

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE A. MIRA – BEJAIA



Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme Master en électromécanique

Spécialité : Maintenance industrielle

Thème

Étude d'une machine asynchrone a doublé étoile dédiée au pompage photovoltaïque

Réaliser par :

- ZIANI Anis

Encadré par :

- ADJATI Arezki

Examiné par :

- Mr. BERBOUCHA
- Mr. SAOU

Année Universitaire : 2021-2022

Remerciements

J'aimerais remercier avant tout, Dieu Clément et Miséricordieux le Tout-Puissant, de m'avoir donné la force et la puissance pour pouvoir mener ce travail à terme.

Je remercie, mon encadreur ADJANI Arezki pour l'honneur qu'il m'a fait en assurant le suivi du présent mémoire, et sa disponibilité tout au long de la réalisation de ce dernier, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il m'a consacré et sans lui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes recherches en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions...

Mes sincères reconnaissances à mes enseignants du département : maintenance industrielle.

Je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de

Loin à la réalisation de ce mémoire.

Enfin je remercie ma famille ZIANI.

Dédicaces

J'ai toujours pensé faire ou offrir quelque chose à mes parents en signe de reconnaissance pour tout ce qu'ils ont consenti comme efforts rien que pour me voir réussir, et voilà l'occasion est venue.

A ceux qui m'ont donné la vie, symbole de beauté, de fierté et de sagesse.

A ceux qui sont la source de mon inspiration et de mon courage, à qui je dois de tout.

A mes chers parents la lumière de ma vie et A mes frères ; A ma douce Sonia, ma compagne de toujours.

Zui était là dans mes moments de doute.

Zui a su toujours me remotiver et me guide dans mon travail.

A mes amis de long date Adel, Lamine et Ghilas.

Toujours là pour m'épaule et m'aider.

Anis ziani

Table des matières

<i>Remerciements</i>	<i>I</i>
<i>Dédicaces</i>	<i>II</i>
<i>Table des matières</i>	<i>III</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>VII</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>X</i>
<i>Liste des abréviations</i>	<i>XI</i>
<i>Introduction générale</i>	<i>1</i>
<i>I Modélisation de la machine asynchrone à double étoile</i>	<i>3</i>
I.1 Introduction	4
I.2 Caractéristiques des machines multiphasées	4
I.2.1 Machines Multiphasées de type 1	4
I.2.2 Machines Multiphasées de type 2	6
I.3 Avantages des machines multiphasées	6
I.3.1 Segmentation de puissance	7
I.3.2 La fiabilité	7
I.3.3 Minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques	7
I.3.4 Amélioration du facteur de puissance	7
I.4 Inconvénients des machines multiphasées	7
I.5 Modélisation de la machine asynchrone à double étoile	8
I.5.1 Description de la machine asynchrone à double étoile	8
I.5.2 Hypothèses simplificatrices	8
I.5.3 Modèle de la machine asynchrone à double étoile	9
I.5.3.1 Equation électrique	9
I.5.3.2 Equations magnétiques	11
I.5.3.3 Equation magnétique développée de la MASDE	12
I.5.3.4 Energie magnétique	12
I.5.3.5 Couple électromagnétique	12
I.5.3.6 Equation mécanique	12
I.6 Transformation de base de Park	13
I.6.1 Application de la transformation de PARK à la MASDE	13
I.6.2 Equations des tensions	14
I.6.3 Equations magnétiques	16
I.6.4 Equation mécanique	16

I.6.4.1	Puissance instantanée -----	16
I.6.4.2	Couple électromagnétique-----	17
I.7	Mise sous forme d'équations d'état :-----	18
I.8	Simulation et interprétation -----	19
I.8.1	Simulation de la MASDE alimentée par des sources de tensions sinusoïdales -----	19
I.8.1.1	Résultat de la simulation-----	20
I.8.2	Simulation de la MASDE alimentée par des onduleurs de tension -----	23
I.8.2.1	Commande par modulation des largeurs d'impulsions sinus-triangle -----	24
I.9	Conclusion -----	28
II	<i>Etude de la source photovoltaïque</i>-----	29
II.1	Introduction -----	30
II.2	L'énergie du soleil-----	30
II.3	Le système photovoltaïque -----	31
II.3.1	Principe de fonctionnement-----	31
II.3.2	Les différents types de cellules solaires -----	32
II.4	Paramètres essentiels caractérisant une cellule photovoltaïque-----	33
II.4.1	Courbe courant-tension d'une cellule PV -----	33
II.4.2	Courant de court-circuit -----	33
II.4.3	Tension de circuit ouvert-----	34
II.4.4	Facteur de forme -----	34
II.4.5	Le rendement -----	34
II.5	Modélisation du générateur photovoltaïque (GPV)-----	35
II.5.1	Cellule idéale -----	35
II.5.2	Modèle à une diode -----	36
II.6	Association des cellules photovoltaïques -----	39
II.6.1	Association en série des cellules -----	39
II.6.2	Association en Parallèle des cellules photovoltaïques-----	40
II.7	Générateur photovoltaïque-----	40
II.8	Composants d'un système de pompage photovoltaïque-----	41
II.8.1	Modélisation du générateur photovoltaïque -----	42
II.8.2	Convertisseur à pilotage MPPT -----	44
II.8.3	Modélisation du hacheur Buck-Boost -----	45
II.8.4	Modélisation du filtre-----	47
II.9	Conclusion -----	47
III	<i>Etude de la machine asynchrone à double étoile en mode dégrade</i> --	48
III.1	Introduction -----	49
III.2	Etat de l'art du mode dégrade -----	49
III.3	Etude des éventuels défauts -----	50
III.3.1	Défaut d'ouverture d'un transistor de puissance-----	50
III.3.2	Défaut de fermeture d'un transistor de puissance ou fusion d'un fusible -----	51
III.3.3	Stratégie de déconnection d'une phase à un bras en défaut -----	52

III.4	Stratégie de commande en mode dégradé	52
III.4.1	Modification du courant d'une phase encore saine par phase ouverte	53
III.4.1.1	Présentation de la méthode	53
III.4.2	Modification du courant dans chacune des phases encore saines	55
III.4.2.1	Présentation de la méthode	55
III.4.3	Comparaison entre les deux méthodes	56
III.5	Commande d'une machine asynchrone double étoile en mode dégradé	56
III.5.1	Modèle de la MASDE dans le repère « α - β »	56
III.5.2	Equations électriques de la MASDE	57
III.5.3	Matrice de transformation	57
III.5.4	Equation dans le repère « α - β »	59
III.5.5	Equation dans l'espace « Z »	60
III.5.6	Equation mécanique	60
III.6	Réduction des oscillations du couple	61
III.7	Simulation et interprétation des résultats de la MASDE en mode dégrade	61
III.7.1	Simulation pour une phase Sa1 déconnectée	61
III.7.2	Simulation d'un défaut de deux phases	64
III.7.2.1	Simulation pour deux phase « Sa1 » et « Sb1 » de la même étoile déconnectée	64
III.7.3	Simulation d'un défaut de de trois phases	65
III.8	Analyse et résultats des différentes simulations	68
III.9	Conclusion	69
IV	<i>Application au pompage photovoltaïque</i>	70
IV.1	Introduction	71
IV.2	Généralités	71
IV.3	Principe de fonctionnement	72
IV.4	Caractéristiques et lois de similitude	74
IV.4.1	La variation de la vitesse de rotation	75
IV.5	Eléments de base pour le calcul et le choix des pompes	75
IV.5.1	La hauteur manométrique totale d'élévation HMT	75
IV.5.2	Hauteur d'aspiration	76
IV.5.3	Pertes de charge	76
IV.5.4	Hauteur totale de pompage	77
IV.5.4.1	Pertes de charge linéaires	77
IV.5.4.2	Pertes de charge singulières (locales)	77
IV.6	Puissance d'une pompe	78
IV.7	Le phénomène de cavitation	78
IV.7.1	Notion du NPSH	79
IV.8	Caractéristique de la pompe centrifuge	81
IV.8.1	Caractéristique « Débit – Vitesse »	81
IV.8.2	Caractéristique « Couple-Vitesse »	81
IV.8.3	Caractéristique « Débit-Hauteur »	82
IV.8.4	Caractéristique de rendement de la pompe	82

IV.9	Application de la MASDE au Pompage	83
IV.9.1	Modélisation de la pompe centrifuge	83
IV.9.1.1	Bloc de simulation de la pompe centrifuge	83
IV.9.1.2	Lois de similitude	83
IV.9.2	Bloc de simulation globale de la MASDE- Pompe centrifuge	84
IV.9.3	Simulation numérique et interprétation des résultats	84
IV.9.3.1	Couple du moteur – Couple résistant	84
IV.9.3.2	Vitesse de synchronisme – vitesse de rotation	85
IV.9.3.3	Caractéristique « Couple – Vitesse de rotation »	85
IV.9.3.4	La caractéristique « Débit – Vitesse de rotation »	86
IV.9.3.5	Evolution du Débit	86
IV.9.3.6	Caractéristique « Débit – Hauteur manométrique totale »	87
IV.9.3.7	Caractéristique « Hauteur manométrique totale – Vitesse de rotation »	87
IV.10	Dimensionnement pratique de la pompe centrifuge	88
IV.10.1	Puissance de la pompe	88
IV.10.2	Vitesse de l'eau dans les tuyauteries	88
IV.10.3	Hauteur nette d'amorçage	88
IV.11	Avantages et inconvénients des pompes centrifuges	89
IV.11.1	Avantages	89
IV.11.2	Inconvénients	89
IV.12	Domaines d'utilisation	89
<i>Conclusion générale</i>		91
<i>Annexe</i>		92
<i>BIBLIOGRAPHIE</i>		96
<i>Résumé</i>		97

Liste des figures

Figure I.1: Représentation des enroulements de la machine asynchrone double étoile	8
Figure I.2: Représentation schématique du modèle de PARK de la MASDE.....	13
Figure I.3 : Deux sources de tensions triphasées décalées de 30°	20
Figure I.4 : Vitesse de rotation & vitesse de synchronisme.....	20
Figure I.5 : Couple électromagnétique & couple résistant	21
Figure I.6 : Flux rotorique	21
Figure I.7 : Courants direct et en quadrature	21
Figure I.8 : Courant statoriques	22
Figure I.9 : M.L. I sinus-triangle dont $r = 0.8$ et $m = 21$	24
Figure I.10 : Tension simple V_{an1}	25
Figure I.11 Intersection tensions de référence et la porteuse.....	25
Figure I.12 : Vitesse de rotation & vitesse de synchronisme.....	26
Figure I.13 : Couple électromagnétique & couple résistant	26
Figure I.14 : Flux direct & flux rotorique en quadrature	26
Figure I.15 : Courant direct & Courant en quadrature.....	27
Figure I.16 : Courant statoriques	27
Figure II.1 : Composantes du rayonnement solaire au sol	30
Figure II.2 : Le principe de fonctionnement de l'énergie photovoltaïque.	31
Figure II.3 : Exemple de cellules photovoltaïques	32
Figure II.4 : Caractéristique d'une cellule photovoltaïque	33
Figure II.5 : Courant de court-circuit	33
Figure II.6 : La tension de circuit ouvert	34
Figure II.7 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale.....	35
Figure II.8 : Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle à une diode.....	36

Figure II.9 : Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle à deux Diode.....	38
Figure II.10 : Caractéristique résultante d'un groupement en série de ns cellules identiques.....	39
Figure II.11 : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de np cellules identiques ..	40
Figure II.12 : Cellules, modules et champ panneaux photovoltaïques	41
Figure II.13 : Schéma de l'installation photovoltaïque	42
Figure II.14 : Schéma électrique du « modèle à deux diodes » pour un modules photovoltaïque ..	42
Figure II.15 : Schéma Bloc du Générateur Photovoltaïque.....	43
Figure II.16 : Algorithme de la méthode PO	45
Figure II.17 : Schéma du Hacheur Buck - Boost.....	46
Figure II.18 : Schéma du filtre passe.....	47
Figure III.1 : Défaut d'ouverture d'un transistor de puissance	51
Figure III.2 : Fusion d'un fusible ultra rapide.....	51
Figure III.3 : Exemple d'équipement permettant la déconnection d'une phase à un bras en défaut via un triac	52
Figure III.4 : Transformation équivalente de la machine asynchrone double étoile de la base « a ₁ a ₂ b ₁ b ₂ c ₁ c ₂ à « ab ».....	57
Figure III.5 : Schéma électrique équivalent de la machine asynchrone double étoile en mode dégradé.....	60
Figure III.6 : deux sources de tensions triphasées.....	62
Figure III.7 : Vitesse de rotation et de synchronisme.....	62
Figure III.8 : Couple électromagnétique et couple résistant	62
Figure III.9 : Courants statoriques (à vide et en charge).....	63
Figure III.10 : Vitesse de rotation et de synchronisme.....	64
Figure III.11 : Couple électromagnétique et couple résistant	64
Figure III.12 : Courants statoriques (à vide et en charge).....	65
Figure III.13 : Vitesse de rotation et de synchronisme.....	66
Figure III.14 : Couple électromagnétique et couple résistant	66
Figure III.15 : Courants statoriques (à vide et en charge).....	66

Figure III.16 : Vitesse de rotation et de synchronisme.....	67
Figure III.17 : Couple électromagnétique et couple résistant	67
Figure III.18 : Courants statoriques (à vide et en charge)	67
Figure IV.1 : Classification des pompes hydrauliques	72
Figure IV.2 : Diffèrent type de rotor	73
Figure IV.3 : Pompes centrifuge.....	73
Figure IV.4 : Dégât de cavitation sur une pompe	79
Figure IV.5 : Courbe NPSH	80
Figure IV.6 : Caractéristiques « débits – vitesses » d’une pompe centrifuge.....	81
Figure IV.7 : Caractéristiques « Couple – Vitesse » d’une pompe centrifuge.	81
Figure IV.8 : Caractéristiques « Hmt – Débit ».....	82
Figure IV.9 : Caractéristiques du rendement	83
Figure IV.10 : Bloc de Simulation de la Pompe Centrifuge (1)	83
Figure IV.11 : Bloc de Simulation de la Pompe Centrifuge (2)	83
Figure IV.12 : Bloc de simulation global de la MASDE couplée à la Pompe Centrifuge.....	84
Figure IV.13 : Couple moteur –couple pompe	84
Figure IV.14 : Vitesse de synchronisme et de rotation.....	85
Figure IV.15 : Caractéristique « Couple-Vitesse de rotation ».....	85
Figure IV.16 : Caractéristique « Débit-Vitesse de rotation »	86
Figure IV.17 : Evolution du débit.....	86
Figure IV.18 : Caractéristique « Débit – Hauteur manométrique totale ».....	87
Figure IV.19 : Caractéristique « Hauteur manométrique totale – Vitesse de rotation ».....	87

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Machines multiphasées de Type.-----	5
Tableau I.2 : Machines multiphasées de Type 2. -----	6
Tableau III.1 : résumé des résultats obtenus pour tous les cas étudié -----	68

Liste des 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.

I

- « Icc » : Courant de court-circuit.
- « IGBT » : Insulated-gate bipolar transistor
- « Iph » : Photon courant

« I_{sat} » : 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_{oi}, i_{di}, i_{qi} » : Courants homopolaire, directe et en quadrature de l'étoile i ($i=1,2$).
« i_{or}, 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.
« Kr » : Coefficient de proportionnalité.
« $K0, K1, K2$ » : 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.
« Lr » : Inductance propre du rotor.
« $Ls1$ » : Inductance propre du 1er stator.
« $Ls2$ » : 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.
« Md », « Mq » : 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.
« Np » : Nombre de branche en parallèle.

« NPSH » : Charge nette à l'aspiration.

« Ns » : 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.

« P_r » : Pression résiduelle.

« P_{mec} » : Puissance mécanique.

« P&O » : Perturb and Observe.

« P1,P2,P3,P4,P5 » : Constantes.

« [p(θs1)] », « [p(θs2)] », « [p(θr)] » : Matrice de Park

« [p(θs1)]⁻¹ », « [p(θs2)]⁻¹ », « [p(θr)]⁻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.

W

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

« 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.
- « s » : 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.

Introduction générale

La production d'énergie électrique est actuellement le défi le plus important des années à venir d'un point de vue écologique et économique. La demande d'énergie dans les sociétés industrielles ainsi que dans les pays en développement est en constante augmentation. Aujourd'hui, la majeure partie de la production énergétique mondiale provient de ressources fossiles non renouvelables. Ce type d'énergie entraîne des émissions de gaz à effet de serre et entraîne une augmentation de la pollution. De plus, une consommation excessive de ressources naturelles réduira les réserves de ce type d'énergie d'une manière dangereuse pour les générations futures.

Par énergie renouvelable, on entend l'énergie provenant du soleil, du vent, de la géothermie, de l'eau ou de la biomasse. Contrairement aux énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies aux ressources infinies.

L'énergie solaire est une option économique intéressante pour les sites qui ne sont pas connectés à un réseau électrique central. C'est un avantage évident si le besoin à satisfaire est faible et ne nécessite pas de maintenance importante. Les systèmes d'énergie solaire sont pleinement justifiés dans les zones rurales reculées et les pays en développement.

Une machine asynchrone à double étoile, en configuration classique à deux enroulements triphasés identiques. Les deux étoiles partagent le même stator et sont décalées de 30° . Ces enroulements ont le même nombre de pôles et fonctionnent à la même fréquence. La structure du rotor reste la même que celle de la machine triphasée.

Par conséquent, notre travail consiste à étudier le moteur asynchrone à double étoile en modes normal et dégradé. Dans le premier chapitre, nous avons commencé avec quelques généralités sur les machines multiphasées, puis la modélisation de la machine asynchrone à double étoile, dans le but de faciliter sa commande. Ensuite, nous avons alimenté la MASDE via le réseau électrique et par onduleurs de tensions commandés par la technique de modulation de largeurs d'impulsions, tous cela pour mieux comprendre le comportement de la machine. La simulation est effectuée sous l'environnement Simulink du Matlab.

Au second chapitre, nous allons présenter quelques notions sur le système photovoltaïque, l'énergie solaire ainsi que le fonctionnement physique d'une cellule photovoltaïque et les différents types de système PV.

Au cours du troisième chapitre, nous exposerons la commande en mode dégradé des machines polyphasées. L'exemple de simulation s'articule sur le cas de la machine asynchrone à double étoile fonctionnant avec une ou plusieurs phases déconnectées.

Finalement, dans le dernier chapitre nous terminerons par l'application d'une pompe centrifuge couplée à une machine asynchrone à double étoile et autre aspect du pompage en présentant les différents modèles de pompes existants, leurs conceptions et leurs propriétés.

Une conclusion générale résumera les principaux points de ce travail et offrent des perspectives pour guider les futures initiatives de développement et de recherche.

I Modélisation de la machine asynchrone à double étoile

I.1 Introduction

Les machines électriques triphasées sont de loin être les mieux connues (fabrication, technique de bobinages, alimentation, commande...) et restent les plus utilisées. Leur alimentation, maintenant classiquement réalisée par des onduleurs de tension dont les interrupteurs sont commandés en modulation de largeur d'impulsions (MLI), permettent d'obtenir des bonnes performances surtout dans le domaine de la vitesse variable.

Lors de l'augmentation de la puissance, des problèmes apparaissent tant au niveau de l'onduleur que de la machine. Les interrupteurs statiques de l'onduleur doivent commuter des courants importants et il est souvent nécessaire de placer plusieurs structures en parallèle.

A une puissance donnée, la réduction des courants à commuter passe par l'augmentation de la tension. Les onduleurs de tension à MLI imposent des gradients de tension élevés, provoquant ainsi un vieillissement accélère des isolants. L'emploi de structure multiniveaux permet alors la réduction des tensions commutées d'où l'apparition des machines ayant un nombre de phases supérieur à trois. Ces machines sont souvent appelées "machines à grand nombre de phases" ou "machines multiphasées", elles offrent une alternative intéressante à la réduction des contraintes appliquées aux interrupteurs comme aux bobinages [1, 2, 3].

I.2 Caractéristiques des machines multiphasées

Habituellement deux types de machines multiphasées se distinguent, suivant que le nombre de phases statoriques est ou non un multiple de trois [4, 5].

On peut ainsi les classer en deux groupes, que l'on nommera "machines multiphasées de Type 1" et "machines multiphasées de Type 2". De plus, on considère rarement les cas où le nombre de phases est un nombre pair, sauf si celui-ci est un multiple de trois.

I.2.1 Machines Multiphasées de type 1

Le premier type sont des machines où le nombre de phases statoriques "q" est un multiple de trois, pour qu'on puisse les grouper en " η " étoiles triphasées :

$$q = 3\eta \quad \text{avec } (\eta = 1,2,3,4 \dots \dots) \quad (\text{I.1})$$

D'où leur appellation de « machine multi étoile ».

En fonctionnement normal, il est préférable d'avoir autant de neutres que d'étoiles, c'est-à-dire " η " neutres isolés. Pour un nombre donné de phases, il est possible d'avoir plusieurs configurations suivant le décalage angulaire entre deux bobines adjacentes.

En effet, une machine double étoile dont le nombre de phases statorique $q = 6$ et les étoiles sont décalées de $\alpha = \frac{\pi}{6}$ possède des caractéristiques différentes de celles d'une machine dont les étoiles sont décalées de $\alpha = \frac{\pi}{3}$.

Pour différencier les configurations possibles, on peut introduire un nombre équivalent de phases, noté " q_α ", dont la définition est comme suit :

$$q_\alpha = \frac{\pi}{\alpha} \quad (I. 1)$$

Tableau I.1 : Machines multiphasées de Type [6].

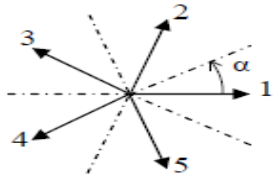
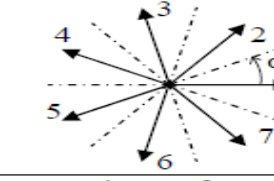
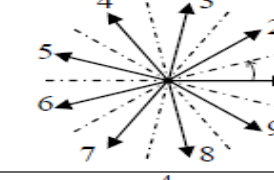
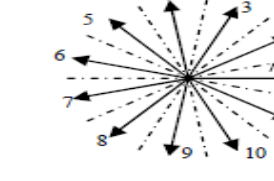
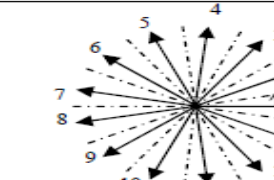
Nombre de Phases (q)	Nombre équivalent de phase (q_α)	Décalage angulaire (α) degré	Représentation des axes des bobines
3	3	$\frac{\pi}{3}$	
6	3	$\frac{\pi}{3}$	
6	6	$\frac{\pi}{6}$	
9	9	$\frac{\pi}{9}$	
12	6	$\frac{\pi}{6}$	

I.2.2 Machines Multiphasées de type 2

Pour les machines, dite de type deux, le nombre de phases statoriques "q" est un nombre impair. Ou " α " représente le décalage angulaire entre deux bobines adjacentes, les "q" phases sont alors régulièrement décalées de $\frac{2\pi}{q} = 2\alpha$. On a donc toujours :

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

Tableau I.2 : Machines multiphasées de Type 2 [6].

Nombre de Phases (q)	Nombre équivalent de phase (q _α)	Décalage angulaire (α) degré	Représentation des axes des bobines
5	5	$\frac{\pi}{5}$	
7	7	$\frac{\pi}{7}$	
9	9	$\frac{\pi}{9}$	
11	11	$\frac{\pi}{11}$	
13	13	$\frac{\pi}{13}$	

I.3 Avantages des machines multiphasées

En vue de l'intérêt grandissant pour les machines électriques ayant plusieurs nombres de phase, dû au fait qu'elles assurent un fonctionnement en mode dégradé. En

particulier la machine asynchrone double étoile' MASDE' pour différentes raisons, tels que :

I.3.1 Segmentation de puissance

L'augmentation du nombre de phases du stator conduit à la diminution du courant par phase sans que la tension ne soit impactée. De ce fait la puissance totale se répartie sur chaque phase.

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 [7].

I.3.2 La fiabilité

En cas de dysfonctionnement d'un ou de plusieurs bras de l'onduleur alimentant un moteur multiphasé, le fonctionnement dans ce mode dit "mode dégradé" est garanti tant qu'au moins trois phases restent actives. Il peut y avoir jusqu'à $(q-3)$ phases ouvertes sans qu'on les relie au neutre. De ce fait, les machines multiphasées offrent plus de degré liberté dans leur commande [8, 9].

I.3.3 Minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques

Les harmoniques du couple du rang faible et les harmoniques d'espace d'un certain rang sont éliminés et les ondulations du couple sont amorties plus rapidement 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 [10, 11, 12].

I.3.4 Amélioration du facteur de puissance

Le facteur de puissance de la machine asynchrone à double étoile se trouve amélioré [10].

I.4 Inconvénients des machines multiphasées

Le nombre de semi-conducteurs augmente avec le nombre de phases, ce qui peut éventuellement augmenter le cout de l'ensemble convertisseur- machine. Mais plus la puissance augmente, moins le problème devient signifiant [13].

L'inconvénient majeur des machines à double étoile est l'apparition de courants harmoniques de circulation lors d'une alimentation par onduleur de tension [13].

I.5 Modélisation de la machine asynchrone à double étoile

I.5.1 Description de la machine asynchrone à double étoile

La machine asynchrone à double étoile comprend deux bobinages statoriques triphasés fixes et un bobinage rotorique mobile. Les deux étoiles sont déphasées entre elles d'un angle électrique ($\alpha=30$ degrés) chacune d'elle comporte trois enroulements ; leurs axes sont décalés entre eux d'un angle électrique (120 degrés) et sont alimentés par un système de tensions équilibrées, qui en résulte la création d'un champ magnétique glissant dans l'entrefer.

Le rotor est à cage d'écureuil et constitue de barres conductrices court-circuitées par un anneau conducteur à chaque extrémité [14].

