديل. من أجل مستويات عالية من الإستطاعة، يستحسن استعمال آلات ذات عدد أطوار أكبر من ثلاثة. المحرك الغير متزامن ذو ملفين ثابتين يقدم استطاعة مجزئة حيث يستعمل أشباه نواقل ذو توترات عالية، الشيء الذي يسمح بتقليل الترددات خاصة تلك الناتجة في العزم الكهرومغناطيسي.

في هذا البحث قمنا بدراسة المحرك الغير متزامن ذو ملفين ثابتين المغذى أولاً مباشرة من طرف الشبكة ثم بواسطة موج للتوتير. ثقة هذا المنفذ تبرز في امكانية التشغيل في حالة خلل أو انقطاع إحدى أطوار التغذية.

الإيجابيات المتعددة التي تقدمها الآلات المتعددة الأطوار، دفعت إلى استعمال المحرك الغير متزامن ذو ملفين ثابتين في تقديم حركة دورانية للمضخات الطاردة مركزياً و استخلاص المميزات المختلفة الميكانيكية و الكهربائية. التطور الملحوظ في تقنيات استعمال الطاقات المتجددة، احفزنا في استعمال الطاقة الشمسية في ضخ المياه أين يجب أولاً تقييم جل المقادير الداخلة في سلسلة الضخ ثم دراسة سلوك هذه المنشأة.

كلمات مفتاحية:

محرك غير متزامن ذو ملفين ثابتين، موج، التحكم في حالة خلل، ضخ المياه، الطاقات المتجددة، الضخ بالطاقة الشمسية.

Résumé :

Le moteur asynchrone triphasé, alimenté par onduleur de tensions, est un système d'entraînement possédant de nombreux avantages, mais, limité à une certaine gamme de puissance, à cause, des contraintes électriques subies par les semi-conducteurs et de leurs faibles fréquences de commutation.

Afin d'assurer des systèmes de motorisation pour des applications de fortes puissances, l'utilisation de machines, ayant un nombre de phases supérieur à trois, s'avère comme une solution inévitable. La machine asynchrone à double étoile est l'alternative, par excellence, qui offre une segmentation de la puissance mise en jeu ainsi que l'utilisation de composants ayant une haute fréquence de commutation, ce qui réduit, considérablement, le taux d'harmoniques, notamment, celui du couple.

Ce thème présente une étude de la MASDE alimentée, directement, par le réseau électrique, puis, par des onduleurs de tensions. La fiabilité de ce genre d'actionneur est assurée par le fait qu'un fonctionnement en mode dégradé est possible, où, une ou plusieurs phases d'alimentation du moteur soient en défauts.

Les multiples avantages, que les machines multiphasées offrent, ont encouragé l'utilisation du moteur asynchrone à double étoile pour entrainer la pompe centrifuge. L'étude du comportement de l'ensemble MASDE-Pompe a permis de mettre en évidence les différentes caractéristiques hydrauliques, mécaniques et électriques.

L'avancée spectaculaire de l'emploi des énergies renouvelables au niveau mondial, est le catalyseur principal pour tester les performances du pompage photovoltaïque, avec au préalable, le dimensionnement des différents organes constituant la chaîne de pompage.

Mots clés :

Machine asynchrone à double étoile, onduleur MLI, Commande en mode dégradé, Pompage d'eau, énergies renouvelables, Pompage photovoltaïque.

Summary :

The three-phase asynchronous engine, fed by inverter of tensions, is a system of training having numerous advantages, but, limited to a certain range of power, because, electric constraints supported by semiconductors and their weak frequencies of switching.

To insure systems of motorization for applications of strong capacities, the use of machines, having an upper number of phases for three, is an inevitable solution. The asynchronous machine with double star is the alternative, which offers a segmentation of the power as well as the use of components having a high frequency of switching, what reduces, considerably, the rate of harmonious, in particular, that of the torque.

This theme presents a study of the DSIM fed, directly, by the electricity network, then, by the inverters of tensions. The reliability of this kind of engine is insured by the fact that functioning in degraded mode is possible, where, one or several phases of the engine are disconnected.

The various advantages, that multi-phased machines offer, encouraged the use of the DSIM for turning the centrifugal pump. The study of the behavior of the MASDE - PUMP allowed highlighting the various hydraulic, mechanical and electric characteristics.

The spectacular advance of the use of the renewable energies at the world level is the main catalyst to test the performances of the photovoltaic pumping, with beforehand, the sizing of the various pumping organs.

Keywords:

Dual stator induction motor (DSIM), control in degraded mode, inverter MLI, Pumping of water, renewable energies, photovoltaic Pumping.