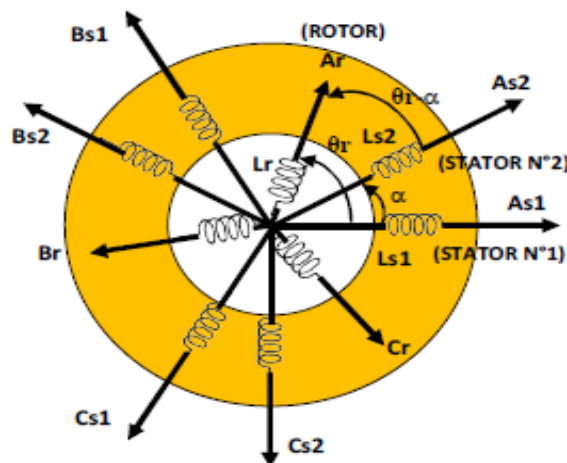


Figure I.1: Représentation des enroulements de la machine asynchrone double étoile [15]

I.5.2 Hypothèses simplificatrices

Afin de simplifier l'étude de la machine, les hypothèses suivantes sont posées : [15, 16]

- La saturation, les effets d'hystérésis des circuits magnétiques, pertes fer (hystérésis et courants de Foucault) et l'effet de peau qui augmente les résistances et réduit les inductances sont négligés ;
- Les six phases statoriques ont les mêmes caractéristiques électriques ;
- Les enroulements créent une force magnétomotrice à répartition sinusoïdale et on ne tient compte que de la première harmonique ;

- L'effet d'amortissement au rotor est négligé ;
- Le stator est supposé lisse en admettant que les irrégularités de l'entrefer liées aux encoches statoriques ont une influence négligeable.
- La répartition de l'induction le long de l'entrefer est supposée sinusoïdale ;
- L'entrefer est de largeur constante ;
- Les effets des encoches ne sont pas pris en compte.

I.5.3 Modèle de la machine asynchrone à double étoile

A partir de la représentation schématique de la MASDE dans l'espace électrique présentée dans le paragraphe précédent on peut développer un modèle mathématique dans l'espace.

I.5.3.1 Equation électrique

En tenant compte des hypothèses simplificatrices, les équations de la machine s'écrivent comme suit [15] :

❖ Pour la première étoile :

$$\begin{aligned} V_{sa1} &= R_{sa1}I_{sa1} + \frac{d}{dt}\Phi_{sa1} \\ V_{sb1} &= R_{sb1}I_{sb1} + \frac{d}{dt}\Phi_{sb1} \\ V_{sc1} &= R_{sc1}I_{sc1} + \frac{d}{dt}\Phi_{sc1} \end{aligned} \quad (I.4)$$

Sous forme matricielle on a :

$$[V_{s1}] = [R_{s1}][I_{s1}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{s1}] \quad (I.5)$$

Matrice de tension statorique on a : $[V_{s1}] = \begin{bmatrix} V_{as1} \\ V_{bs1} \\ V_{cs1} \end{bmatrix}$

Matrice de courant statorique : $[I_{as1}] = \begin{bmatrix} I_{as1} \\ I_{bs1} \\ I_{cs1} \end{bmatrix}$

Matrice de résistance du stator : $[R_{s1}] = \begin{bmatrix} R_{s1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s1} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s1} \end{bmatrix}$

Matrice de flux statorique : $[\Phi_{s1}] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa1} \\ \Phi_{sb1} \\ \Phi_{sc1} \end{bmatrix}$

❖ Pour la deuxième étoile :

$$\begin{aligned}
V_{sa2} &= R_{sa2}I_{sa2} + \frac{d}{dt}\Phi_{sa2} \\
V_{sb2} &= R_{sb2}I_{sb2} + \frac{d}{dt}\Phi_{sb2} \\
V_{sc2} &= R_{sc2}I_{sc2} + \frac{d}{dt}\Phi_{sc2}
\end{aligned} \tag{I.6}$$

Sous forme matricielle on a :

$$[V_{s1}] = [R_{s1}][I_{s1}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{s1}] \tag{I.7}$$

Matrice de tension statorique on a : $[V_{s2}] = \begin{bmatrix} V_{as2} \\ V_{bs2} \\ V_{cs2} \end{bmatrix}$

Matrice de courant statorique : $[I_{as2}] = \begin{bmatrix} I_{as2} \\ I_{bs2} \\ I_{cs2} \end{bmatrix}$

Matrice de résistance du stator : $[R_{s2}] = \begin{bmatrix} R_{s2} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s2} \end{bmatrix}$

Matrice de flux statorique : $[\Phi_{s2}] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa2} \\ \Phi_{sb2} \\ \Phi_{sc2} \end{bmatrix}$

❖ Pour le rotor :

$$\begin{aligned}
0 &= R_{ra}I_{ra} + \frac{d}{dt}\Phi_{ra} \\
0 &= R_{rb}I_{rb} + \frac{d}{dt}\Phi_{rb} \\
0 &= R_{rc}I_{rc} + \frac{d}{dt}\Phi_{rc}
\end{aligned} \tag{I.8}$$

Sous forme matricielle on a :

$$[0] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\Phi_r] \tag{I.9}$$

Matrice de courant rotorique : $[I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}$

Matrice de résistance du rotor : $[R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$

$$\text{Matrice de flux rotorique : } [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix}$$

I.5.3.2 Equations magnétiques

La relation entre les flux et les courants sous forme matricielle suivante telle que : [17]

$$\begin{bmatrix} [\Phi_{s1}] \\ [\Phi_{s2}] \\ [\Phi_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{s1s1}] & [L_{s1s2}] & [L_{s1r}] \\ [L_{s2s1}] & [L_{s2s2}] & [L_{s2r}] \\ [L_{r1}] & [L_{r2}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_{s1}] \\ [I_{s2}] \\ [I_r] \end{bmatrix} \quad (\text{I.10})$$

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

$$[L_{s1s1}] = \begin{bmatrix} (L_{s1} + L_{ms}) & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & (L_{s1} + L_{ms}) & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & (L_{s1} + L_{ms}) \end{bmatrix} \quad (\text{I.11})$$

$$[L_{s2s2}] = \begin{bmatrix} (L_{s2} + L_{ms}) & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & (L_{s2} + L_{ms}) & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & (L_{s2} + L_{ms}) \end{bmatrix}$$

(I.12)

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} (L_r + L_{mr}) & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & (L_r + L_{mr}) & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & (L_r + L_{mr}) \end{bmatrix} \quad (\text{I.13})$$

$$[L_{s1s1}] = \begin{bmatrix} L_{ms} \cos(\alpha) & L_{ms} \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) & L_{ms} \cos(\alpha + \frac{4\pi}{3}) \\ L_{ms} \cos(\alpha + \frac{4\pi}{3}) & L_{ms} \cos(\alpha) & L_{ms} \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ L_{ms} \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) & L_{ms} \cos(\alpha + \frac{4\pi}{3}) & L_{ms} \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (\text{I.14})$$

$$[L_{s1r}] = \begin{bmatrix} L_{sr} \cos(\theta_r) & L_{sr} \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{sr} \cos(\theta_r + \frac{4\pi}{3}) \\ L_{sr} \cos(\theta_r + \frac{4\pi}{3}) & L_{sr} \cos(\theta_r) & L_{sr} \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ L_{sr} \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{sr} \cos(\theta_r + \frac{4\pi}{3}) & L_{sr} \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (\text{I.15})$$

$$[L_{s2r}] = \begin{bmatrix} L_{sr} \cos(\theta_r - \alpha) & L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{4\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos(\theta_r - \alpha) & L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{4\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos(\theta_r - \alpha) \end{bmatrix} \quad (I.16)$$

$$\text{Avec} \quad [L_{s1s2}] = [L_{s2s1}]^t; [L_{s1r}] = [L_{r1r}]^t; [L_{s2r}] = [L_{rs2}]^t.$$

L_{s1}, L_{s2}, L_r : représente la valeur maximale des coefficients d'inductances de l'étoile 1, l'étoile 2 et du rotor.

L_{ms} : représente la valeur maximale des coefficients d'inductances mutuelles statoriques.

L_{mr} : représente la valeur maximale des coefficients d'inductances mutuelles rotorique.

L_{sr} : représente la valeur maximale des coefficients d'inductances mutuelles entre une étoile et le rotor

I.5.3.3 Equation magnétique développée de la MASDE

$$\begin{bmatrix} \Phi_{a1} \\ \Phi_{b1} \\ \Phi_{c1} \\ \Phi_{a2} \\ \Phi_{b2} \\ \Phi_{c2} \\ \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{a1a1} & M_{a1b1} & M_{a1c1} & M_{a1a2} & M_{a1b2} & M_{a1c2} & M_{a1ar} & M_{a1br} & M_{a1cr} \\ M_{b1a1} & L_{b1b1} & M_{b1c1} & M_{b1a2} & M_{b1b2} & M_{b1c2} & M_{b1ar} & M_{b1br} & M_{b1cr} \\ M_{c1a1} & M_{c1b1} & L_{c1c1} & M_{c1a2} & M_{c1b2} & M_{c1c2} & M_{c1ar} & M_{c1br} & M_{c1cr} \\ M_{a2a1} & M_{a2b1} & M_{a2c1} & L_{a2a2} & M_{a2b2} & M_{a2c2} & M_{a2ar} & M_{a2br} & M_{a2cr} \\ M_{b2a1} & M_{b2b1} & M_{b2c1} & M_{b2a2} & L_{b2b2} & M_{b2c2} & M_{b2ar} & M_{b2br} & M_{b2cr} \\ M_{c2a1} & M_{c2b1} & M_{c2c1} & M_{c2a2} & M_{c2b2} & L_{c2c2} & M_{c2ar} & M_{c2br} & M_{c2cr} \\ M_{arc1} & M_{arb1} & M_{arc1} & M_{arc2} & M_{arb2} & M_{arc2} & L_{arar} & M_{arbr} & M_{arcr} \\ M_{bra1} & M_{brb1} & M_{brc1} & M_{bra2} & M_{brb2} & M_{brc2} & M_{brar} & L_{brbr} & M_{brcr} \\ M_{cra1} & M_{crb1} & M_{crc1} & M_{cra2} & M_{crb2} & M_{crc2} & M_{craar} & M_{crbr} & L_{crcr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{b1} \\ I_{c1} \\ I_{a2} \\ I_{b2} \\ I_{c2} \\ I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \quad (I.17)$$

M_{ij} : Inductance mutuelle relative aux deux étoiles ou l'étoile et le rotor ($i \neq j$).

L_{ij} Inductance propre relative à une étoile ou au rotor.

Avec : $i = a1, b1, c1, a2, b2, c2, ar, br, cr$ et $j = a1, b1, c1, a2, b2, c2, ar, br, cr$

I.5.3.4 Energie magnétique

On peut calculer l'expression à partir de :

$$\omega_{mag} = \frac{1}{2} ([I_{s1}]^t [\Phi_{s1}] + [I_{s2}]^t [\Phi_{s2}] + [I_r]^t [\Phi_r]) \quad (I.18)$$

I.5.3.5 Couple électromagnétique

$$C_{em} = \left(\frac{p}{2}\right) \cdot \left([I_{s,abc1}] \frac{d}{d\theta_r} [L_{s1r}] \cdot [I_{r,abc}]^t + [I_{s,abc2}] \frac{d}{d\theta_r} [L_{s2r}] [I_{r,abc}]^t \right) \quad (I.19)$$

I.5.3.6 Equation mécanique

L'équation mécanique de base qui régit le mouvement du rotor de la machine est donnée par : [10]

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f_r \Omega \quad (I.20)$$

f_r : Coefficient de frottement. C_r : Couple résistant. J : Moment d'inertie. Ω : Vitesse angulaire de rotation. C_{em} : Couple électromagnétique.

I.6 Transformation de base de Park

La transformation de Park rend l'étude assez aisée de tous les régimes transitoires de la machine électrique polyphasée. Le principe consiste à remplacer les grandeurs (courant, tension et flux) d'indices réelles «a, b et c» par des grandeurs d'indices «d, q et o» (direct, en quadrature et homopolaire) à l'aide de la matrice de Park $[P(\theta)]$.

Le système triphasé est transformé en un système biphasé tournant [6].

La matrice de Park est définie comme suit :

$$[P(\theta_e)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & \cos\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_e) & -\sin\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (I.21)$$

- Par convention

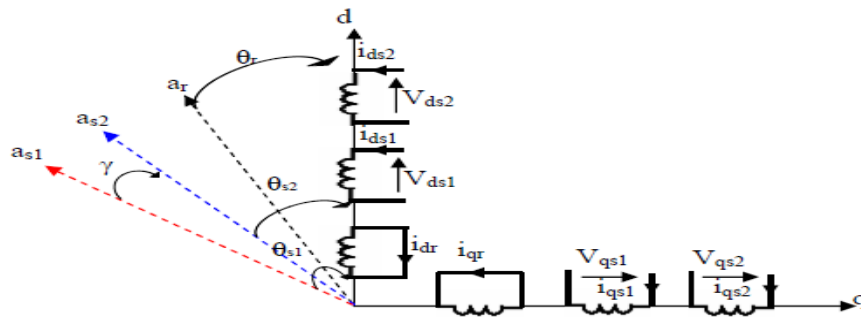


Figure I.2: Représentation schématique du modèle de PARK de la MASDE [6].

« a_{s1} » et « a_{s2} » représentent les deux étoiles du stator et « a_r » représentent les phases du rotor. θ_e Ou θ_{s1} : Angle de transformation de PARK de l'étoile 1 du stator. [10]

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad \omega_{s1} = \frac{d\theta_{s1}}{dt} \quad \omega_{s2} = \frac{d\theta_{s2}}{dt} = \frac{d\theta}{dt} \quad (I.22)$$

I.6.1 Application de la transformation de PARK à la MASDE

En appliquant la transformée de Park, les courants, les tensions et les flux se transforment de la manière suivante :

❖ Transformation des tensions

$$\begin{aligned} [V_{s1}] &= [P(\theta_{s1})][L_{s1p}] \\ [V_{s2}] &= [P(\theta_{s2})][L_{s2p}] \end{aligned} \quad \text{Avec} \quad [V_{s1p}] = \begin{bmatrix} V_{s10} \\ V_{s1d} \\ V_{s1q} \end{bmatrix}; [V_{s2p}] = \begin{bmatrix} V_{s20} \\ V_{s2d} \\ V_{s2q} \end{bmatrix}$$

❖ Transformation des courants

$$\begin{aligned} [I_{s1}] &= [P(\theta_{s1})][I_{s1p}] \\ [I_{s2}] &= [P(\theta_{s2})][I_{s2p}] \\ [I_r] &= [P(\theta_r)][I_r] \end{aligned} \quad \text{avec} \quad [I_{s1p}] = \begin{bmatrix} I_{s10} \\ I_{s1d} \\ I_{s1q} \end{bmatrix}; [I_{s2p}] = \begin{bmatrix} I_{s20} \\ I_{s2d} \\ I_{s2q} \end{bmatrix}; [I_{rp}] = \begin{bmatrix} I_{r0} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix}$$

❖ Transformation des flux

$$\begin{aligned} [\Phi_{r_{s1}}] &= [P(\theta_{s1})][\Phi_{s1p}] \\ [\Phi_{r_{s2}}] &= [P(\theta_{s2})][\Phi_{s2p}] \\ [\Phi_r] &= [P(\theta_r)][\Phi_r] \end{aligned}$$

$$\text{Avec} \quad [\Phi_{s1p}] = \begin{bmatrix} \Phi_{s10} \\ \Phi_{s1d} \\ \Phi_{s1q} \end{bmatrix}; [\Phi_{s2p}] = \begin{bmatrix} \Phi_{s20} \\ \Phi_{s2d} \\ \Phi_{s2q} \end{bmatrix}; [\Phi_{rp}] = \begin{bmatrix} \Phi_{r0} \\ \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix}$$

I.6.2 Equations des tensions

En appliquant la transformation de PARK aux équations (I.4), (I.6) et (II.6), on obtient : [10]

❖ Pour la première étoile

$$[V_{s1p}] = [R_{s1}][I_{s1p}] + [P(\theta_s)]^{-1} \frac{d}{dt} ([P(\theta_{s1})][\Phi_{s1p}])$$

De (I.21) nous avons : $\frac{d\theta_{s1}}{dt} = \frac{d\theta_{s2}}{dt} = \omega_s$

Pour obtenir l'équation finale :

$$\begin{bmatrix} V_{os1} \\ V_{ds1} \\ V_{qs1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{s1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s1} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_{os1}] \\ [I_{ds1}] \\ [I_{qs1}] \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{os1} \\ \Phi_{ds1} \\ \Phi_{qs1} \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} 0 \\ -\Phi_{qs1} \\ \Phi_{ds1} \end{bmatrix}$$

$$\text{Donc} \quad \begin{cases} V_{ds1} = R_{s1}I_{ds1} + \frac{d}{dt}\Phi_{ds1} - \omega_s\Phi_{qs1} \\ V_{qs1} = R_{s1}I_{qs1} + \frac{d}{dt}\Phi_{qs1} + \omega_s\Phi_{ds1} \end{cases} \quad (\text{I.23})$$

❖ Pour la seconde étoile

$$[V_{s2p}] = [R_{s2}][I_{s2p}] + [P(\theta_s)]^{-1} \frac{d}{dt} ([P(\theta_{s2})][\Phi_{s2p}])$$

De (I.21) nous avons : $\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$

Pour obtenir l'équation finale :

$$\begin{bmatrix} V_{os2} \\ V_{ds2} \\ V_{qs2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{s2} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_{os1}] \\ [I_{ds1}] \\ [I_{qs1}] \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{os2} \\ \Phi_{ds2} \\ \Phi_{qs2} \end{bmatrix} + \omega_s \begin{bmatrix} 0 \\ -\Phi_{qs2} \\ \Phi_{ds2} \end{bmatrix}$$

$$\text{Donc } \begin{cases} V_{ds2} = R_{s2}I_{ds2} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds2} - \omega_s \Phi_{qs2} \\ V_{qs2} = R_{s2}I_{qs2} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs2} + \omega_s \Phi_{ds2} \end{cases} \quad (\text{I.24})$$

❖ Pour le rotor

$$[V_{s2p}] = [R_{s2}][I_{s2p}] + [P(\theta_s)]^{-1} \frac{d}{dt} ([P(\theta_{s2})][\Phi_{s2p}])$$

De (I.21) nous avons : $\frac{d\theta_{s1}}{dt} = \frac{d\theta_{s2}}{dt} = \omega_s$

Pour obtenir l'équation finale :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_{dr}] \\ [I_{ds1}] \\ [I_{qs1}] \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{or} \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} 0 \\ \Phi_{qr} \\ \Phi_{dr} \end{bmatrix}$$

$$\text{Donc } \begin{cases} 0 = R_r I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \Phi_{qr} \\ 0 = R_r I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{I.25})$$

Les relations (I.22), (I.22) et (I.24) représentent les équations finales des tensions de la MASDE résumé ci-dessous :

$$\begin{cases} V_{ds1} = R_{s1}I_{ds1} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds1} - \omega_s \Phi_{qs1} \\ V_{qs1} = R_{s1}I_{qs1} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs1} + \omega_s \Phi_{ds1} \\ V_{ds2} = R_{s2}I_{ds2} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds2} - \omega_s \Phi_{qs2} \\ V_{qs2} = R_{s2}I_{qs2} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs2} + \omega_s \Phi_{ds2} \\ 0 = R_r I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{qr} \\ 0 = R_r I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \Phi_{dr} \end{cases}$$

I.6.3 Equations magnétiques

On applique la transformée de PARK à l'équation « I.10 », et avec : [6, 10]

$(L_{s1}+L_m)$, $(L_{s2}+L_m)$: Inductances propres cycliques de l'étoile 1 et 2.

(L_r+L_m) : inductance propre cyclique du rotor.

$L_m = \frac{3}{2}L_{ms} = \frac{3}{2}L_{mr} = \frac{3}{2}L_{sr}$: Inductance mutuelle cyclique entre l'étoile let 2 et le rotor.

On obtient :

$$\begin{cases} \Phi_{ds1} = L_{s1}I_{ds1} + L_m(I_{ds1} + I_{ds2} + I_{dr}) \\ \Phi_{qs1} = L_{s1}I_{qs1} + L_m(I_{qs1} + I_{qs2} + I_{qr}) \\ \Phi_{ds2} = L_{s2}I_{ds2} + L_m(I_{ds1} + I_{ds2} + I_{dr}) \\ \Phi_{qs2} = L_{s2}I_{qs2} + L_m(I_{qs1} + I_{qs2} + I_{qr}) \\ \Phi_{dr} = L_r I_{dr} + L_m(I_{ds1} + I_{ds2} + I_{dr}) \\ \Phi_{qr} = L_r I_{qr} + L_m(I_{qs1} + I_{qs2} + I_{qr}) \end{cases} \quad (I.26)$$

Et pour la forme matricielle on a :

- **L'axe direct** $\begin{bmatrix} \Phi_{ds1} \\ \Phi_{ds2} \\ \Phi_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{s1} + L_m & L_m & L_m \\ L_m & L_{s2} + L_m & L_m \\ L_m & L_m & L_r + L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds1} \\ I_{ds2} \\ I_{dr} \end{bmatrix}$
- **L'axe en quadrature** $\begin{bmatrix} \Phi_{qs1} \\ \Phi_{qs2} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{s1} + L_m & L_m & L_m \\ L_m & L_{s2} + L_m & L_m \\ L_m & L_m & L_r + L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{qs1} \\ I_{qs2} \\ I_{qr} \end{bmatrix}$

I.6.4 Equation mécanique

I.6.4.1 Puissance instantanée

L'expression de la puissance instantanée absorbée par la MASDE : [10]

$$P = [V_s]^T [I_s] = V_{as1}I_{as1} + V_{bs1}I_{bs1} + V_{cs1}I_{cs1} + V_{as2}I_{as2} + V_{bs2}I_{bs2} + V_{cs2}I_{cs2} \quad (I.27)$$

La transformation de PARK repose sur l'invariance de la puissance instantanée P dans les deux systèmes de transformation, ce qui de toute évidence conduit à leur équivalence physique, l'équation « I.27 » deviendra :

$$P = (V_{ds1}I_{ds1} + V_{qs1}I_{qs2} + V_{ds2}I_{ds2} + V_{qs2}I_{qs2}) \quad (I.28)$$

On développe l'équation « I.28 », on a :

$$P = \left\{ \left[\left(R_{s1}I_{ds1} + \frac{d}{dt}\Phi_{ds1} - \omega_s\Phi_{qs1} \right) (I_{ds1}) \right] + \left[\left(R_{s2}I_{ds2} + \frac{d}{dt}\Phi_{ds2} - \omega_s\Phi_{qs2} \right) (I_{ds2}) \right] \right\} + \left\{ \left[\left(R_{s1}I_{qs1} + \frac{d}{dt}\Phi_{qs1} - \omega_s\Phi_{ds1} \right) (I_{qs1}) \right] + \left[\left(R_{s2}I_{qs2} + \frac{d}{dt}\Phi_{qs2} - \omega_s\Phi_{ds2} \right) (I_{qs2}) \right] \right\}$$

L'équation devient :

$$P = \left[R_{s1}(I_{ds1})^2 + R_{s2}(I_{ds2})^2 + R_{s1}(I_{qs1})^2 + R_{s2}(I_{qs2})^2 \right] + \left[\frac{d}{dt} \Phi_{ds1} I_{ds1} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds2} I_{ds2} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs1} I_{qs1} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs2} I_{qs2} \right] + \left[\omega_s (\Phi_{ds1} I_{qs1} + \Phi_{ds2} I_{qs2} - \Phi_{qs1} I_{ds1} - \Phi_{qs2} I_{ds2}) \right] \quad (I.29)$$

Le premier terme entre accolade est identifiable aux pertes joules :

$$P_j = \left[R_{s1}(I_{ds1})^2 + R_{s2}(I_{ds2})^2 + R_{s1}(I_{qs1})^2 + R_{s2}(I_{qs2})^2 \right]$$

Le second terme correspond à la puissance électromagnétique stockée dans le champ :

$$P_{ém} = \left[\frac{d}{dt} \Phi_{ds1} I_{ds1} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds2} I_{ds2} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs1} I_{qs1} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs2} I_{qs2} \right]$$

Le troisième terme représente la puissance électrique transformée en puissance mécanique :

$$P_{mec} = \left[\omega_s (\Phi_{ds1} I_{qs1} + \Phi_{ds2} I_{qs2} - \Phi_{qs1} I_{ds1} - \Phi_{qs2} I_{ds2}) \right]$$

I.6.4.2 Couple électromagnétique

La relation entre la puissance mécanique et le couple électro magnétique et donne comme suit :

$$P_{em} = C_{em} \cdot \Omega \quad (I.30)$$

Avec : $\omega_s = P \cdot \Omega$ où P représente le nombre de paires de pôles.

$$C_{em} = \frac{\omega_s}{\Omega} \left[(\Phi_{ds1} I_{qs1} + \Phi_{ds2} I_{qs2} - \Phi_{qs1} I_{ds1} - \Phi_{qs2} I_{ds2}) \right] \Rightarrow C_{em} = P \left[(\Phi_{ds1} I_{qs1} + \Phi_{ds2} I_{qs2} - \Phi_{qs1} I_{ds1} - \Phi_{qs2} I_{ds2}) \right] \quad (I.31)$$

En remplaçant les relations de flux développées par les équations (I.26), l'expression du couple deviendra :

$$C_{em} = p L_m \left[I_{dr} (I_{qs1} + I_{qs2}) - I_{qr} (I_{ds1} + I_{ds2}) \right] \quad (I.32)$$

Ou bien encore en faisant appel aux flux rotoriques :

$$\begin{aligned} \Phi_{dr} &= L_1 I_{dr} + L_m (I_{ds1} + I_{ds2} + I_{dr}) \\ \Phi_{qr} &= L_1 I_{qr} + L_m (I_{qs1} + I_{qs2} + I_{qr}) \end{aligned} \quad (I.33)$$

De (I.33), nous obtiendront :

$$\begin{aligned} I_{dr} &= \frac{\Phi_{dr}}{L_r + L_m} \frac{L_m}{L_1 + L_m} (I_{ds1} + I_{ds2}) \\ I_{qr} &= \frac{\Phi_{qr}}{L_r + L_m} \frac{L_m}{L_1 + L_m} (I_{qs1} + I_{qs2}) \end{aligned} \quad (I.34)$$

En remplaçant (I.34) dans (I.32), on aura :

$$C_{em} = p \frac{L_m}{L_r + L_m} [\Phi_{dr}(I_{qs1} + I_{qs2}) - \Phi_{qr}(I_{ds1} + I_{ds2})] \quad (I.35)$$

I.7 Mise sous forme d'équations d'état :

Le modèle étudié a été réalisé dans le repère (d, q) lié au champ tournant. La représentation d'état consiste à exprimer le modèle de la machine sous la forme :

$$\frac{dx}{dt} = AX + BU \quad (I.36)$$

A : matrice d'évolution du système. X : vecteur d'état. B : vecteur de commande.

U : vecteur d'entrée.

Avec quelque modification opère sur (I.24), on obtient :

$$\begin{aligned} \Phi_{dm} &= I_m(I_{ds} + I_{ds} + I_{dr}) \\ \Phi_{qm} &= I_m(I_{qs} + I_{qs} + I_{qr}) \end{aligned} \quad (I.37)$$

Flux magnétisant : $\Phi_m = \sqrt{\Phi_{md}^2 + \Phi_{mq}^2}$

Ça nous donne, la composante directe et la composante en quadrature du flux magnétisant sont :

$$\begin{cases} \Phi_{dm} = \left(\frac{\Phi_{ds1}}{L_{s1}} + \frac{\Phi_{ds2}}{L_{s2}} + \frac{\Phi_{dr}}{L_s} \right) L_a \\ \Phi_{qm} = \left(\frac{\Phi_{qs1}}{L_{s1}} + \frac{\Phi_{qs2}}{L_{s2}} + \frac{\Phi_{qr}}{L_s} \right) L_a \end{cases} \quad (I.38)$$

Avec : $L_a = \left(\frac{1}{\frac{1}{L_m} + \frac{1}{L_{s1}} + \frac{1}{L_{s2}} + \frac{1}{L_r}} \right)$

Les courants seront déduits des équations de (I.32) :

$$\begin{cases} I_{ds1} = \frac{\Phi_{ds1} - \Phi_{dm}}{L_{s1}} \\ I_{ds2} = \frac{\Phi_{ds2} - \Phi_{dm}}{L_{s2}} \\ I_{qs1} = \frac{\Phi_{qs1} - \Phi_{qm}}{L_{s1}} \\ I_{qs2} = \frac{\Phi_{qs2} - \Phi_{qm}}{L_{s2}} \\ I_{dr} = \frac{\Phi_{dr} - \Phi_{dm}}{L_r} \\ I_{qr} = \frac{\Phi_{qr} - \Phi_{qm}}{L_r} \end{cases} \quad (I.39)$$

$$\text{Et } \begin{cases} \frac{d}{dt} \Phi_{ds1} = V_{ds1} \frac{R_{s1}}{L_{s1}} (\Phi_{ds1} - \Phi_{dm}) + \omega_s \Phi_{qs1} \\ \frac{d}{dt} \Phi_{qs1} = V_{qs1} \frac{R_{s1}}{L_{s1}} (\Phi_{qs1} - \Phi_{qm}) + \omega_s \Phi_{ds1} \\ \frac{d}{dt} \Phi_{ds2} = V_{ds2} \frac{R_{s2}}{L_{s2}} (\Phi_{ds2} - \Phi_{dm}) + \omega_s \Phi_{qs2} \\ \frac{d}{dt} \Phi_{qs2} = V_{qs2} \frac{R_{s2}}{L_{s2}} (\Phi_{qs2} - \Phi_{qm}) - \omega_s \Phi_{ds2} \\ \frac{d}{dt} \Phi_{dr} = \frac{R_r}{L_r} (\Phi_{dr} - \Phi_{dm}) + (\omega_s - \omega_r) \Phi_{qr} \\ \frac{d}{dt} \Phi_{qr} = \frac{R_r}{L_r} (\Phi_{qr} - \Phi_{dm}) - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{I.40})$$

En développant ce système d'équation on aura :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \Phi_{ds1} = V_{ds1} - \left(\frac{R_{s1}}{L_{s1}} - \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}^2} \right) \Phi_{ds1} + \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}L_{s2}} \Phi_{ds2} + \omega_s \Phi_{qs1} + \frac{R_{s1}L_a}{L_rL_{s1}} \Phi_{dr} \\ \frac{d}{dt} \Phi_{ds2} = V_{ds2} - \left(\frac{R_{s2}}{L_{s2}} - \frac{R_{s2}L_a}{L_{s2}^2} \right) \Phi_{ds2} + \frac{R_{s2}L_a}{L_{s1}L_{s2}} \Phi_{ds1} + \omega_s \Phi_{qs2} + \frac{R_{s2}L_a}{L_rL_{s2}} \Phi_a \\ \frac{d}{dt} \Phi_{qs1} = V_{qs1} - \left(\frac{R_{s1}}{L_{s1}} - \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}^2} \right) \Phi_{qs1} + \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}L_{s2}} \Phi_{qs2} - \omega_s \Phi_{ds1} + \frac{R_{s1}L_a}{L_rL_{s1}} \Phi_{qr} \\ \frac{d}{dt} \Phi_{qs2} = V_{qs2} - \left(\frac{R_{s2}}{L_{s2}} - \frac{R_{s2}L_a}{L_{s2}^2} \right) \Phi_{qs2} + \frac{R_{s2}L_a}{L_{s1}L_{s2}} \Phi_{qs1} - \omega_s \Phi_{ds2} + \frac{R_{s2}L_a}{L_rL_{s2}} \Phi_q \\ \frac{d}{dt} \Phi_{dr} = - \left(\frac{R_r}{L_r} - \frac{R_rL_a}{L_r^2} \right) \Phi_{dr} + \frac{R_rL_a}{L_rL_{s1}} \Phi_{ds1} + (\omega_s - \omega_r) \Phi_{qr} + \frac{R_rL_a}{L_rL_{s2}} \Phi_{ds2} \\ \frac{d}{dt} \Phi_{qr} = - \left(\frac{R_r}{L_r} - \frac{R_rL_a}{L_r^2} \right) \Phi_{qr} + \frac{R_rL_a}{L_rL_{s1}} \Phi_{qs1} - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{dr} + \frac{R_rL_a}{L_rL_{s2}} \Phi_{qs2} \end{cases} \quad (\text{I.41})$$

D'où

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_{s1}}{L_{s1}} + \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}} & \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}L_{s2}} & \omega_s & 0 & \frac{R_rL_a}{L_rL_{s1}} & 0 \\ \frac{R_{s2}L_a}{L_{s1}L_{s2}} & -\frac{R_{s2}}{L_{s2}} + \frac{R_{s2}L_a}{L_{s2}} & 0 & \omega_s & \frac{R_{s2}L_a}{L_rL_{s2}} & 0 \\ -\omega_s & 0 & -\frac{R_{s1}}{L_{s1}} + \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}} & \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}L_{s2}} & 0 & \frac{R_rL_a}{L_rL_{s1}} \\ 0 & -\omega_s & \frac{R_{s2}L_a}{L_{s1}L_{s2}} & -\frac{R_{s2}}{L_{s2}} + \frac{R_{s2}L_a}{L_{s2}} & 0 & \frac{R_{s2}L_a}{L_rL_{s2}} \\ \frac{R_rL_a}{L_rL_{s1}} & \frac{R_rL_a}{L_rL_{s2}} & 0 & 0 & -\frac{R_r}{L_r} + \frac{R_rL_a}{L_r^2} & (\omega_s - \omega) \\ 0 & 0 & \frac{R_rL_a}{L_rL_{s1}} & \frac{R_rL_a}{L_rL_{s2}} & -(\omega_s - \omega) & -\frac{R_r}{L_r} + \frac{R_rL_a}{L_r^2} \end{bmatrix}$$

I.8 Simulation et interprétation

I.8.1 Simulation de la MASDE alimentée par des sources de tensions sinusoïdales

Nous allons alimenter la MASDE avec une source purement sinusoïdale et équilibrée (réseau électrique), exprimées comme suit :

❖ Pour le premier stator

$$\begin{cases} V_{as1} = \sqrt{2}V_s \sin(\omega_s t) \\ V_{bs1} = \sqrt{2}V_s \sin\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{cs1} = \sqrt{2}V_s \sin\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{I.42})$$

❖ Pour le second stator

$$\begin{cases} V_{as2} = \sqrt{2}V_s \sin\left(\omega_s t + \frac{\pi}{6}\right) \\ V_{bs2} = \sqrt{2}V_s \sin\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{6}\right) \\ V_{cs2} = \sqrt{2}V_s \sin\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{6}\right) \end{cases} \quad (\text{I.43})$$

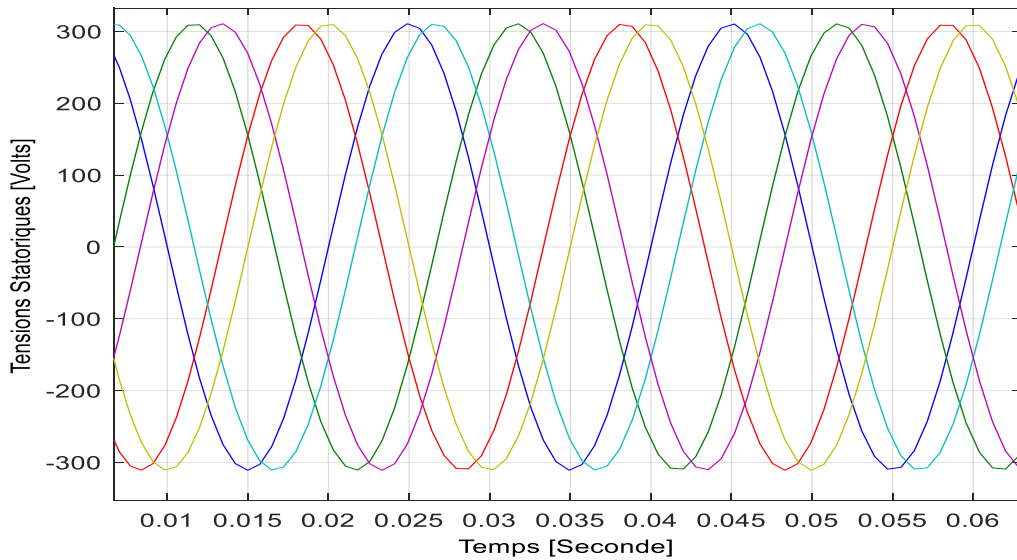


Figure I.3 : Deux sources de tensions triphasées décalées de 30°

Deux sources de tensions triphasées décalées de 30° alimentent les deux étoiles du stator. La MASDE tourne d'abord à vide, puis après un laps de temps, est attelée une charge de couple positif puis reconnecte à une charge de couple négatif.

I.8.1.1 Résultat de la simulation

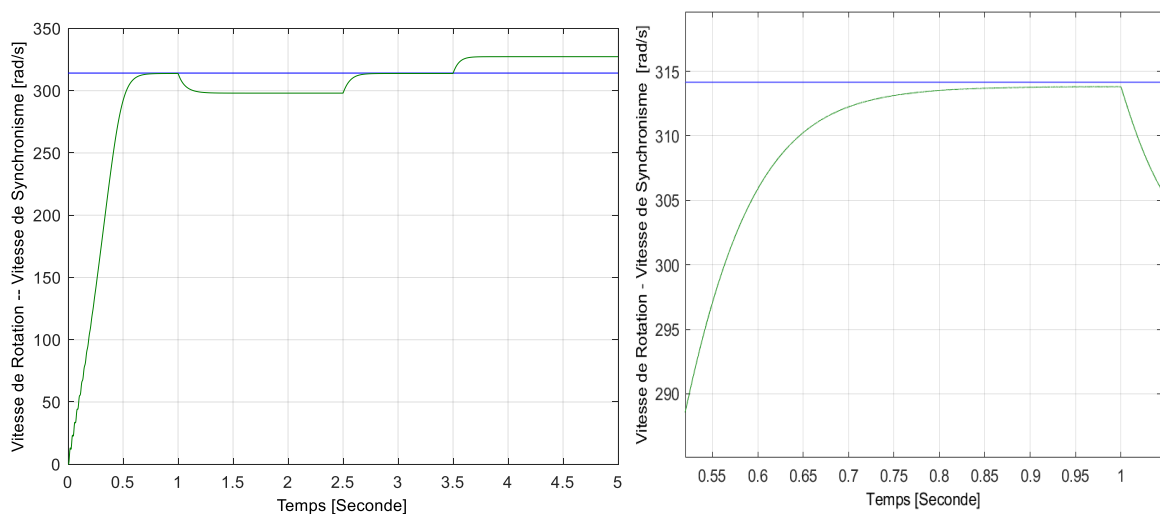


Figure I.4 : Vitesse de rotation & vitesse de synchronisme

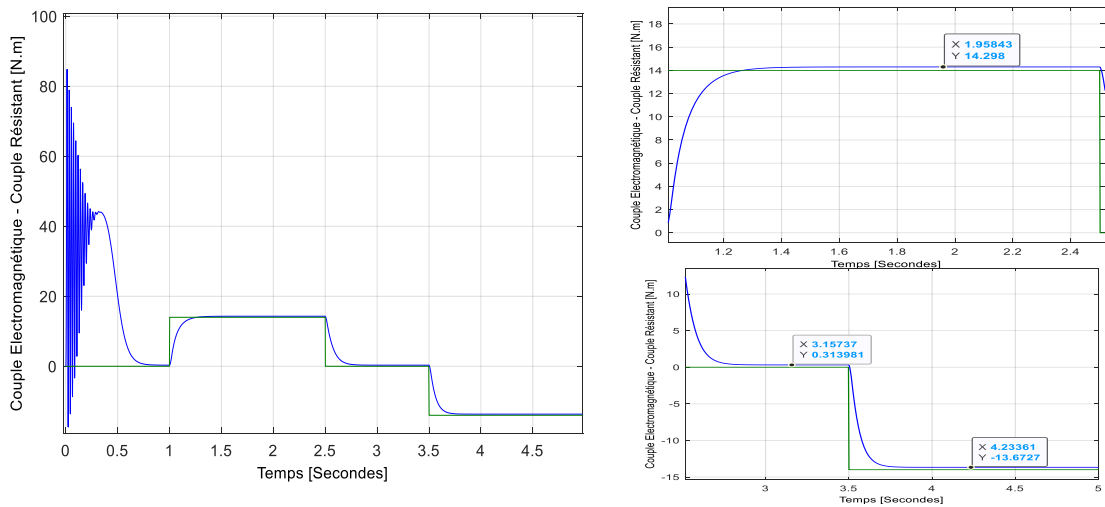


Figure I.5 : Couple électromagnétique & couple résistant

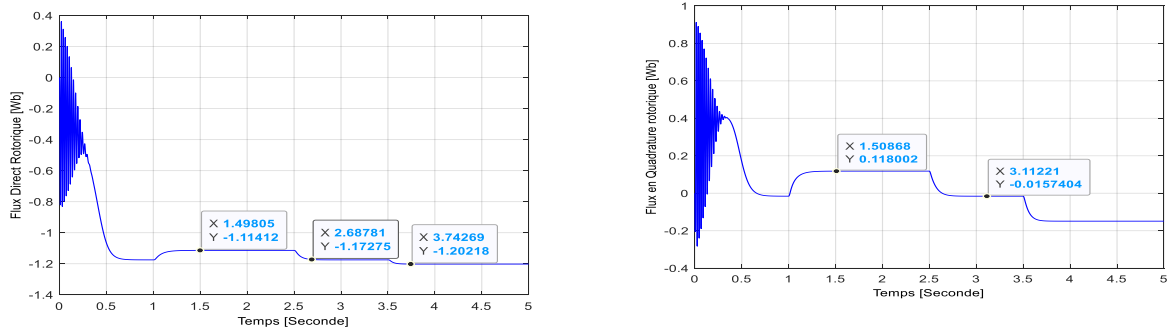


Figure I.6 : Flux rotorique

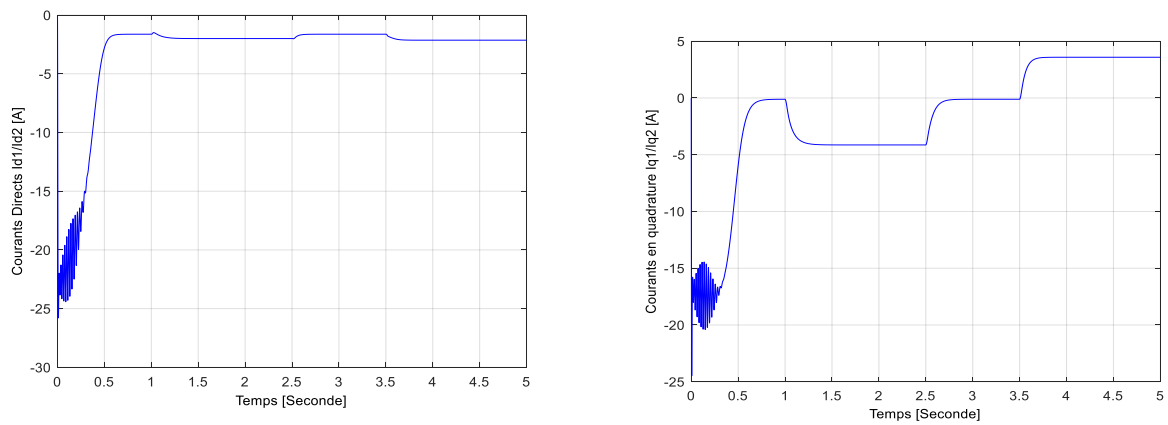


Figure I.7 : Courants direct et en quadrature

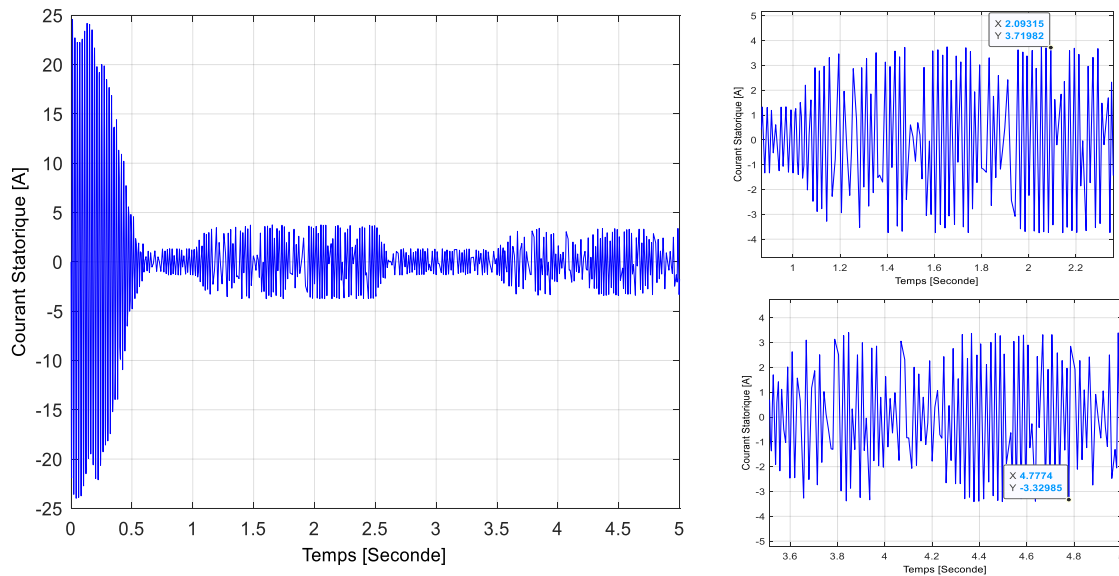


Figure I.8 : Courant statoriques

Lors de la simulation, quatre intervalles de temps nous intéressent pour mieux comprendre le fonctionnement de la MASDE :

❖ **t = [0s ; 1s]**

Au démarrage la machine tourne à vide pendant une seconde et la vitesse de rotation augmente en suivant presque une droite pour se rapprocher de la vitesse de synchronisme comme indique sur la figure I.4.

Par contre le couple électromagnétique, subit des vibrations avec un pic à « 84.83 Nm » alors que le couple nominal est de l'ordre de « 14 Nm », et puis se stabilise petite à petite à « 0.329 Nm » dû aux pertes fer à vide et aux pertes mécanique par frottement.

La réponse du flux rotorique présente des vibrations au démarrage qui se stabilise assez vite et suit parfaitement leurs valeurs de références avec les mêmes temps de réponse, nous remarquons aussi que le flux en quadratique rotorique adopte une allure identique au couple électromagnétique.

Le courant statorique présente des pics allons à presque « 25 A », cela est dangereux pour la machine en cas de répétition successive. Pour le courant direct et quadratique de petite turbulence sont à noter sur un laps de temps « 0.35 s », juste après, la réponse suit une droite qui ressemble à celle de la vitesse de rotation.

❖ $t = [1s ; 2.5s]$

Dans cet intervalle, une charge résistante positif de valeur « $C_r=14 \text{ Nm}$ » est couplée à la machine. La réponse du couple électromagnétique présente des résultats satisfaisants sans vibration et se fixe à « 14.2998 Nm » pour le couple électromagnétique.

La réponse de la vitesse présente une très légère variation, la perturbation est rejetée par la commande. La vitesse diminue à sa valeur nominale, qui est de « 297 rd/s ». Les flux rotoriques en quadrature et directes sont directement affectés ce qui veut dire qu'il y a un fort couplage entre le couple et la vitesse d'une part et avec les flux rotoriques d'autre part.

La machine absorbe le courant du réseau, avec un signal sinusoïdal qui vacille aux tours de « 3.75 A ». Le courant statique varie selon la charge applique et dans cet intervalle, la machine fonctionne en mode moteur.

❖ $t = [2.5s ; 3.5s]$

Dans cet intervalle, un découplage de la charge est effectué où toutes les réponses reprennent leur valeur à vide après un court laps de temps.

❖ $t < 3.5s$

Au-delà de « 3.5 », une charge nominale négative de « -14 Nm » est reconnectée pour un fonctionnement de la machine en mode génératrice. Les allures obtenues dans cet intervalle restent les mêmes que celle observées pour $t = [1s ; 2.5s]$, avec une légère diminution des valeurs dû au déphasage de π entre la tension et le courant, ainsi que la puissance générée est de valeur négative.

I.8.2 Simulation de la MASDE alimentée par des onduleurs de tension

L'alimentation de la MASDE par un réseau électrique, a donné des résultats assez satisfaisants, mais pas pour l'industrie car nous avons aucun contrôle sur le fonctionnement de la machine, plus exactement sur sa vitesse d'où l'intérêt des onduleurs de tension.

Un onduleur est un dispositif permettant de transformer en alternatif une énergie électrique de type continue, alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir l'alternatif à la sortie. L'onduleur est essentiellement utilisé pour fournir une tension ou un courant alternatif afin d'assurer l'alimentation en énergie des charges alternatives.

Ils sont utilisés en électrotechnique, soit pour fournir des tensions ou courants alternatifs de fréquence et amplitudes variables, ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes.

Un onduleur de tension est un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue, ou la tension n'est pas affecté par les variations du courant qui la traverse, la source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie. Le courant à la sortie et donc le courant à l'entrée dépendent de la charge placée du côté alternatif. Cette charge peut être quelconque à la seule condition qu'il ne s'agisse pas d'une autre source de tension directement branchée entre les bornes de sortie [10].

I.8.2.1 Commande par modulation des largeurs d'impulsions sinus-triangle

La M.L.I sinus-triangle est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) avec 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 fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. Cette technique est caractérisée par les deux paramètres suivants : [10]

- **L'indice de modulation m** : égal au rapport de la fréquence de modulation (f_p) sur la fréquence de référence (f).
- **Le coefficient de réglage en tension r** : égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence (v_m) à la valeur crête de l'onde de modulation (v_{pm}).

La figure I.9 représente le principe de la commande par M.L.I sinus-triangle dont $r = 0.8$ et $m = 21$.

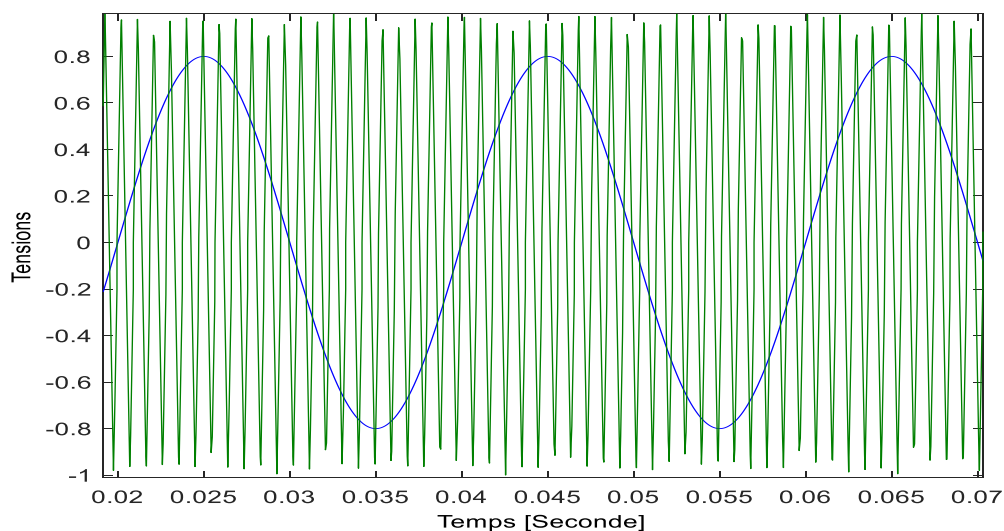


Figure I.9 : M.L. I sinus-triangle dont $r = 0.8$ et $m = 21$.

Pour cette simulation la MASDE est alimentée par des onduleurs de tensions. Précisément les deux systèmes d'enroulement collés dans la partie fixe de la machine, ils sont alimentés par deux onduleurs triphasés commandés par modulation de largeurs d'impulsions sinus triangle.

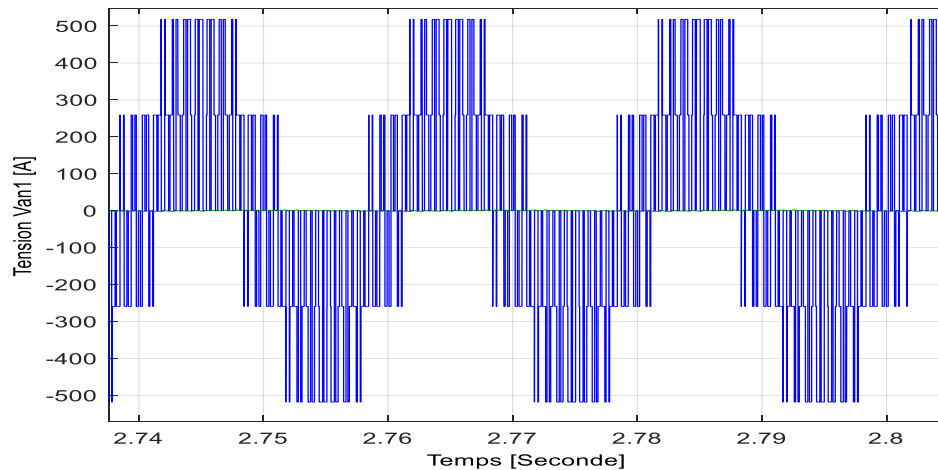


Figure I.10 : Tension simple Van1

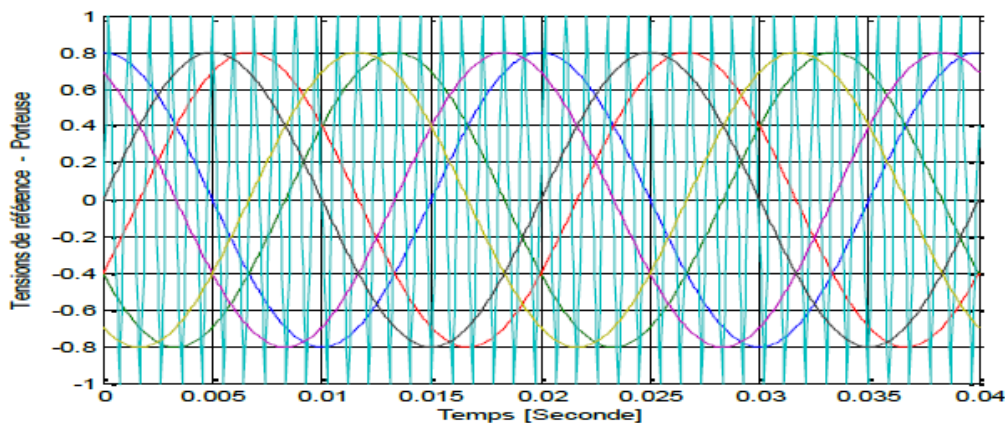


Figure I.11 Intersection tensions de référence et la porteuse

Nous commencerons avec un démarrage à vide, à $t = 1$ s une charge résistante de « 14 Nm » sera connectée à la machine pour un fonctionnement en mode moteur jusqu'à $t = 2.5$ s, et encore une fois la charge est déconnectée pendant une seconde pour couplage d'une seconde charge négatif pour un fonctionnement en mode génératrice.

I.8.2.2 Résultat et simulation

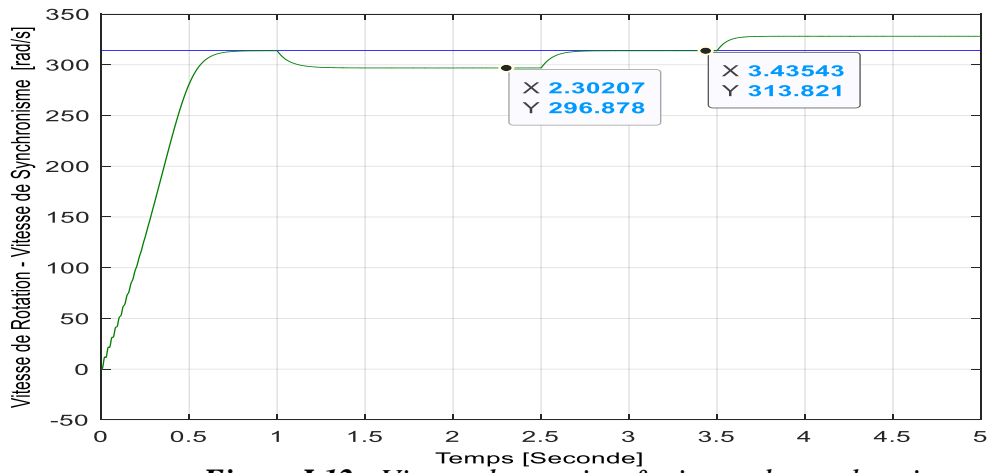


Figure I.12 : Vitesse de rotation & vitesse de synchronisme

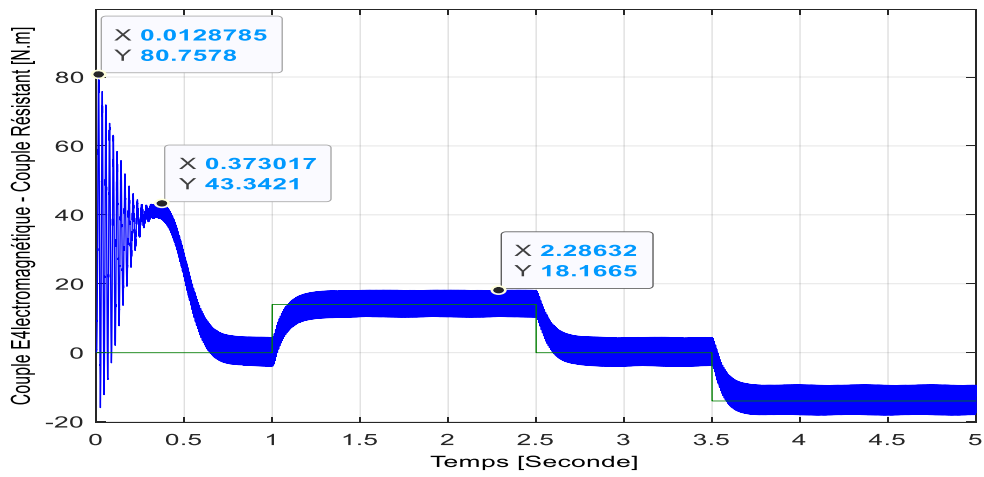


Figure I.13 : Couple électromagnétique & couple résistant

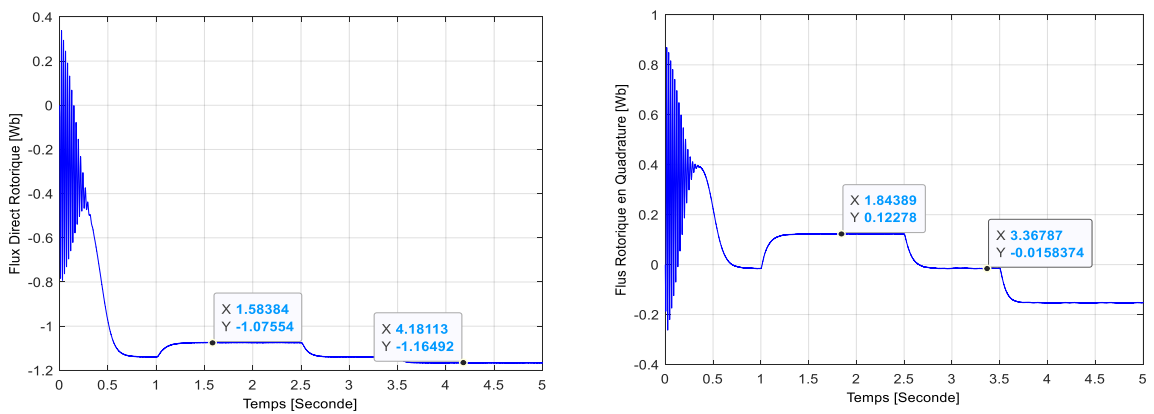


Figure I.14 : Flux direct & flux rotorique en quadrature

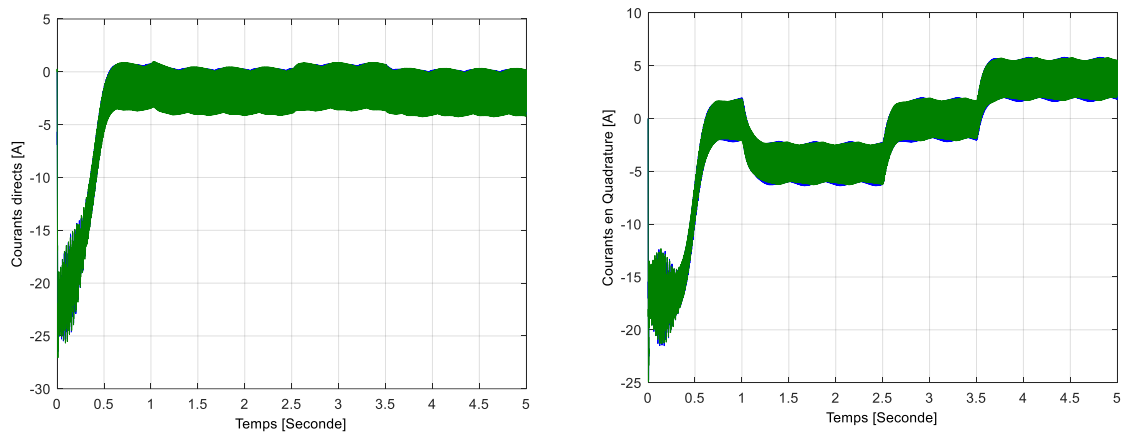


Figure I.15 : Courant direct & Courant en quadrature

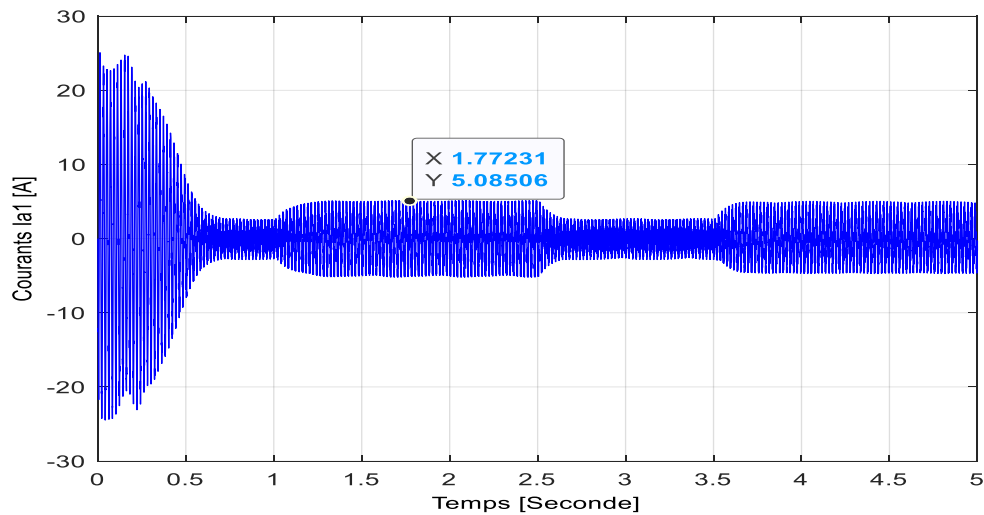


Figure I.16 : Courant statoriques

Nous remarquons que les réponses sont similaires à l'étude précédente où nous avons alimenté la MASDE avec le réseau électrique, les seules différences notables sont la présence d'harmoniques pour certaine réponse créés par les onduleurs de tension.

La vitesse de rotation garde la même allure qu'au premier essai, elle atteint assez vite les « 318.8 rd/s » proche de la vitesse de synchronisme. A $t = 1\text{s}$ la charge est connectée, la vitesse diminue en 0.3s pour se stabiliser à « 296.89 rd/s ». Puis a $t = 2.5\text{s}$ la machine tourne de nouveaux à vide pendant une seconde, la charge négative est reconnectée et la vitesse monte à « 328 rd/s ».

Le couple électromagnétique réagi de la même manière, que ce soit pour une alimentation au réseau électrique ou par onduleur de tension, sauf que des oscillations au tour de « 5 Nm » et « -5 Nm » apparaissent tous au long de la réponse créés par les

onduleurs de tension. La réponse du flux rotorique direct et en quadrature est similaire au couple électromagnétique.

Au démarrage, 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 ; mais Le régime transitoire est atteint en 0.4s. Les réponses du courant statorique obtenues lors de cet essai sont un peu plus grandes que celles trouvées lors de l'alimentation directement par le réseau électrique. Ainsi à vide, la machine absorbe un courant de presque « 2A » et en charge, le courant absorbé est de « 4A ». Ces ondulations et cette légère augmentation des valeurs des courants sont dues essentiellement à l'alimentation de la machine par des onduleurs de tensions.

I.9 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons commencé par quelques généralités sur les moteurs multiphasés pour bien assimiler et comprendre leur fonctionnement afin d'établir un modèle mathématique pour la MASDE, basé sur la théorie unifiée des machines électriques tout en adoptant certaines hypothèses simplificatrices.

L'étude des caractéristiques de la MASDE directement alimentée par des sources sinusoïdales, puis par des onduleurs de tensions à commande M.L.I à vide et en charge a été accomplie.

L'insertion de la charge dans les deux cas d'alimentations engendre une variation (diminution en fonctionnement moteur et augmentation en fonctionnement génératrice) de la vitesse.

II Etude de la source photovoltaïque

II.1 Introduction

Suite aux prévisions de l'épuisement inévitable des ressources mondiales en énergie fossile (pétrole, gaz, charbon...), en énergie thermonucléaire (Uranium, Plutonium...), et suite aux changements climatiques dus à l'effet de serre, les chercheurs ont commencé à s'intéresser aux ressources dites " renouvelables " dont la source est le soleil, qui fournit chaque jour à la terre, par son rayonnement, l'équivalent de plusieurs milliers de fois la consommation énergétique totale de l'humanité pour ses activités d'aujourd'hui.

La conversion énergétique s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une différence de potentiel lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules (PV) en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV).

Pour mieux comprendre le mode de fonctionnement de cette énergie, nous allons aborder dans ce chapitre d'une manière générale, du gisement solaire, de la conversion photovoltaïque et des principaux éléments constitutifs d'un système photovoltaïque.

II.2 L'énergie du soleil

L'énergie solaire est une source d'énergie qui dépend du soleil. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires.

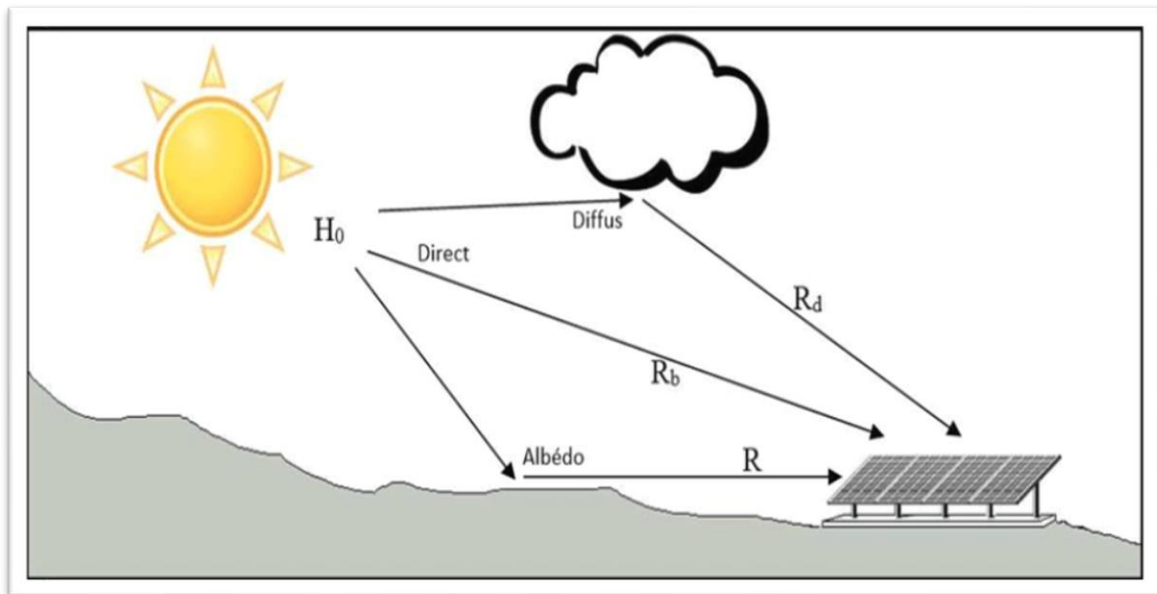


Figure II.1 : Composantes du rayonnement solaire au sol[18]

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, elle pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie 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.

Le soleil tire son énergie de réactions thermonucléaires se produisant dans son noyau. L'énergie émise par le soleil est sous forme d'ondes électromagnétiques dont l'ensemble forme le rayonnement solaire. En traversant l'atmosphère, le rayonnement va subir des transformations par absorption et par diffusion [18].

II.3 Le système photovoltaïque

Le terme photovoltaïque est composé de deux mots : photo qui signifie la « lumière » et le nom de l'inventeur de la pile électrique « Alessandro Volta » [19].

L'effet photovoltaïque est la conversion directe d'une partie de la lumière émise par le soleil (photons) en énergie électrique par le biais de cellule photovoltaïque lorsque sa surface est exposée à la lumière, elle est aussi connue sous le nom de photopile.

II.3.1 Principe de fonctionnement

Une cellule photovoltaïque est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P et l'autre dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des paires électron-trous. Ils créent alors des électrons (chargés N) et des trous (chargés P).

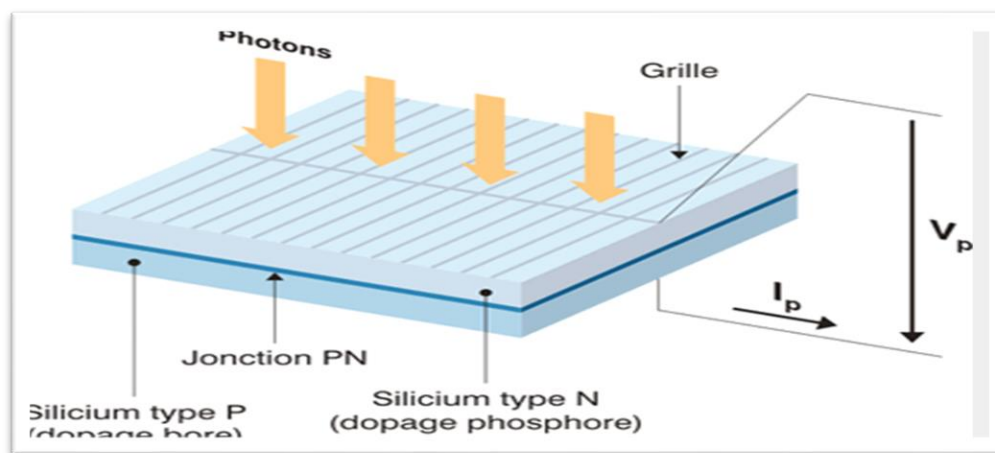


Figure II.2 : Le principe de fonctionnement de l'énergie photovoltaïque. [20]

Ceux-ci créent alors une différence de potentiel entre les deux couches (figure II.2). Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positive et négative de la cellule.

II.3.2 Les différents types de cellules solaires

Les cellules photovoltaïques sont les éléments de base d'un générateur photovoltaïque, sa constitution est de semi-conducteur, généralement à base de Silicium, ou de sulfure de cadmium (CDs), Tellurure de Cadmium (CdTe).

Elles délivrent une tension de l'ordre de 0,5 Volt chacune. Il existe différents types de cellules solaires. Chaque type de cellule est caractérisé par son rendement et son coût.

Les principaux types de cellules qui existent actuellement sont : [20]

- **Les cellules monocristallines** : Elles sont composées d'un silicium cristallisé en un seul cristal c'est pourquoi sa couleur est uniforme.
- **Les cellules polycristallines** : Les cellules polycristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé sous forme de cristaux multiples, on peut donc différencier les cristaux.
- **Les cellules amorphes** : Elles ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé.



Monocrystallin

poly cristallin

amorphe

Figure II.3 : Exemple de cellules photovoltaïques

Il y a d'autres types des cellules PV comme les cellules en matériaux organiques (rendement d'environ de 3,6%) et les cellules tandem [21].

II.4 Paramètres essentiels caractérisant 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 :

II.4.1 Courbe courant-tension d'une cellule PV

Une cellule photovoltaïque suit une loi $I=f(U)$ bien particulière que l'on nomme caractéristique. Les valeurs I_{cc} (courant de court-circuit) et V_{co} (Tension de circuit ouvert) sont des valeurs caractéristiques propres à chaque cellule. Il faut savoir que ces valeurs et l'allure de la caractéristique dépend de nombreux autres facteurs comme le type de semiconducteur, l'ensoleillement, la température de la cellule.

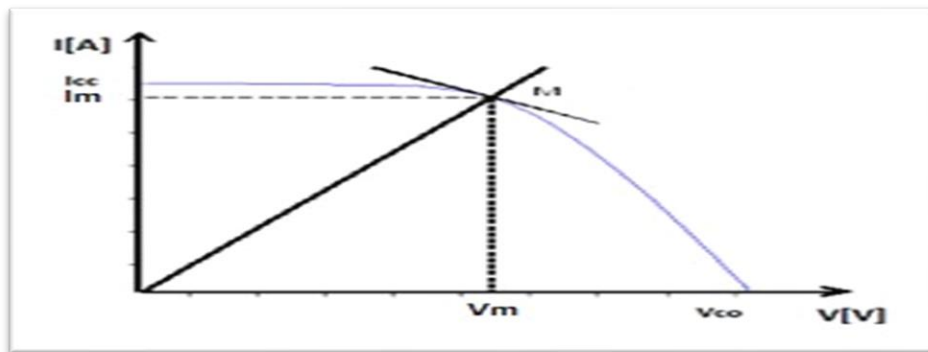


Figure II.4 : Caractéristique d'une cellule photovoltaïque

II.4.2 Courant de court-circuit

C'est le courant qui traverse la cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est en court-circuit, c'est-à-dire lorsque le pôle positif est relié au pôle négatif (la tension à ses bornes est alors nulle). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule ($P=U \times I$) est nulle.

$$I_{cc} = I_{ph}$$

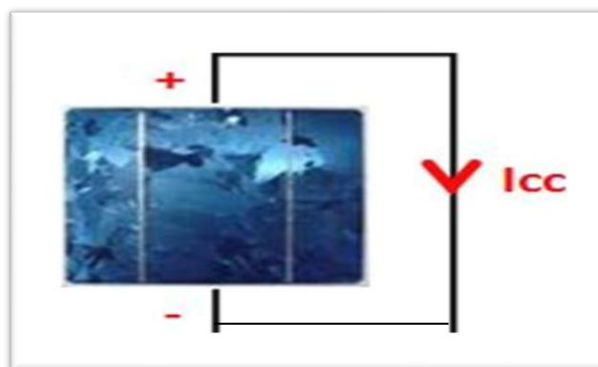


Figure II.5 : Courant de court-circuit [20]

II.4.3 Tension de circuit ouvert

Il s'agit de la tension maximale « V_{co} » aux bornes de la cellule lorsque celle-ci est en circuit ouvert, les deux pôles sont isolés électriquement de tout autre circuit électrique (le courant la traversant est alors nul). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule ($P = U \times I$) est nulle.

$$V_{co} = V_T \cdot \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1 \right) \quad (\text{II.1})$$

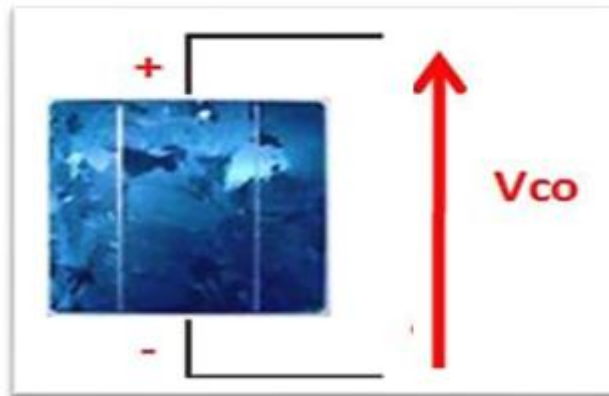


Figure II.6 : La tension de circuit ouvert [20]

II.4.4 Facteur de forme

Le facteur de forme FF représente l'efficacité de la cellule ou la qualité de la cellule par rapport à une cellule idéale où « $FF = 1$ », il peut nous renseigner sur le vieillissement de la cellule. C'est le rapport entre puissance maximale qui peut fournir une cellule (puissance débitée) P_{max} et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale ou idéale PI), on le note :

$$ff = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{I_{opt} \cdot V_{opt}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (\text{II.2})$$

II.4.5 Le rendement

Le rendement (η) de conversion d'énergie est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident P_{inc} [22] .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{opt} \cdot V_{opt}}{P_{inc}} \quad (\text{II.3})$$

II.5 Modélisation du générateur photovoltaïque (GPV)

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 [22].

II.5.1 Cellule idéale

Il y a deux paramètres principaux fréquemment employés pour caractériser une cellule photovoltaïque, le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert. Dans ce cas, la cellule photovoltaïque soumise à l'éclairement connectée à une charge peut être schématisée par un générateur de courant I_{ph} en parallèle avec une diode délivrant un courant, la figure II.7 représente le circuit équivalent d'une cellule PV idéale [22].

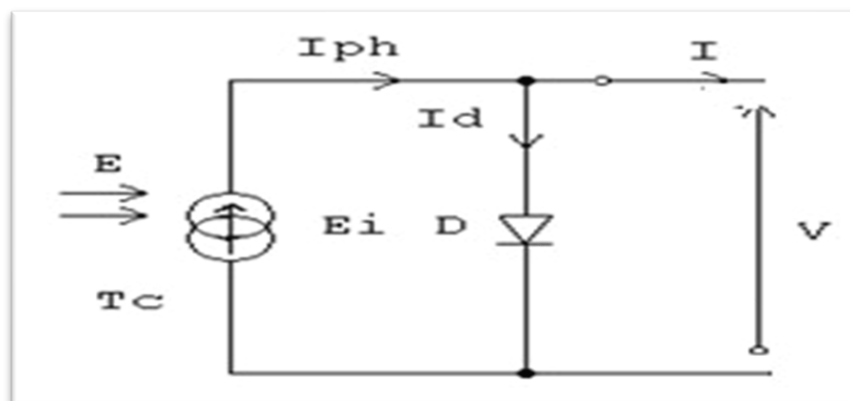


Figure II.7 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale

$$I_{ph} = I + I_d \quad (II.4)$$

$$\text{Avec} \quad I_d = I_{sat} \cdot \exp\left(\frac{eV}{AKT_c} - 1\right) \quad (II.5)$$

La loi de Kirchhoff appliquée au circuit électrique équivalent, d'une cellule idéale, donne l'expression du courant photovoltaïque engendré par les radiations lumineuses :

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

II.5.2 Modèle à une diode

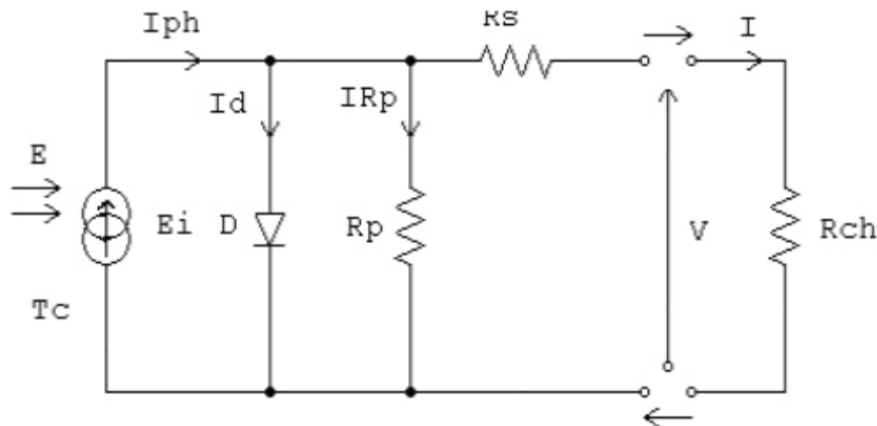


Figure II.8 : Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle à une diode

C'est le modèle sur lequel s'appuient les constructeurs en donnant les caractéristiques techniques de leurs cellules solaires (data sheets). Il est aussi considéré satisfaisant et même une référence pour les constructeurs pour cataloguer typiquement les modules solaires. Il tient compte non seulement des pertes en tension exprimées par la résistance série R_s , mais aussi des fuites de courants exprimées par une résistance parallèle R_p

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. [23]

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 :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{Rp} \quad (II.6)$$

Le courant « I_{ph} » est directement dépendant du rayonnement solaire « E_s » et de la température de la cellule « T_j » tel que :

$$I_{ph} = P1. E_s. [1 + P2. (E_s - E_{ref}) + P3 \cdot (T_j - T_{jref})] \quad (II.7)$$

La température de la cellule peut être calculée à partir de la température ambiante « T_a » comme suit :

$$T_j = T_a + E_s \cdot \left(\frac{Noct-20}{800} \right) \quad (II.8)$$

Noct : Condition de température nominale de fonctionnement de la cellule, donnée par le constructeur.

Le courant passant dans la résistance en dérivation (R_p) est :

$$I_{Rp} = \frac{V+R_s.I}{R_p} \quad (II.9)$$

Le courant de la jonction NP « I_d » est donné par :

$$\begin{aligned} \text{Avec :} \quad I_{sat} &= P_4 \cdot T_j^3 \exp\left(\frac{-E_g}{K \cdot T_j}\right) \\ I_d &= I_{sat} \cdot \left[\exp\left(\frac{e(V+R_s.I)}{A \cdot K \cdot T_c}\right) - 1 \right] \end{aligned} \quad (II.10)$$

Des précédentes relations, le courant I peut s'écrire comme suit :

$$\begin{aligned} I &= P1. E_s. [1 + P2 \cdot (E_s - E_{sref}) + P3 \cdot (T_j - T_{jref})] - \frac{V+R_s.I}{R_p} \\ &\quad - P4. T_j^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_g}{K \cdot T_j}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{e(V+R_s.I)}{A \cdot K T_c}\right) - 1 \right] \end{aligned} \quad (II.11)$$

$P_1 - P_2 - P_3 - P_4$: paramètres constants

E_g : Energie de Gap

T_{jref} : Température de référence

T_j : Température de jonction

Détermination des Paramètres du modèle à une diode :

Les paramètres « I_{ph} », « I_{sat} », « R_s », « R_p » et « V_t » dépendent de l'éclairement et de la température de la cellule et sont déterminés sur les données des constructeurs.

Les 7 paramètres constants « P_1 », « P_2 », « P_3 », « P_4 », le facteur d'idéalité « A », les résistances « R_s » et « R_p » du modèle du générateur photovoltaïque sont déterminés grâce à une résolution numérique par la méthode Newton Raphson.

$$I(V_{co}) = 0, I(0) = I_{cc}, I(V_m) = I_m \text{ et } \left. \frac{dP}{dV} \right|_{P=P_m} = I_m + \left. \frac{dP}{dV} \right|_{V=V_m}^{I=I_m} = 0 \quad (\text{II.12})$$

Les coefficients «P1», «P2 », «P3», «P4» et «A » sont donnés par :

$$\begin{cases} P1 = 0.00345 \\ P3 = \frac{P4}{V_{co}} \\ P3 \left(\frac{I_{cc} \cdot (1+P1) - I_m}{P1 \cdot I_{cc}} \right) \\ P4 = \ln \left(\frac{1+P1}{P1} \right) \\ A = \frac{\ln \left(\frac{P3}{P4} \right)}{\ln \left(\frac{V_m}{V_{co}} \right)} \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

II.5.3 Modèle à deux diodes

Ce modèle est réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes et une source de courant « I_{ph} » qui modélise la photo courante généré, la branche de la diode D1 représente le courant de diffusion « Id1 » dans la base et l'émetteur et la branche de la diode D2 représente le courant « Id2 » de génération-recombinaison dans la zone de charge d'espace de la jonction « ZCE ». [23]

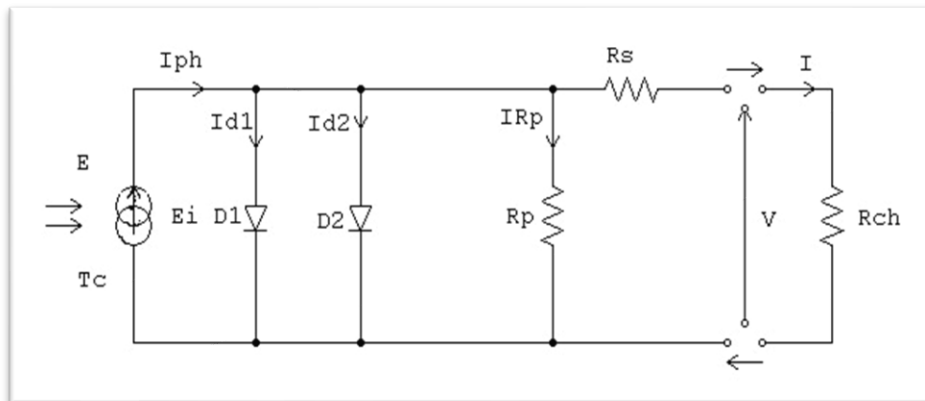


Figure II.9 : Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle à deux Diode

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 :

$$I = I_{ph} - (I_{d1} + I_{d2}) - I_{Rp} \quad (\text{II.14})$$

Avec

$$\begin{cases} I_{d1} = I_{sat1} \cdot \left[\exp \left(\frac{e(V+R_s I)}{A \cdot K \cdot T_j} \right) - 1 \right] \\ I_{sat1} = P_4 \cdot T_j^3 \exp \left(\frac{-E_g}{K \cdot T_j} \right) \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

Et

$$\begin{cases} Id2 = Isat2 \cdot \left[\exp \left(\frac{e(V+Rs.I)}{2 \cdot A \cdot K \cdot Tj} \right) - 1 \right] \\ Isat 2 = P_5 \cdot T_j^3 \exp \left(\frac{-Eg}{2 \cdot K \cdot Tj} \right) \end{cases} \quad (II.16)$$

D'où le courant total est donné par :

$$\begin{aligned} I = P1.Es. \left[1 + P2. (Es - Esref) + P3 \cdot (Tj - TJref) \right] - \frac{V+Rs.I}{Rp} \\ - \left[P_4 T_j^3 \cdot \exp \left(-\frac{Eg}{K \cdot Tj} \right) \right] \cdot \left[\exp \left(\frac{e \cdot (V+Rs.I)}{A \cdot K \cdot Tj} \right) - 1 \right] \\ - \left[P_5 T_j^3 \cdot \exp \left(-\frac{Eg}{2 \cdot K \cdot Tj} \right) \right] \cdot \left[\exp \left(\frac{e \cdot (V+Rs.I)}{2 \cdot A \cdot K \cdot Tj} \right) - 1 \right] \end{aligned} \quad (II.17)$$

II.6 Association des cellules photovoltaïques

Selon le besoin en énergie, les cellules PV peuvent être regroupées en série (somme des tensions de chaque cellule) ou en parallèle (somme des intensités de chaque cellule), on peut constituer un générateur PV selon les besoins des applications visées. Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités.

II.6.1 Association en série des cellules

Une association en série des cellules permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant mais elles peuvent fonctionner à des tensions différentes. Et la caractéristique résultante du groupement série est obtenue par l'addition des tensions élémentaires de chaque cellule.

$$V = \sum_{i=1}^{ns} V_i \quad (II.18)$$

V: Tension de l'assemblage, Vi : tension d'une cellule et ns : Nombre de cellules en série

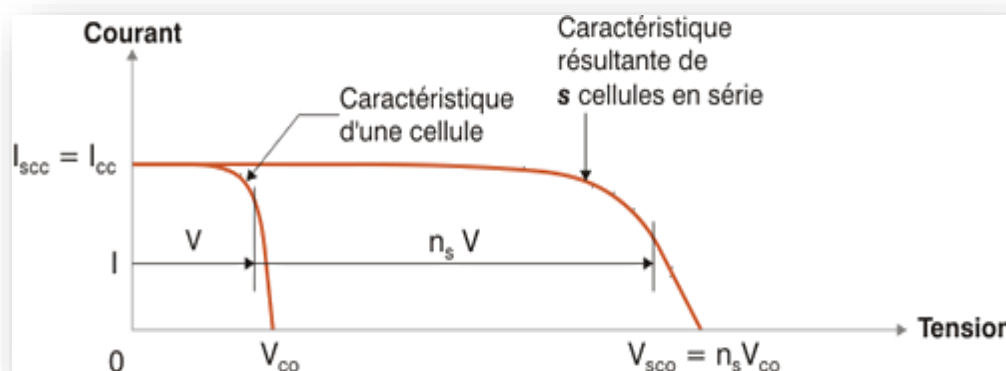


Figure II.10 : Caractéristique résultante d'un groupement en série de ns cellules identiques

II.6.2 Association en Parallèle des cellules photovoltaïques

D'autre part, une association parallèle des cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension mais elles peuvent fonctionner avec des courants différents et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants.

$$I = \sum_{i=1}^{n_p} I_i \quad (\text{II.19})$$

I: Courant de l'assemblage, I_i : Courant d'une cellule, n_p : Nombre de cellules en parallèle

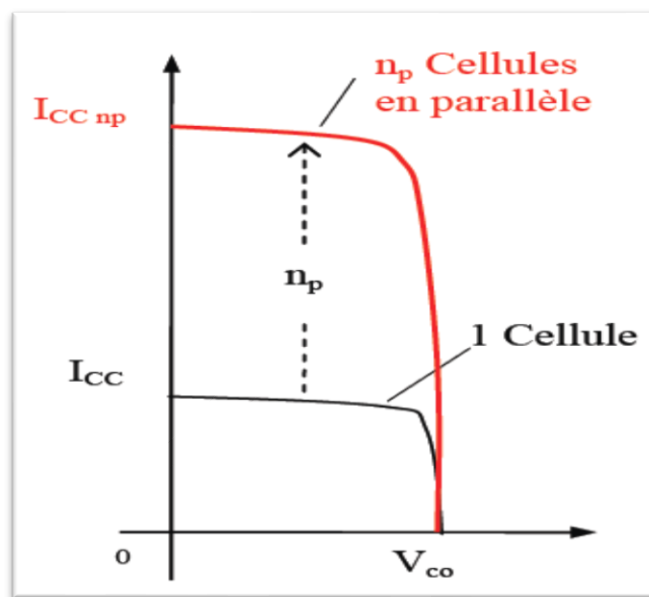


Figure II.11 : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de n_p cellules identiques

II.7 Générateur photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque ou module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que la puissance, le courant et la tension. Les panneaux sont connectés en série. Ils forment alors une chaîne de modules [21].

Les modules sont montés en série et en parallèle pour réaliser un champ photovoltaïque



Figure II.12 : Cellules, modules et champ panneaux photovoltaïques

Afin d'assurer la protection électrique d'une installation photovoltaïque, des diodes « anti-retour » sont utilisées pour éviter qu'en cas d'ombre sur une chaîne ou cas de circuit fermé, elle se comporte comme un récepteur et que le courant y circule en sens inverse et l'endommage.

II.8 Composants d'un système de pompage photovoltaïque

Les systèmes de pompage solaire photovoltaïque utilisent la conversion du rayonnement solaire en électricité pour alimenter des pompes immergées dans un forage ou un puits ainsi que des pompes de surface pour le refoulement [25].

Le pompage solaire 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 système de pompage solaire est constitué généralement par :

- Le générateur photovoltaïque,
- le groupe moteur-pompe,
- l'électronique de commande et de contrôle,
- la partie stockage.

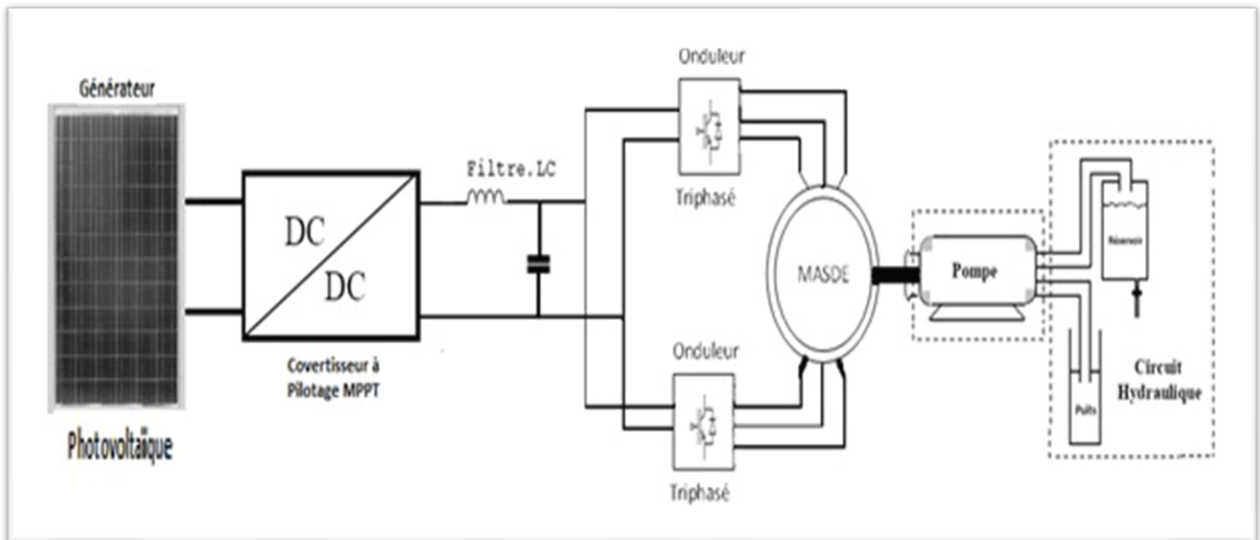


Figure II.13 : Schéma de l'installation photovoltaïque

II.8.1 Modélisation du générateur photovoltaïque

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles mathématiques du panneau photovoltaïque (modèle à une diode, à deux diodes, ...), qui ont été développés, dont le but est l'obtention de la caractéristique courant-tension pour l'analyse et l'évaluation des performances des systèmes photovoltaïques. [26]

Le modèle à deux diodes est le plus proche de la réalité et présente des erreurs relativement faibles par rapport aux autres modèles étudiés selon des diverses études effectuées. Le choix se portera donc, sur ce modèle. [27]

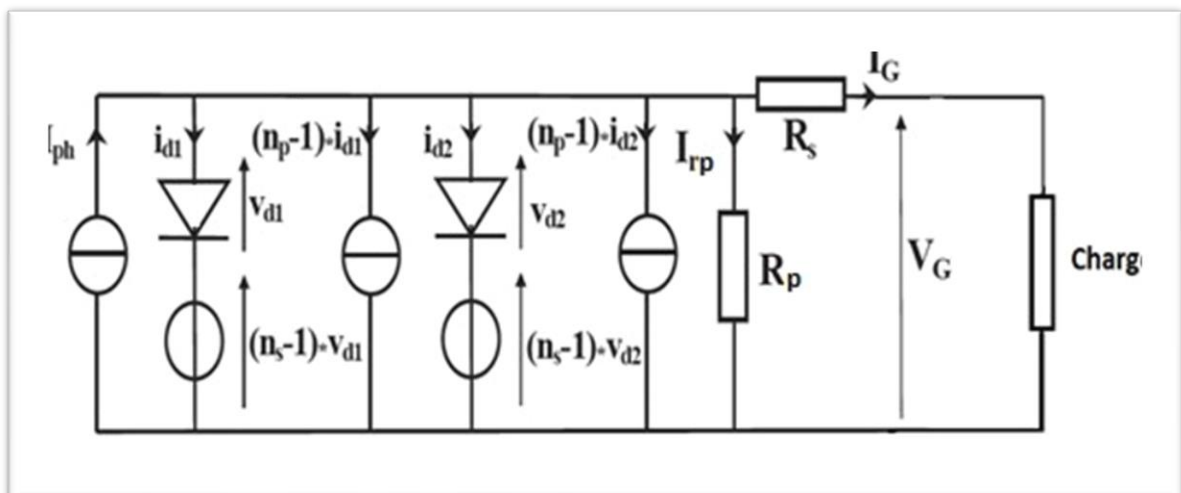


Figure II.14 : Schéma électrique du « modèle à deux diodes » pour un module photovoltaïque

$$I_G = n_p \cdot I \quad I_d = n_p \cdot i_d \quad I_{rp} = n_p \cdot i_{rp} \quad R_s = \frac{n_s}{n_p} \cdot r_s$$

$$V_G = n_s \cdot V \quad V_d = n_s \cdot v_d \quad I_{ph} = n_p \cdot i_{ph} \quad R_p = \frac{n_s}{n_p} \cdot r_p$$

La modélisation est utilisée généralement pour approximer la sortie du générateur photovoltaïque (tension, courant) en fonction de deux entrées qui sont la température de jonction des cellules T_j [°c] et l'éclairement reçu sur le plan du générateur (l'ensoleillement) E_s [W/m²]. Ainsi Le panneau défini, peut être représenté par un quadripôle possédant deux variables d'entrées et de sortie

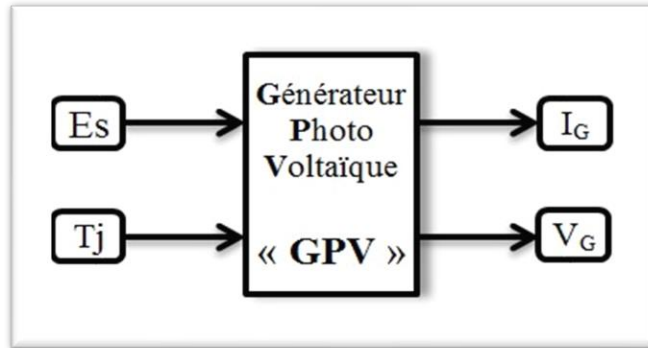


Figure II.15 : Schéma Bloc du Générateur Photovoltaïque

Le courant délivré par le panneau photovoltaïque est donné par la relation suivante :

$$I_G = P_1 \cdot E_s \cdot [1 + P_2 \cdot (E_s - E_{sref}) + P_3 \cdot (T_j - T_{jref})] - \frac{V_G + R_s \cdot I_G}{R_p}$$

$$- \left[P_4 T_j^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{K \cdot T_j}\right) \right] \cdot \left[\exp\left(\frac{e \cdot (V_G + R_s \cdot I_G)}{A \cdot K \cdot T_j}\right) - 1 \right]$$

$$- \left[P_5 T_j^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2 \cdot K \cdot T_j}\right) \right] \cdot \left[\exp\left(\frac{e \cdot (V_G + R_s \cdot I_G)}{2 \cdot A \cdot K \cdot T_j}\right) - 1 \right] \quad (II.20)$$

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 : [B12]

$$P_1 = 0,340 \cdot 10^{-3}, \quad P_2 = 0, \quad P_3 = 0,20 \cdot 10^{-5}, \quad P_4 = 450, \quad P_5 = 72,$$

$$A = 1, \quad R_s = 0,58 \quad \text{et} \quad R_p = 160.$$

II.8.2 Convertisseur à pilotage MPPT

Le MPPT est le principe permettant de suivre le point de puissance maximale d'un générateur électrique (dit aussi régulateur) dont la caractéristique $I=f(V)$ est fortement non linéaire, un circuit mesure en permanence la tension et le courant du photogénérateur afin d'en tirer de l'énergie au point de puissance maximale. Ceci permet le Fonctionnement du système photovoltaïque avec le maximum d'énergie produite, quelque soient les conditions atmosphériques, température et l'ensoleillement qui varient d'une manière aléatoire, ces régulateurs fonctionnent soit en élevant ou en abaissant la tension. Un premier circuit ajuste la demande au point de puissance maximale du photogénérateur et un deuxième circuit transforme la tension et le courant pour l'adapter au type de batterie [27].

La commande du système MPPT consiste donc en l'ajustement de ce convertisseur à récupérer le maximum d'énergie produite par le photogénérateur, c'est-à-dire minimiser voire éliminer les pertes d'énergie.

La méthodes conventionnelles Perturbation et Observation (P&O : pertub and observe) est sans doute la plus simple pour faire une recherche du point de puissance maximale de panneau photovoltaïques le principe des commandes MPPT de type (P&O) consiste à perturber le 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).[27]

La figure II.16 représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type PO, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension) sont nécessaires pour déterminer la puissance du GPV à chaque instant.

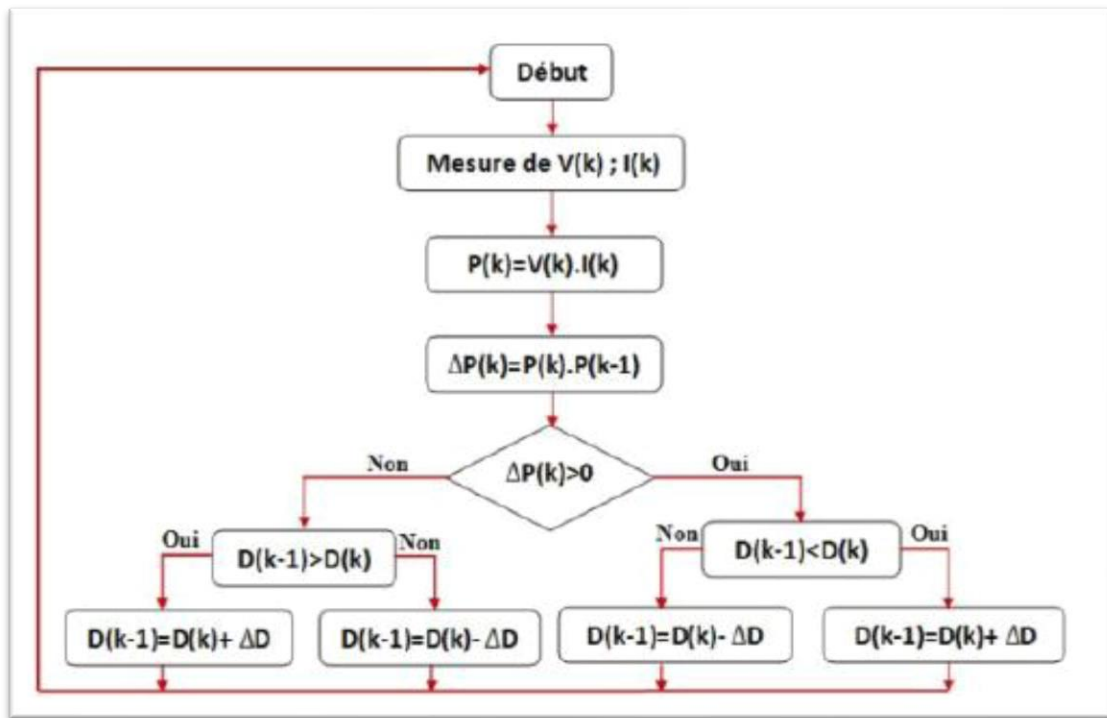


Figure II.16 : Algorithme de la méthode PO

II.8.3 Modélisation du hacheur Buck-Boost

Les convertisseurs DC/DC sont utilisés, dans le cadre d'un système photovoltaïque pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux PV (source continue) avec différentes charges pour effectuer le transfert de la puissance maximale.

Leur rôle dans ce cas, consiste à maintenir le point de fonctionnement sur ou assez proche du MPP pour n'importe quelles conditions de fonctionnement (rayonnement, température, caractéristique de charge, etc).

Pour les applications photovoltaïques, on distingue 3 types de convertisseurs non-isolés les plus répandus :

- Hacheur abaisseur (ou buck),
- Hacheur élévateur (ou boost),
- Hacheur abaisseur-élévateur (buck-boost).

Le convertisseur est choisi en fonction de la charge à alimenter

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 ce convertisseur statique permet d'avoir une tension continue variable supérieure ou inférieure à la tension d'entrée qui est fixe.

Lors de la première phase de conduction, de 0 à αT , l'interrupteur commandé est fermé. La diode n'est pas passante et l'inductance stocke l'énergie fournie par le générateur d'entrée et dans la seconde phase, de αT à T , on ouvre l'interrupteur commandé et la diode devient passante l'inductance restitue son énergie à la charge.

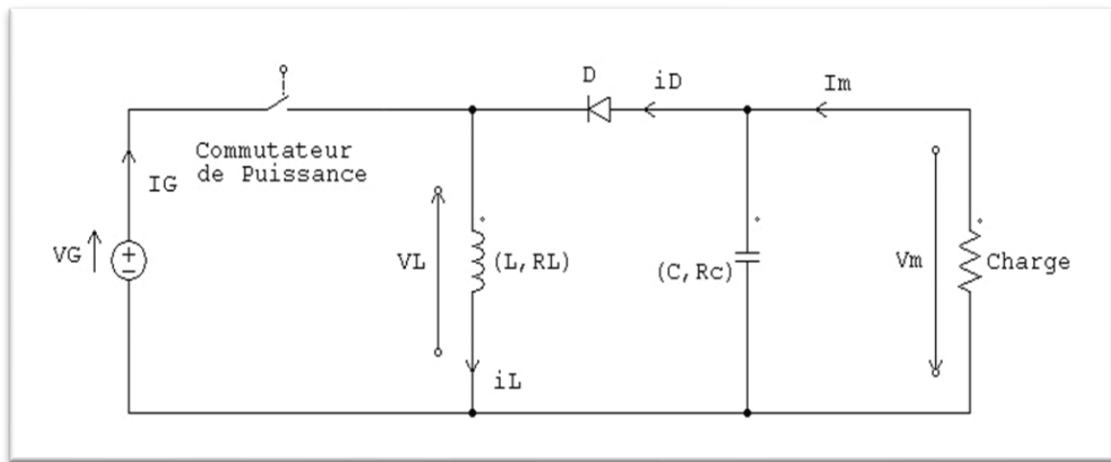


Figure II.17 : Schéma du Hacheur Buck - Boost

Le rapport cyclique α ajuste la tension et le courant de sortie tel que [25]:

$$\begin{cases} V_m = \frac{-\alpha}{1-\alpha} \cdot V_G \\ I_m = \frac{1-\alpha}{\alpha} \cdot I_G \end{cases} \quad (II.21)$$

Après introduction des paramètres réels du circuit, La relation devient :

$$V_m = \frac{-\alpha}{1-\alpha} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{R_L}{R} \cdot (1-\alpha)\right)} V_G \quad (II.22)$$

Le modèle moyen du hacheur est alors donné par :

$$\begin{cases} R_L i_L + L \cdot \frac{d}{dt} \cdot i_L = 2\alpha \cdot V_G \\ i_c(t) = C \cdot \frac{d}{dt} \cdot V_c + \frac{(v_m - V_c)}{R_c} = (1 - \alpha) i_L - \frac{v_m}{R} \end{cases} \quad (II.23)$$

II.8.4 Modélisation du filtre

Pour venir à bout des hautes fréquences, il est nécessaire d'utiliser un filtre passe-bas « LC », représenté par la figure II.18.[25]

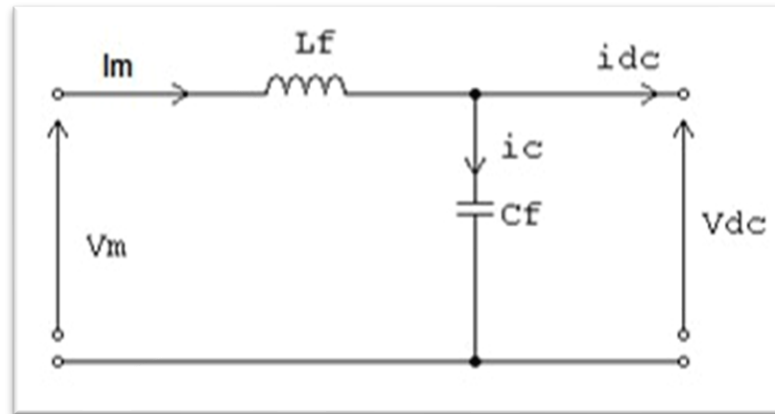


Figure II.18 : Schéma du filtre passe

Les équations caractérisant le filtre sont comme suit :

$$\begin{cases} V_m = L_f \cdot \frac{d}{dt} i_m + V_{dc} \\ \frac{d}{dt} V_{dc} = \frac{1}{C_f(i_m - i_{dc})} V_m \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

La fréquence de coupure est de $f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}}$

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié le principe de l'effet photovoltaïque et la cellule PV et ses paramètres. Nous avons présenté une étude sur les convertisseurs DC/DC (hacheurs) et leurs commandes MPPT pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale.

III Etude de la machine asynchrone à double étoile en mode dégrade

III.1 Introduction

Pour ce chapitre, nous intéresseront au fonctionnement de la machine car, 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 apparitions.

En présence d'une anomalie afin de pouvoir surpasser le défaut et assurer la continuité de service et un fonctionnement le plus satisfaisant possible, et pour cela nous avons choisi le mode de marche dégrade.

III.2 Etat de l'art du mode dégrade

La littérature reprend souvent la modélisation de la machine pour reconstruire une commande permettant de maintenir le fonctionnement dans des conditions satisfaisantes. Au-delà du fractionnement de la puissance par phase, la redondance parallèle au niveau de l'alimentation de l'actionneur permet une marche dégradée même si une phase d'alimentation est ouverte.

Avant de s'attacher au traitement par la commande de l'ondulation de couple de la machine dégradée, des dispositions sont prises pour isoler les phases en défaut. Pour protéger l'équipement en évitant 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.

Plus la machine dispose de phases, moins la perturbation sur le couple est importante en cas d'ouverture d'une phase statorique. Bien entendu, les ondulations de couple s'accroissent avec le nombre de phases défectueuses. Quand le nombre de phases est important, de 15 à 18 par exemple, aucun traitement particulier n'est effectué, sinon que s'assurer d'un « taux d'ondulation » du couple acceptable et de courants limités dans les phases saines.

À l'opposé, pour les machines disposant entre cinq et 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. [28]

III.3 Etude des éventuels défauts

Selon les parties atteintes par la dégradation, les défauts peuvent être rassemblés en quelques groupe :

- ❖ Dégradation au niveau du réseau
- ❖ Dégradation au niveau du moteur
- ❖ Dégradation au niveau des connectiques
- ❖ Dégradation au niveau de l'alimentation de la machine

Comme nous pouvons le constater, les causes d'un dysfonctionnement d'une chaîne d'énergie sont multiples. Mais, de nombreuses études statistiques sur 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. [29]

III.3.1 Défaut d'ouverture d'un transistor de puissance

Défaut d'ouverture d'un interrupteur de puissance, si la commande de l'interrupteur complémentaire du même bras est active, provoque un court-circuit de la tension d'alimentation.

De façon à éviter la destruction d'un transistor de puissance, un défaut d'ouverture d'un des Transistors du bras en défaut doit être :

- soit annuler la commande du transistor sain ceci peut être réalisé par une interface spécialisée voire la figure III.1.
- soit provoquer la fusion du fusible protégeant le bras en défaut. Un fusible à fusion ultra rapide est nécessaire et le juste choix de son calibre est primordiale voire la figure III.2.

Dans ce cas ou dans l'autre, la tension aux bornes de la phase connectée au bras en défaut n'est plus contrôlable. Suivant le transistor en défaut et la position du fusible, l'extrémité de la phase connectée au bras en défaut est soit, directement ou par l'intermédiaire d'une diode, reliée à un des potentiels de l'alimentation.

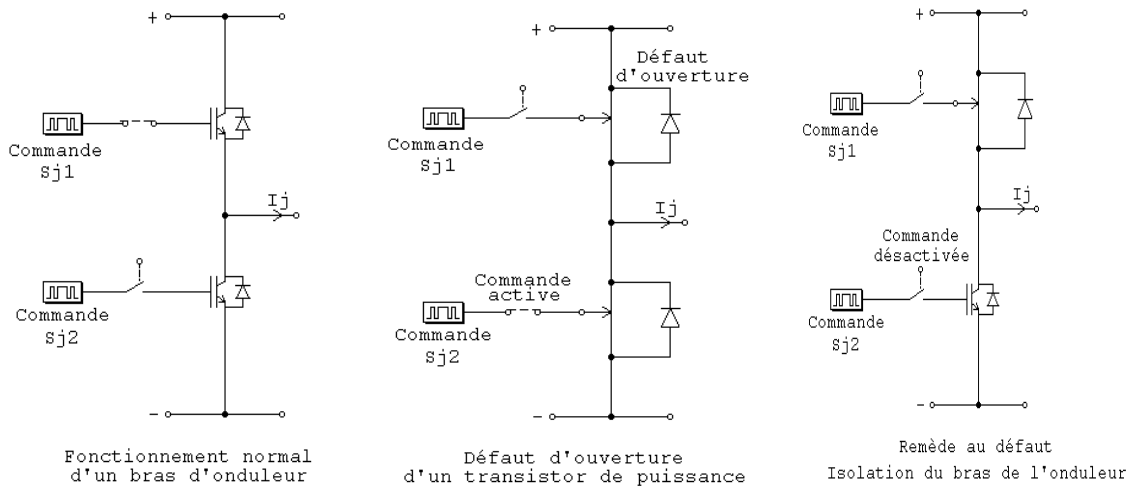


Figure III.1 : Défaut d'ouverture d'un transistor de puissance

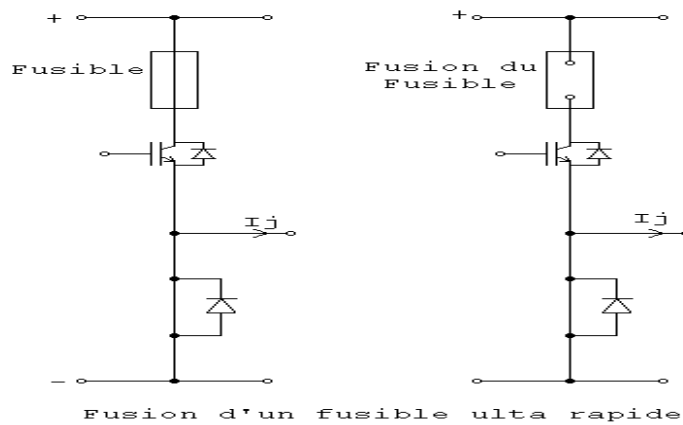


Figure III.2 : Fusion d'un fusible ultra rapide

III.3.2 Défaut de fermeture d'un transistor de puissance ou fusion d'un fusible

Un défaut de fermeture d'un transistor de puissance ou la fusion d'un fusible, lorsque celui-ci se trouve en série avec les transistors composants le bras, amène le système dans les mêmes conditions qu'après le traitement en défaut d'ouverture. La tension aux bornes de la phase connectée au bras en défaut devient incontrôlable. [30]

III.3.3 Stratégie de déconnexion d'une phase à un bras en défaut

Au moment d'un défaut, la tension aux bornes d'une phase devient incontrôlable engendrant ainsi un couple perturbateur voir des courants destructeurs.

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. [31]

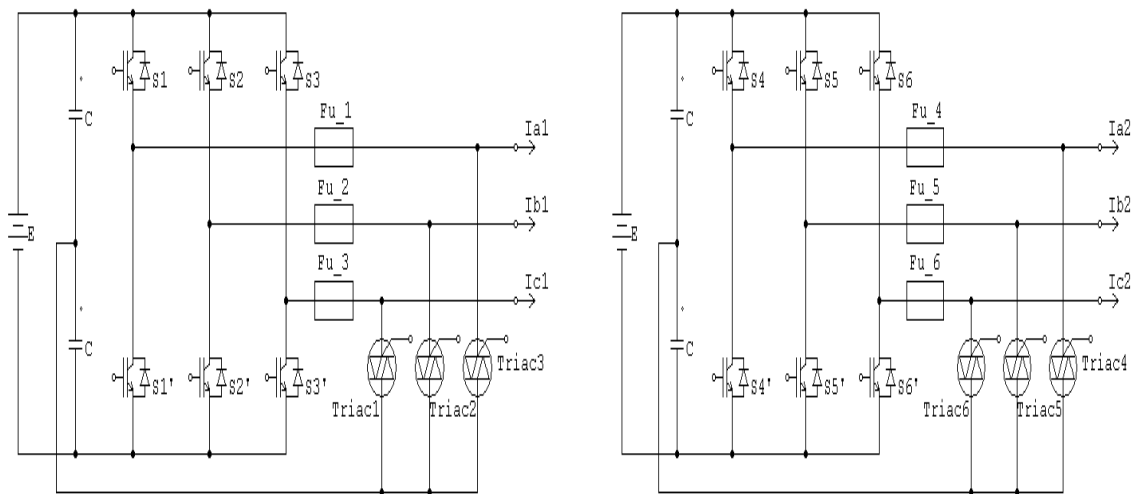


Figure III.3 : Exemple d'équipement permettant la déconnexion d'une phase à un bras en défaut via un triac

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. [29]

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. [30]

III.4 Stratégie de commande en mode dégradé

Ces stratégies sont basées sur la modification du courant dans une ou plusieurs phases de façon à conserver un couple constant lors d'un fonctionnement en mode dégradé dans lequel une ou plusieurs phases sont ouverte.

III.4.1 Modification du courant d'une phase encore saine par phase ouverte

III.4.1.1 Présentation de la méthode

Pour assurer un couple constant maximal et à pertes joules limitées, lors d'une phase ouverte en défaut, le meilleur choix se porte sur une phase saine située à 90° électrique de celle-ci.

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.

[31]

❖ Supposons que la *FEM* induite dans la phase « k » s'exprime par : [30]

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

Et
$$i_k = S_k(\theta) \cdot I_{max} \quad \text{avec} \quad S_k(\theta) = S\left(\theta - \frac{2\pi(k-1)}{n}\right)$$

Avec $f(\theta)$ et $S(\theta)$ qui sont respectivement les fonctions de forme et des fems et des courant.

Pour obtenir un couple constant maximal et limitées les pertes joules, nous avons

$$i_k = I_{max} \cdot \frac{f_k(\theta)}{\sum_{k=1}^n f_k(\theta) S_k(\theta)}$$

En sachant que n représente le nombre de phases de la machine, le couple devient.

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

Dans le cas où on déconnecte la phase « j », le couple devient.

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

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 et le couple deviendra :

$$\begin{aligned} \text{Avec} \quad C_{n-1}(\theta)_f &= C_{n-1}(\theta) + I_{max} \cdot f_m(\theta) \cdot (S'_m(\theta) - S_m(\theta)) \\ S'_m(\theta) &= S_m(\theta) + \frac{C_{n-1}(\theta)_f - C_{n-1}(\theta)}{I_{max} f_m(\theta)} \end{aligned} \quad (III.3)$$

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

$$\begin{aligned} C_{n-1}(\theta_1)_f &= C_n - I_{max} f_j(\theta_1) \cdot S_j(\theta_1) \\ C_{n-1}(\theta_1)_f &= C_n - I_{max} \cdot f \left(\frac{2\pi(m-j)}{n} \right) \cdot S \left(\frac{2\pi(m-j)}{n} \right) \end{aligned} \quad (III.4)$$

Ce qui engendre un cas particulier des fems sinusoïdales et des courant sinusoïdales

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

Le couple en mode de fonctionnement sans dégradation est donné par

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

En déconnectant la phase « j », implique une réduction de la valeur moyenne du couple et une ondulation de pulsation « 2ω ».

$$\begin{aligned} C_{n-1} &= C_n - C_n \left[\frac{1 - \cos 2 \left(\omega t - \frac{2\pi(j-1)}{n} \right)}{n} \right] \text{ ou encore} \\ C_{n-1} &= \frac{C_n}{n} \left[(n-1) + \cos \left(2\omega t - 2(j-1) \frac{2\pi}{n} \right) \right] \end{aligned} \quad (III.5)$$

De (III.3) 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

$$C_{(n-1)f} = \frac{C_n}{n} [(n-2) + 2\cos^2(2\pi(m-j)/n)] \quad (III.6)$$

De (III.6), « $C_{(n-1)f}$ » 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. [32]

III.4.2 Modification du courant dans chacune des phases encore saines

III.4.2.1 Présentation de la méthode

Pour cette méthode les dégradations sont réparties sur les phases saines de la machine, elle reste valable tant qu'il reste un nombre de phase suffisant pour produire un champ tournant.

Dans le cas d'une machine à « n phases », la création d'un champ tournant statorique obéit aux deux relations suivantes : [33]

$$\begin{cases} i_1 \cdot \cos 0 + i_2 \cdot \cos \frac{2\pi}{n} + i_3 \cdot \cos \frac{4\pi}{n} + i_4 \cdot \cos \frac{6\pi}{n} + \dots + i_n \cdot \cos \frac{2(n-1)\pi}{n} = \frac{n}{2} i \cos \theta \\ i_1 \cdot \sin 0 + i_2 \cdot \sin \frac{2\pi}{n} + i_3 \cdot \sin \frac{4\pi}{n} + i_4 \cdot \sin \frac{6\pi}{n} + \dots + i_n \cdot \sin \frac{2(n-1)\pi}{n} = \frac{n}{2} i \sin \theta \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

En suppose que la première phase est déconnectée, et pour garantir un couple constant, il faudra respecter les relations :

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

En introduisant la notation de phaseur complexe, séparation des termes en « cosinus » et les termes en « sinus », le courant devient : [C04]

$$i_k = x_k \cdot \cos \theta + y_k \cdot \sin \theta \text{ avec } k = 2, 3, \dots, n \quad (\text{III.9})$$

Alors le système devient :

$$\begin{cases} x_2 \cos \frac{2\pi}{n} + x_3 \cos \frac{4\pi}{n} + x_4 \cos \frac{6\pi}{n} + \dots + x_n \cos \frac{2(n-1)\pi}{n} = \frac{n}{2} \\ y_2 \cos \frac{2\pi}{n} + y_3 \cos \frac{4\pi}{n} + y_4 \cos \frac{6\pi}{n} + \dots + y_n \cos \frac{2(n-1)\pi}{n} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

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

L'objectif est de déterminer des courants $k i$ tel que $\sqrt{x_k^2 + y_k^2}$ soit minimum la machine étant supposée couplée en étoile :

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

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.4.3 Comparaison entre les deux méthodes

Hormis le fais, que les deux méthodes étudiées assurent un niveau de couple constant lors de l'ouverture d'une ou plusieurs phases de la machine ayant plus de trois phases, quelques inconvénients peuvent être remarquer :

En effet les deux méthodes nécessitent un changement des caractéristiques du courant dans une ou plusieurs phases suivant la phase en défaut. Pour cela nous avons besoin d'un système capable de détecter les phases en défectueuses et pouvoir ajuste les nouvelles consignes du courant. Une table résumant les consignes du courant en fonction des phases déconnectées s'avère nécessaire.

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. [29]

III.5 Commande d'une machine asynchrone double étoile en mode dégradé

III.5.1 Modèle de la MASDE dans le repère « α - β »

Afin de simplifier l'étude, il est nécessaire de ce réfère au repère "ab " pour le bon suivi de l'évolution de la machine en mode dégradé, comme illustre sur la figure III.4.

Alors, en principe si seulement deux phases de la MASDE sont en fonctionnement, le moteur peut continuer à opérer régulièrement sous des méthodes du contrôle résistantes

[C11], [C12].

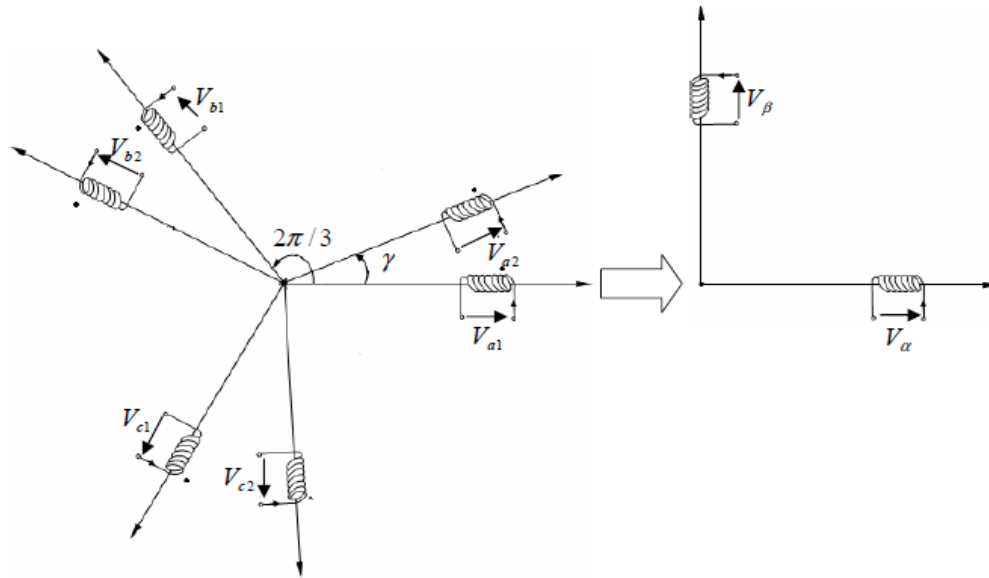


Figure III.4 : Transformation équivalente de la machine asynchrone double étoile de la base « a_1 a_2 b_1 b_2 c_1 c_2 » à « ab »

III.5.2 Equations électriques de la MASDE

En tenant compte de la représentation des enroulements des deux stators et du rotor et des hypothèses citées dans le chapitre I, les équations de la machine s'écrivent comme suit : [33 ;34]

$$\begin{bmatrix} [V_s] \\ [0] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [R_s] & 0 \\ 0 & [R_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [L_{sr}] \\ [L_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} \quad (\text{III.11})$$

III.5.3 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. [30]

L'enroulement statorique de la machine crée une force magnétomotrice « FMM » équivalents à

$$FMM = \frac{N_s}{2} \left[i_{a1} \cos \alpha + i_{a2} \cos \left(\alpha - \varphi \right) + i_{b1} \cos \left(\alpha - \frac{2\pi}{3} \right) + i_{b2} \cos \left(\alpha - \varphi - \frac{2\pi}{3} \right) \right. \\ \left. + i_{c1} \cos \left(\alpha - \frac{4\pi}{3} \right) + i_{c2} \cos \left(\alpha - \varphi - \frac{4\pi}{3} \right) \right]$$

Avec α : position d'un point dans l'entrefer.

φ : décalage entre deux étoiles.

Après quelques arrangements :

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

$$D'où \quad FMM = \frac{N_s}{2} [\cos \theta i_{s\alpha} + \sin \theta i_{s\beta}] \quad (III.12)$$

Ainsi nous pouvons dire que la FMM produite par les six phases statoriques est équivalente à la FMM produite par deux enroulements en quadrature nommés "sa " et "sb " parcourus par les courants " $i_{s\alpha}$ " et " $i_{s\beta}$ " ces courants sont définis par la transformation suivante :

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} = [Tc] [i_{a1} \quad i_{a2} \quad i_{b1} \quad i_{b2} \quad i_{c1} \quad i_{c2}]' \text{ avec } [Tc] = \begin{bmatrix} [\alpha_0] / \|\alpha_0\| \\ [\beta_0] / \|\beta_0\| \end{bmatrix} \quad (III.13)$$

Avec

$$\begin{cases} [\alpha_0] = \left[\cos 0 \cos \frac{\pi}{6} \cos \frac{2\pi}{3} \cos \frac{5\pi}{6} \cos \frac{4\pi}{3} \cos \frac{3\pi}{2} \right] \\ [\beta_0] = \left[\sin 0 \sin \frac{\pi}{6} \sin \frac{2\pi}{3} \sin \frac{5\pi}{6} \sin \frac{4\pi}{3} \sin \frac{3\pi}{2} \right] \end{cases} \quad (III.14)$$

Le système statorique est de dimension six, et d'un point de vue mathématique, il ne peut pas être réduit à un système de dimension deux. Nous devons donc trouver quatre autres vecteurs pour former la nouvelle base orthogonale. Ils sont nommés [Z1], [Z2], [Z3], et [Z4] sont orthogonaux entre eux, et orthogonaux aux vecteurs « sa » et « sb ».

La matrice $[Tz]$ comportant les quatre vecteurs $[Z1]$, $[Z2]$, $[Z3]$, et $[Z4]$, peut être facilement obtenue, en utilisant la fonction "null" de la matrice $[Tc]$ dans MATLAB.

La matrice $[Tz]$ est donnée par la relation suivante : [30]

$$[Tz] = \text{null } [Tc].^t = \begin{bmatrix} [Z1]/\| Z1 \| \\ [Z2]/\| Z2 \| \\ [Z3]/\| Z3 \| \\ [Z4]/\| Z4 \| \end{bmatrix} \quad (\text{III.15})$$

De (III.13) et (IV.15) la matrice globale de transformation peut s'écrire comme suit :

$$[Tn] = \begin{bmatrix} [Tc] \\ [TZ] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\alpha_0]/\|\alpha_0\| \\ [\beta_0]/\|\beta_0\| \\ [Z1]/\| Z1 \| \\ [Z2]/\| Z2 \| \\ [Z3]/\| Z3 \| \\ [Z4]/\| Z4 \| \end{bmatrix} \quad (\text{III.16})$$

et donc

$$\begin{bmatrix} isa \\ is\beta \\ iz1 \\ iz2 \\ iz3 \\ iz4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\alpha_0]/\|\alpha_0\| \\ [\beta_0]/\|\beta_0\| \\ [Z1]/\| Z1 \| \\ [Z2]/\| Z2 \| \\ [Z3]/\| Z3 \| \\ [Z4]/\| Z4 \| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ia1 \\ ia2 \\ ib1 \\ ib2 \\ ic1 \\ ic2 \end{bmatrix} \quad (\text{III.17})$$

Les courants fictifs « isa » et « isβ » 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.5.4 Equation dans le repère « α-β »

Le modèle découplé de la machine asynchrone double étoile donne les équations des tensions stator et rotor : [34]

$$\text{Pour le stator : } \begin{cases} V_{s\alpha} = r_s i_{s\alpha} + \frac{d}{dt} \varphi_{s\alpha} \\ V_{s\beta} = r_s i_{s\beta} + \frac{d}{dt} \varphi_{s\beta} \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

$$\text{Pour le rotor : } \begin{cases} 0 = r_r i_{r\alpha} + \frac{d}{dt} \varphi_{r\alpha} + \omega_r \varphi_{r\beta} \\ 0 = r_r i_{r\beta} + \frac{d}{dt} \varphi_{r\beta} - \omega_r \varphi_{r\alpha} \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

φ_s, φ_r sont respectivement les flux statorique et rotorique dans l'espace « α,β »

$$\begin{cases} \varphi_{s\alpha} = L_{sd}i_{s\alpha} + M_d i_{r\alpha} \\ \varphi_{r\alpha} = L_r i_{r\alpha} + M_d i_{s\alpha} \\ \varphi_{s\beta} = L_{sq}i_{s\beta} + M_q i_{r\beta} \\ \varphi_{r\beta} = L_r i_{r\beta} + M_q i_{s\beta} \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

Avec
$$\begin{cases} L_{sd} = L_{1s} + \|\alpha\|^2 L_{ms}, M_d = \|\alpha_0\| \|\alpha\| \cdot L_{ms} \\ L_{sq} = L_{1s} + \|\beta\|^2 L_{ms}, M_q = \|\beta_0\| \|\beta\| \cdot L_{ms} \\ L_r = L_{1r} + \|\alpha_0\|^2 \cdot L_{ms} = L_{1r} + \|\beta_0\|^2 \cdot L_{ms} \quad \text{et} \quad \|\alpha_0\| = \|\beta_0\| = \sqrt{3}. \end{cases} \quad (\text{III.21})$$

III.5.5 Equation dans l'espace « Z »

Pour un fonctionnement sans la première phase, et dans l'espace « Z », les paramètres de la machine sont indépendants des matrices de transformation. [30]

$$\begin{cases} V_{z1} = R_s i_{z1} + L_{1s} \frac{di_{z1}}{dt} \\ V_{z2} = R_s i_{z2} + L_{1s} \frac{di_{z2}}{dt} \\ V_{z3} = R_s i_{z3} + L_{1s} \frac{di_{z3}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.22})$$

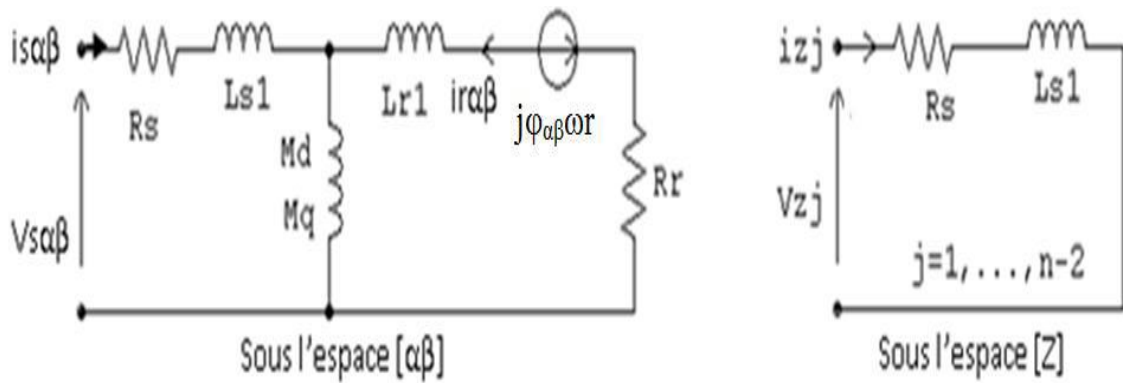


Figure III.5 : Schéma électrique équivalent de la machine asynchrone double étoile en mode dégradé. [30]

III.5.6 Equation mécanique

Les équations du couple électromagnétique sont données par les expressions suivantes :

$$C_{em} = \frac{p}{L_r} [M_q \cdot i_{s\beta} \cdot \varphi_{r\alpha} - M_d \cdot i_{s\alpha} \cdot \varphi_{r\beta}] \quad (\text{III.23})$$

$$C_{em} - C_r = J \frac{d}{dt} \Omega(t) + F \cdot \Omega(t) \quad (\text{III.24})$$

III.6 Réduction des oscillations du couple

Lors du disfonctionnement d'une ou plusieurs phases, la MASDE présente des oscillations de couple qui potentiellement peuvent affecter le rendement de la machine.

L'objectif principale et de minimiser au maximum ces oscillations, en appliquant les deux méthodes étudiées un peu plus haut, pour maintenir la machine dans un état de fonctionnement satisfaisant.

❖ Pour la première méthode

La phase S_{a1} est supposée ouverte « $j=1$ », et la phase S_{b1} est choisie pour un changement de « $m=3$ » qui supportera toute la contrainte du défaut et les courants exigés pour annuler les oscillations du couple sont d'où : [34]

$$\begin{cases} i_{sa2} = I_{max} \sin(\omega t - \pi/6) \\ i_{sb1} = 2I_{max} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \cdot \sin(\omega t) = -I_{max} \sin(\omega t) \\ i_{sb2} = I_{max} \sin(\omega t - 5\pi/6) \\ i_{sc1} = I_{max} \sin(\omega t - 4\pi/3) \\ i_{sc2} = I_{max} \sin(\omega t - 3\pi/2) \end{cases} \quad (III.25)$$

❖ Pour la deuxième méthode

Ici la contrainte sera répartie sur toutes les phases saines et après avoir développé les équations, nous obtenons de nouvelles équations de courants : [10][35]

$$\begin{cases} i_{sa2} = 1.27 \cdot I_{max} \sin(\omega t - \pi/3) \\ i_{sb1} = 1.27 \cdot I_{max} \sin(\omega t - 5\pi/6) \\ i_{sb2} = 1.27 \cdot I_{max} \cdot \sin(\omega t - \pi) \\ i_{sc1} = 1.27 \cdot I_{max} \sin(\omega t + 5\pi/6) \\ i_{sc2} = 1.27 \cdot I_{max} \sin(\omega t + \pi/3) \end{cases} \quad (III.26)$$

III.7 Simulation et interprétation des résultats de la MASDE en mode dégrade

III.7.1 Simulation pour une phase S_{a1} déconnectée

Nous simulons le fonctionnement de la MASDE avec une phase S_{a1} déconnectée, qui continue de marcher via les cinq phases saines restantes, leur matrice de transformation est :

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

Les différentes courbes trouvées lors de la simulation numérique sont dressées sur les figures ci-dessus :

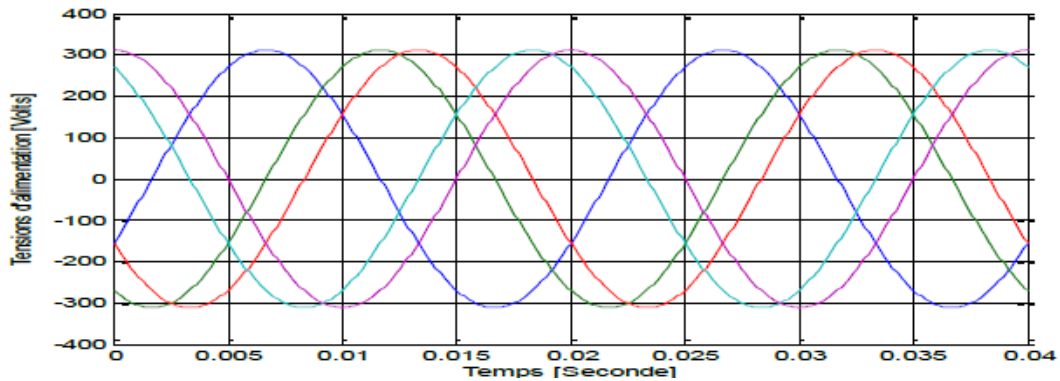


Figure III.6 : deux sources de tensions triphasées

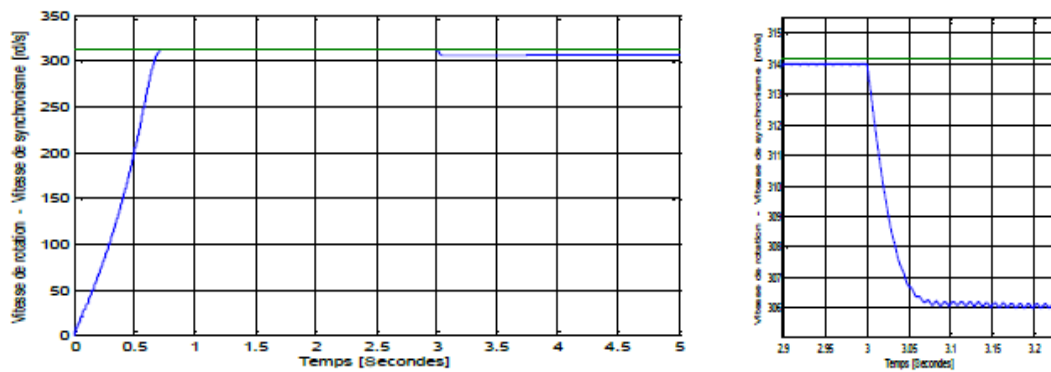


Figure III.7 : Vitesse de rotation et de synchronisme

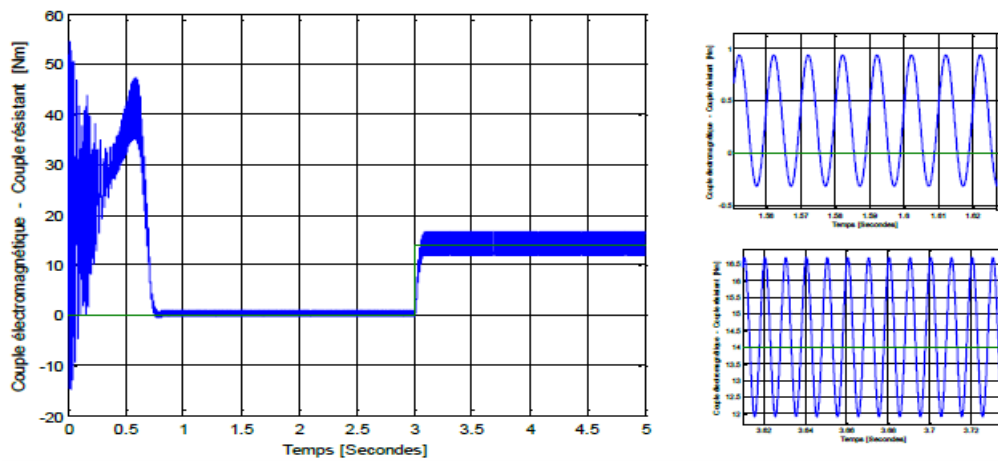


Figure III.8 : Couple électromagnétique et couple résistant

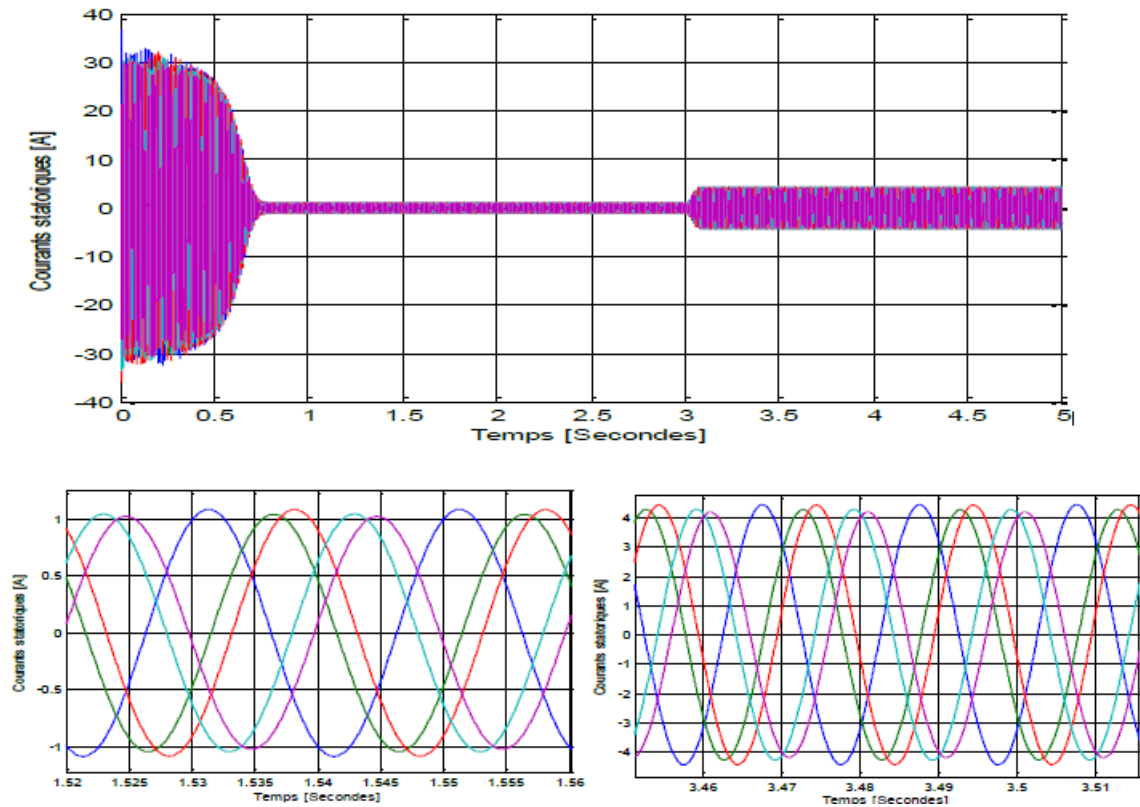


Figure III.9 : Courants statoriques (à vide et en charge)

D'après ces résultats, nous constatent que le fonctionnement de la machine asynchrone double étoile est possible, même avec une phase déconnectée. La vitesse de rotation garde une allure identique avec un temps de « 0.75 s » supérieure à celui du fonctionnement sain. En charge la vitesse tourne autour de « 306.06 rd/s », et sans perturbation, cela est dû à la présence du filtre dans la machine.

Pour le couple électromagnétique subi des perturbations qui diminue de façon notable, par rapport à l'analyse théorique. Les vibrations disparaissent après « 0.75 s », à vide on note des valeurs qui oscillé entre « -0.6 Nm » et « 1.2 Nm » signe de pertes fer à vide et aux pertes mécaniques par frottement. Quand nous connectons la charge a « t=3s », le couple électromagnétique passe à une autre valeur flottante perturbée et ondulée entre « 11.8 ~ 16.8 Nm » autour de la valeur du couple résistant en « 0.1 s », la fréquence de ces oscillations est deux fois celle des courants d'alimentation.

Le courant au démarrage prend des valeurs de l'ordre de cinq fois le courant nominal « 30A ». Les courants statoriques existent avec un certain déséquilibre d'amplitude.

III.7.2 Simulation d'un défaut de deux phases

III.7.2.1 Simulation pour deux phase « S_{a1} » et « S_{b1} » de la même étoile déconnectée

Nous simulons le fonctionnement de la MASDE avec deux phase « S_{a1} » et « S_{b1} » déconnectée, qui continue de marche via les quatre phases saines restante, leur matrice de transformation est :

$$[T_4] = \begin{bmatrix} +0.8165 & -0.4082 & -0.4082 & -0.0000 \\ +0.0000 & +0.5477 & -0.5477 & -0.6325 \\ +0.5527 & +0.4235 & +0.6819 & -0.2238 \\ +0.1668 & +0.5950 & -0.2613 & +0.7416 \end{bmatrix}$$

Les différentes courbes trouvées lors de la simulation numérique sont dressées sur la figure ci-dessus :

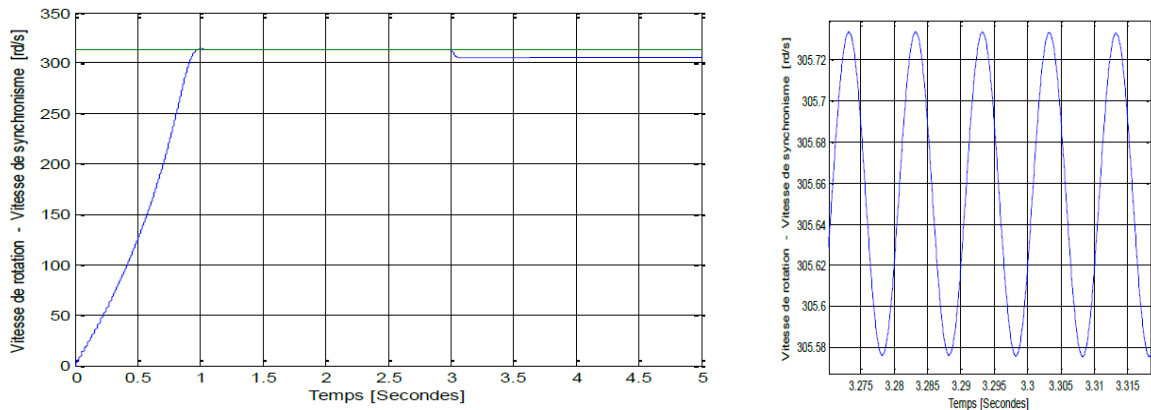


Figure III.10 : Vitesse de rotation et de synchronisme

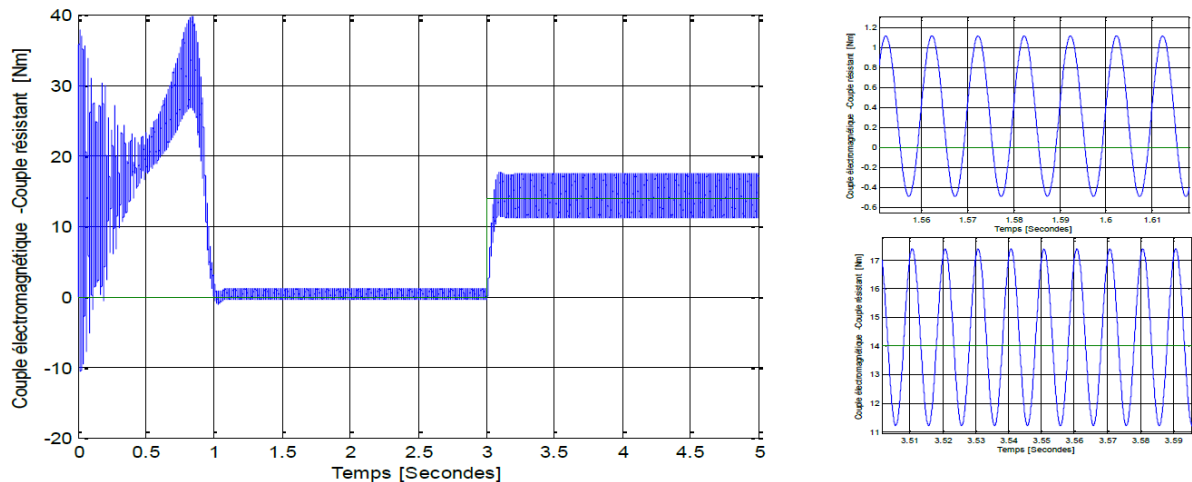


Figure III.11 : Couple électromagnétique et couple résistant

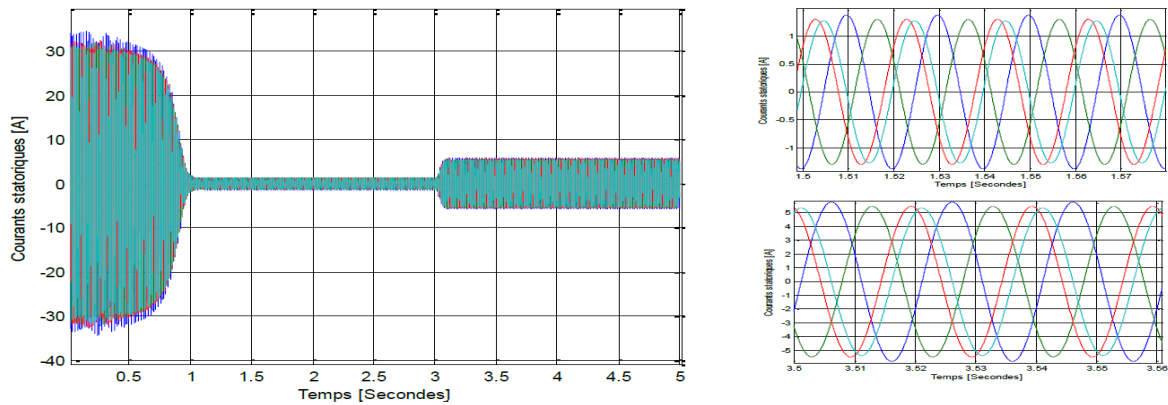


Figure III.12 : Courants statoriques (à vide et en charge)

D’après ces résultats, la vitesse de rotation garde une allure identique avec un temps de « 1s » de plus en plus long à celui du fonctionnement sain. En charge la vitesse tourne autour de « 305.06 rd/s », et sans perturbation, cela est dû à la présence du filtre dans la machine.

Le couple électromagnétique subi est fortement perturbé et sa forme d’onde atteint une valeur de pic a « 40 Nm ». Les vibrations disparaissent après « 1 s », a vidé on note des valeurs qui oscillé aux alentours de « 0.8 Nm », et quand nous connectons la charge le couple électromagnétique passe à une autre valeur flottante perturbée et ondulée au tour de « 14.7 Nm ».

Ce qui engendre des courants importants a « 35A » qui s’atténue après « 1s », des pertes a « 1.4A » absorbe par la machine a vide, en charge les courant augmentent avec des valeurs de l’ordre de « 5.8A ».

III.7.3 Simulation d’un défaut de de trois phases

Cette fois nous allons simule la perte d’une étoile (trois phases de la même étoile, $S_{a2}S_{b2}S_{c2}$) et la perte de trois phases de différentes étoiles ($S_{a1}S_{a2}S_{b1}$), pour compare directement leur résultat, il est plus intéressent pour note les différences. La matrice de transformation est donnée par :

❖ Pour $S_{a2}S_{b2}S_{c2}$:

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

❖ Pour $S_{a1}S_{a2}S_{b1}$:

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

Les différentes courbes trouvées lors de la simulation numérique sont dressées sur la figure ci-dessus :

Résultats de simulation du fonctionnement de la MASDE en mode dégradé avec perte d'une étoile.

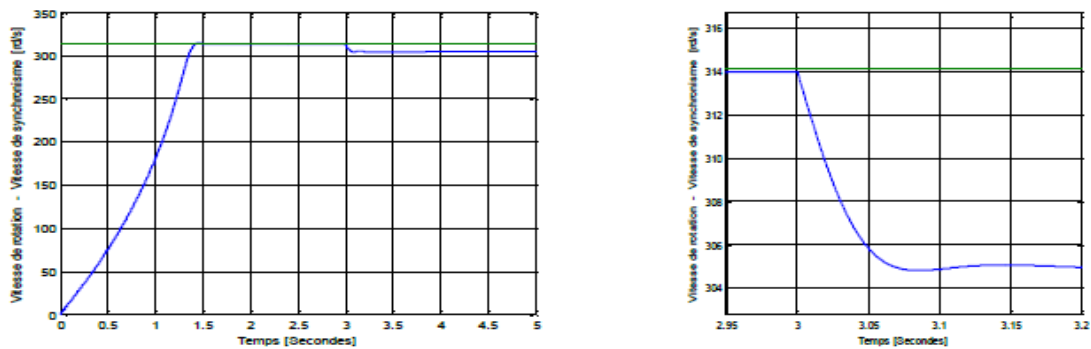


Figure III.13 : Vitesse de rotation et de synchronisme

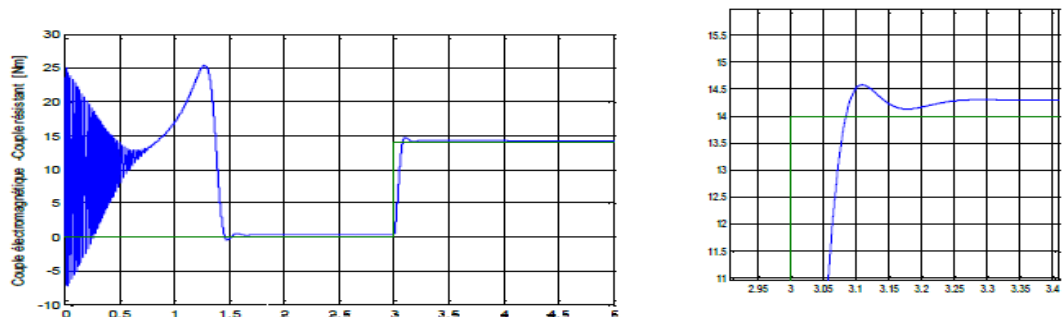


Figure III.14 : Couple électromagnétique et couple résistant

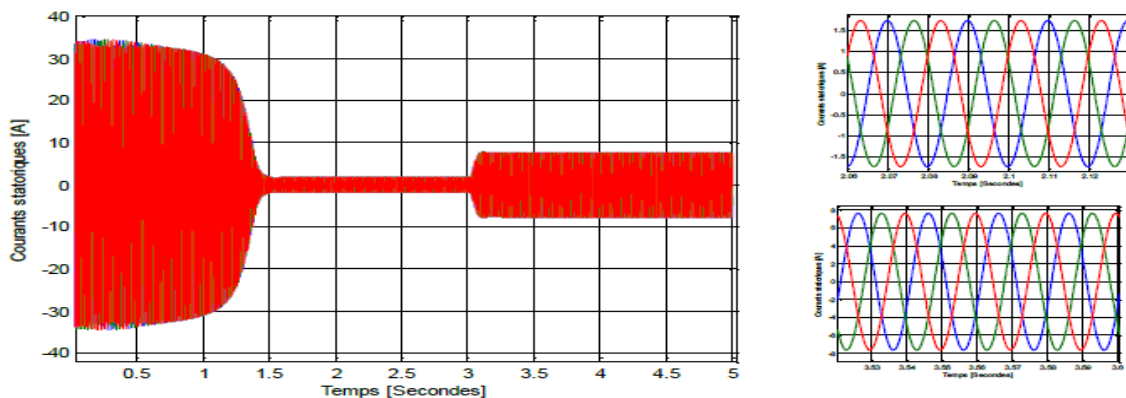


Figure III.15 : Courants statoriques (à vide et en charge)

Résultats de simulation du fonctionnement de la MASDE en mode dégradé avec trois phases de différentes étoiles déconnectées :

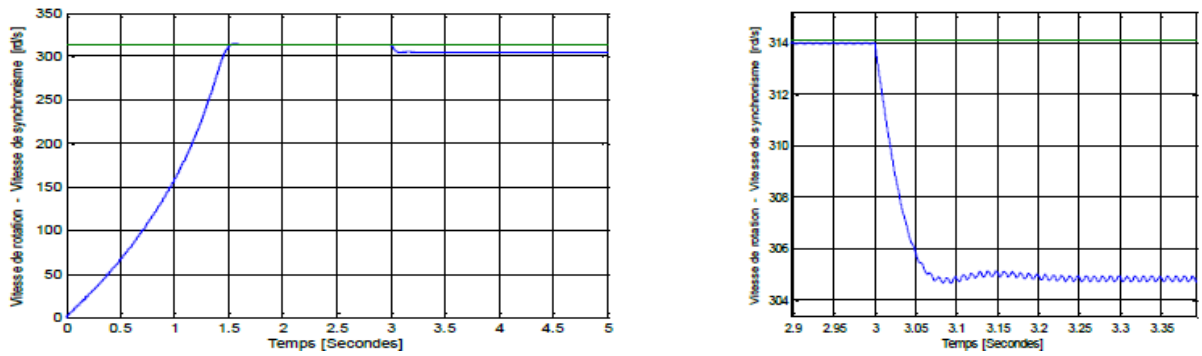


Figure III.16 : Vitesse de rotation et de synchronisme

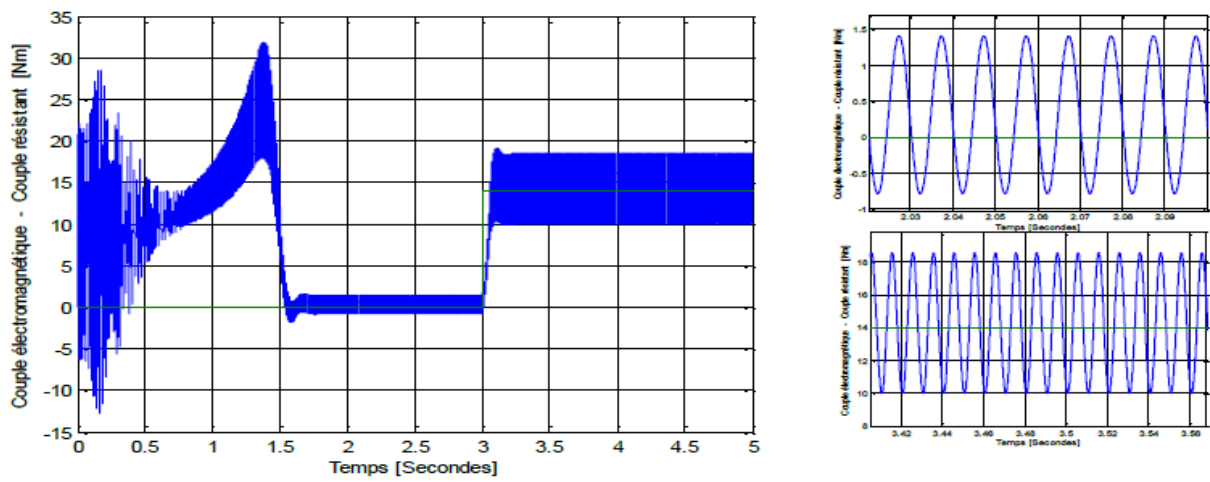


Figure III.17 : Couple électromagnétique et couple résistant

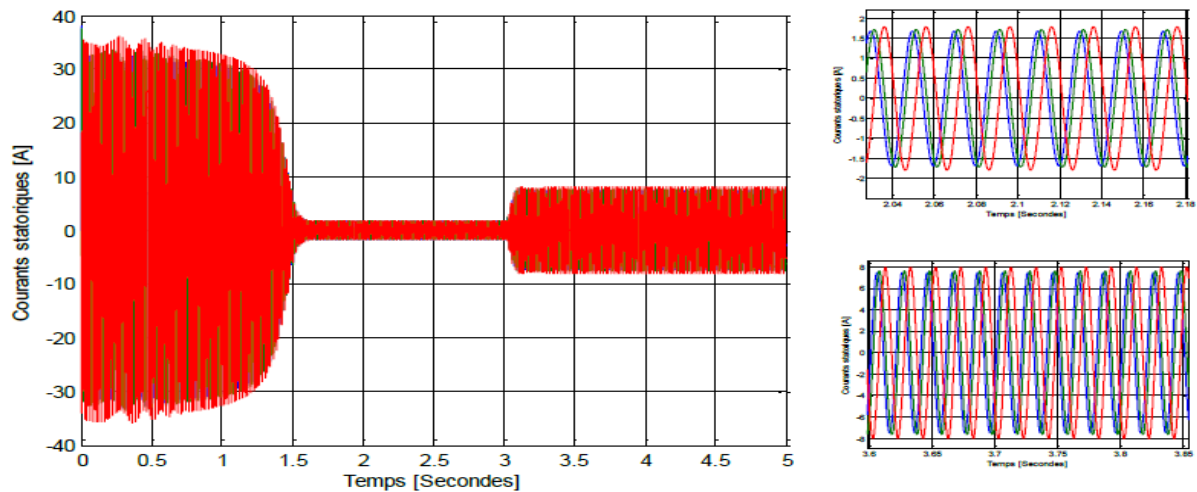


Figure III.18 : Courants statoriques (à vide et en charge)

Le temps de montée de la vitesse de rotation augmente pour les deux cas à une valeur similaire « $t \approx 1.5 \text{ s}$ », puis après la connexion de la charge, la machine ralentie pour ce stabilise à « 304.8 rd/s » peut importer les trois phases déconnectées.

Pour le couple électromagnétique, le comportement reste le même que celui observé lors des essais précédents avec une ou deux phases défaillantes, mais avec des valeur divise de moitié « 25.4 Nm » dans le cas de défaut d'une étoile ; dans le cas où les phases n'appartiennent pas à la même étoile, des oscillations du couple sont observées à vide et en charge.

Au démarrage le courant statorique atteint des pics à « 34A », avant de diminuer à une valeur de « 1.7A ». En charge, l'appel aux courants augmente jusqu'à « 7.65A ». Les valeurs sont similaires, pour les deux cas étudiés.

III.8 Analyse et résultats des différentes simulations

Tableau III.1 : résumé des résultats obtenus pour tous les cas étudiés

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

Dans ce tableau, nous avons regroupé toutes les valeurs des essais précédents, simplifiant l'analyse et de pouvoir comprendre le comportement de la MASDE en mode dégrade, pour chaque nombre de phase déconnectée.

La vitesse de rotation n'est pas vraiment affectée par l'augmentation du nombre de phases déconnectées, car en charge la différence de valeur entre une machine sans défauts et

de trois phases en défauts et de l'ordre de « 1.5 rd/s ». Mais la vitesse de synchronisme ce retrouve affecte, puisque le temps de montée augmente pour chaque phase perdue.

A contrario, le couple électromagnétique ce retrouve fortement impacte par le nombre de phases en défauts. À titre de comparaison, en marche sans défaut la machine attient « 49.35 Nm » et se stabilise en seulement « 0.65s », mais arrive à trois phases en défaut la machine affiche « 25.5 Nm », la moitié du couple initiale et attient la stabilité qu'après « 1.56s » avec valeur du aux perte à vide. Lorsque la machine fonctionne avec une étoile ou deux sans défaut, le couple ne subit aucune ondulation, contrairement au manque de phase d'alimentation, des ondulations apparaissent ce qui augmente avec le nombre de bras d'onduleur défectueux.

Lorsque la machine fonctionne sans défaut, le courant absorbé à vide est de « 0.9A » et augmente avec le nombre de phases défectueuses jusqu'à une valeur de « 1.79A » avec un fonctionnement en demi régime ; et en charge, l'appel aux courant est de « 3.55A » en fonctionnement sans défaut 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.9 Conclusion

Ce chapitre traite des différents défauts pouvant affecte la machine et présente l'une des méthodes de commande de la MASDE et son attitude lorsque l'une ou plusieurs de ses phases et perdue.

Ce qui nous a montré le principal avantage de l'utilisation de ce type de moteur dans l'industrie, est qu'il peut fonctionner en mode dégradé, c'est-à-dire en cas de perte d'une phase de puissance ou d'un court-circuit dans les bobinages du stator.

Cette stratégie du contrôle permet de garder à un certain pourcentage les performances de la machine que lors du fonctionnement en mode normal. Garantissent ainsi des ondulations de couple fiable 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.

IV Application au pompage photovoltaïque

IV.1 Introduction

On appelle pompe tout appareil qui aspire un fluide d'une région à basse pression pour le refouler vers une région à plus grande de pression. A partir de cette définition, on peut dire que le rôle de la pompe consiste à augmenter la pression du fluide liquide.

L'augmentation de la pression du liquide véhiculé par la pompe a lieu à la suite de la transformation de l'énergie mécanique fournie par un moteur entraînant cette pompe en une augmentation de l'énergie hydraulique qui est acquise par le liquide entre l'entrée et la sortie de la pompe.

La conception et la réalisation d'une station de pompage 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.

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. 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. [36,37]

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 ». [37]

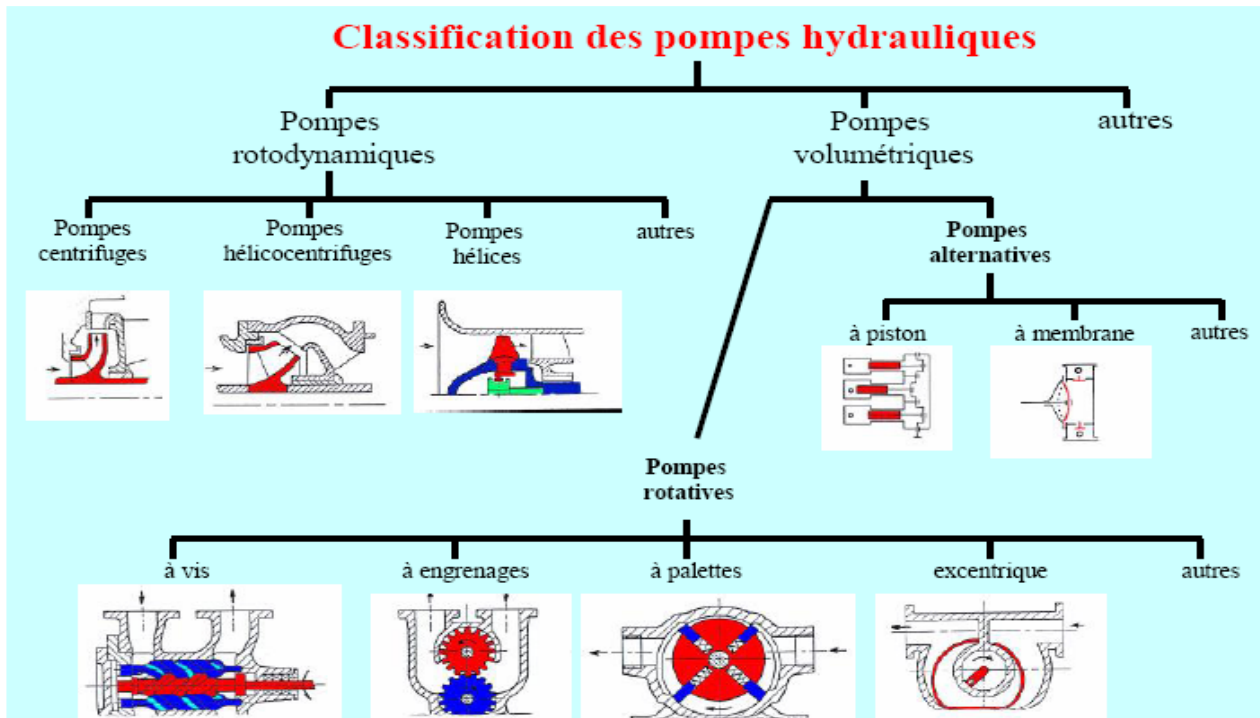


Figure IV.1 : Classification des pompes hydrauliques[37]

IV.3 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement se base sur une interaction de force entre les aubes de la roue et le courant d'eau qu'il contourne.

Pour :

- Une pompe centrifuge radial est défini par un refoulement perpendiculaire à l'axe de la pompe ce dernier est parallèle avec le sens de l'aspiration.
- Une pompe hélico-centrifuges avec une roue semi axiale, le refoulement se fait parallèlement à l'axe de la pompe et à l'aspiration.
- Une pompe à hélices comportant une roue axiale le refoulement se fait parallèlement a l'axe de la pompe et à l'aspiration. [36, 37]

Une pompe centrifuge est constituée par :

❖ Distributeur

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

❖ 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.

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

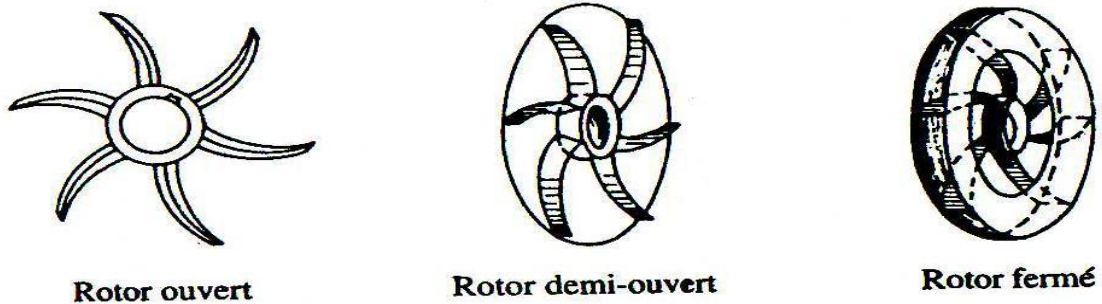


Figure IV.2 : Différent type de rotor

❖ 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 une 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. [38]

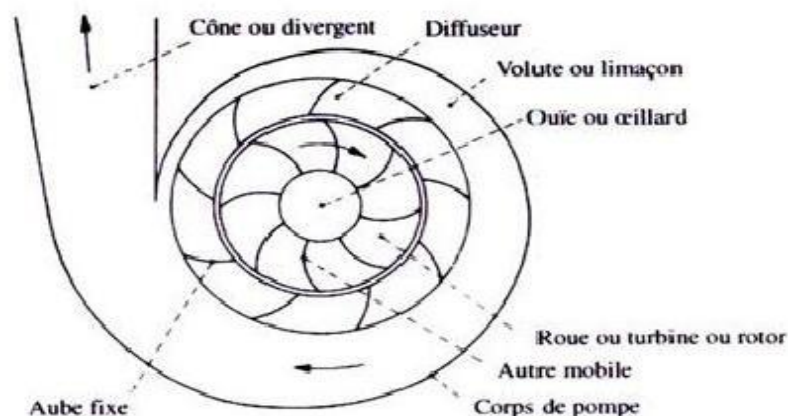


Figure IV.3 : Pompes centrifuge

Une roue à aubes tournant autour de son axe

Un distributeur dans l'axe de la roue

Un collecteur de section croissante, en forme de spirale appelée volute.

Le liquide arrive dans l'axe de l'appareil par le distributeur et la force centrifuge le projette vers l'extérieur de la turbine. Il acquiert une grande énergie cinétique qui se transforme en énergie de pression dans le collecteur où la section est croissante.

L'utilisation d'un diffuseur (roue à aubes fixe) à la périphérie de la roue mobile permet une diminution de la perte d'énergie. [38]

IV.4 Caractéristiques et lois de similitude

Les hauteurs manométriques totales fournies ne peuvent dépasser quelques dizaines de mètres. Pour dépasser ces valeurs on utilise des pompes centrifuges multicellulaires où plusieurs roues sont montées en série sur le même arbre. Le refoulement d'une des pompes communique avec l'aspiration de la pompe suivante. Il est également possible de coupler en série plusieurs de ces pompes.

Le rendement est de l'ordre de 60 à 70 % : il est inférieur à celui des pompes volumétriques. Les pompes centrifuges vérifient des lois () qui à partir d'une courbe caractéristique établie pour une vitesse de rotation N de la roue de la pompe permettent d'obtenir la caractéristique pour une vitesse de rotation N' quelconque.

Si on connaît pour une vitesse N , le débit Q_{vN} , la hauteur manométrique totale H_{tN} et la puissance absorbée P_N , on sait qu'il existe deux courbes caractéristiques (H_t en fonction de Q_v et P en fonction de Q_v) pour la vitesse N' tels que les points définis par les coordonnées $(Q_{vN'}, H_{tN'})$ et $(Q_{vN'}, P_{N'})$ en soient respectivement éléments. [37]

Les lois de similitude permettent de déterminer $Q_{vN'}$, $H_{tN'}$ et $P_{N'}$:

$$Q_{vN'} = Q_{vN} \times \left(\frac{N'}{N}\right) \quad (\text{IV.1})$$

$$H_{tN'} = H_{tN} \times \left(\frac{N'}{N}\right)^2 \quad (\text{IV.2})$$

$$P_{N'} = P_N \times \left(\frac{N'}{N}\right)^3 \quad (\text{IV.3})$$

On peut ainsi reconstruire point par point les caractéristiques pour la vitesse de rotation N' en prenant des points différents des caractéristiques établies pour la vitesse N .

IV.4.1 La variation de la vitesse de rotation

Dans ce cas, on fait varier la vitesse de rotation, variant ainsi la puissance absorbée, le débit et la hauteur d'élévation. La nouvelle vitesse de rotation N' , est déterminée à partir des lois de similitude ci-après :

$$\frac{H}{H'} = \left(\frac{N}{N'}\right)^2 \quad (\text{IV.4})$$

$$\frac{Q}{Q'} = \left(\frac{N}{N'}\right)^2 \quad (\text{IV.5})$$

Le point P (Q, H) est le point désiré et le point P' (Q', H') qui est l'intersection de la courbe iso rendement et la courbe caractéristique de la pompe, c'est le point homologue du point P. [37 , 39]

On aura :

$$N' = N \times \frac{Q}{Q'} \text{ (tr/min)} \quad (\text{IV.6})$$

Et la puissance absorbée sera donc :

$$P = \frac{g \times Q \times H}{\eta} \text{ (Kw)} \quad (\text{IV.7})$$

IV.5 Eléments de base pour le calcul et le choix des pompes

IV.5.1 La hauteur manométrique totale d'élévation HMT

La HMT d'une pompe est la différence de pression en mètre colonne de liquide (mCL) entre les orifices d'aspiration et de refoulement, (hauteur géométrique d'élévation totale) y compris la pression nécessaire pour vaincre les pertes de charge dans les conduites d'aspiration et de refoulement (J_{asp} , J_{ref}).

$$HMT = H_{geom.tot} + J_{asp} + J_{ref} \quad (\text{IV.8})$$

Si les niveaux à l'aspiration et au refoulement sont à des pressions différentes :

$$HMT = H_{geom.tot} + J_{asp} + J_{ref} + \frac{P_1 + P_2}{\gamma} \quad (\text{IV.9})$$

Avec : P_1 et P_2 en (Kg/cm²) et γ en (Kg/dm³)

IV.5.2 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 dû 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. [D01]

IV.5.3 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 té, 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. [37]

$$J_c = \frac{\lambda V^2}{2gD} \quad (\text{IV.10})$$

Avec

J_c : 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.

IV.5.4 Hauteur totale de pompage

$$H=H_s+H_d \quad (IV.11)$$

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.

H_d : somme des pertes linéaires et des pertes singulières.

IV.5.4.1 Pertes de charge linéaires

$$\Delta H_L = J \times L = \frac{\lambda L V^2}{2 g D} \quad (IV.12)$$

Avec :

- H_L : pertes de charges linéaires (m)

- J : pertes de charges unitaires (m/ml)

- D : diamètre de la conduite (m)

- V : vitesse moyenne d'écoulement (m/s)

- L : longueur de la conduite (m)

- λ : coefficient de frottement de DARCY, il caractérise l'écoulement ainsi que la nature et la rugosité de la conduite.

IV.5.4.2 Pertes de charge singulières (locales)

Les pertes singulières sont dues aux divers changements de section.

$$\Delta H_s = \varepsilon \frac{V^2}{2g} = \varepsilon \frac{8Q^2}{\pi^2 D^2 g} \quad (IV.13)$$

ε Coefficient de pertes de charges locales.

$$\Delta H = \Delta H_L + \Delta H_s \quad (IV.14)$$

Après calcul on a :

$$\Delta H = \frac{8 \lambda L Q^2}{g \pi^2 D^5} \quad (IV.15)$$

IV.6 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.

La puissance hydraulique fournie par la pompe :

$$P_h = \rho g Q HMT \quad (IV.16)$$

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

Hmt : hauteur manométrique totale.

La puissance du moteur nécessaire pour entraîner 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. [38]

IV.7 Le phénomène de cavitation

Le phénomène de cavitation apparaît dans l'écoulement d'un liquide lorsqu'en un point quelconque de celui-ci la pression absolue devient égale à la pression de vapeur saturante pour la température du liquide transporté. Il se produit en ce point une bulle, cavité remplie de vapeur du liquide. Ces cavités remplies de vapeur du liquide s'écrasent dans les zones où elles rencontrent des pressions absolues plus élevées produisant ainsi des bruits et des vibrations diverses.

Dans les pompes centrifuges monocellulaires les plus basses pressions s'observent sur la face arrière des aubes de la roue (extrados). Dans les pompes centrifuges multicellulaires c'est toujours au niveau de la première roue que se manifeste le phénomène de cavitation.

La production de cavités est dû 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). [39]

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. [37, 39]



Figure IV.4 : Dégât de cavitation sur une pompe

IV.7.1 Notion du NPSH

Afin d'éviter le phénomène de cavitation, la charge minimale disponible à l'aspiration (NPSH)_d fixé par l'utilisateur doit être supérieure à la charge minimale requise à l'aspiration (NPSH)_r donnée par le constructeur sous forme de courbe «(NPSH)_r = f(Q) »

Soit donc la condition de non cavitation :

$$(NPSH)_d > (NPSH)_r$$

❖ Pour une alimentation en charge :

$$(NPSH)_d = \frac{P_0}{\rho \times g} + H_a - (J_a - T_v) \quad (IV.17)$$

❖ Pour une alimentation en dépression :

$$(NPSH)_r = \frac{P_0}{\rho \times g} - H_a - (J_a - T_v) \quad (IV.18)$$

Où :

$$\frac{P_0}{\rho \times g} = P_{atm} - 0.0012 \times Z \quad (IV.19)$$

Avec :

- **H_a** : hauteur géométrique d'aspiration (m) ;
- **J_a** : pertes de charge à l'aspiration (m) ;
- $\frac{P_0}{\rho \times g}$: pression en (m.c.e) du plan d'eau d'aspiration ;
- **T_v** : pression de vapeur maximale que l'air peut supporter à une température donnée;
- **Z** : cote du plan d'aspiration par rapport au niveau de la mer.

Remarque : il est utile de connaître le maximum de pertes de charge singulières sur les conduites d'aspiration et de refoulement.

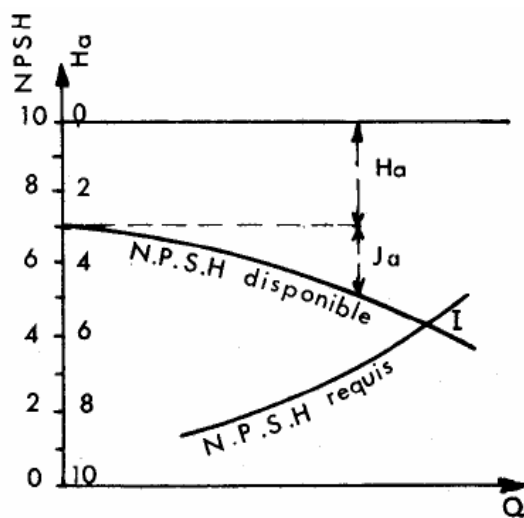
Les possibilités d'aspiration sont définies par le NPSH (Net Positive Suction Head)

NPSH disponible : est la valeur de la pression absolue mesurée sur l'axe de la bride d'aspiration de la pompe.

NPSH requis : chaque constructeur possède pour chaque type de pompe et pour une vitesse de rotation déterminée, une courbe donnant la valeur du NPSH requis en fonction du débit de la pompe considérée.

NPSH disponible > NPSH requis de quelques décimètres

Le calcul du NPSH disponible, c'est-à-dire de la pression absolue à l'entrée de la pompe se fera en utilisant la formule de Bernoulli appliquée entre la surface du plan d'eau à pomper (z_0, p_0) et l'entrée de la pompe (z_1, p_1).



$$z_0 + \frac{p_0}{\gamma} = \left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma} \right) + \underbrace{\frac{v_1^2}{2g}}_{\text{négligeable}} + J_a$$

Figure IV.5 : Courbe NPSH [39]

$$\text{NPSH disponible} = 10 - (H_a + j_a)$$

H_a = hauteur géométrique d'aspiration

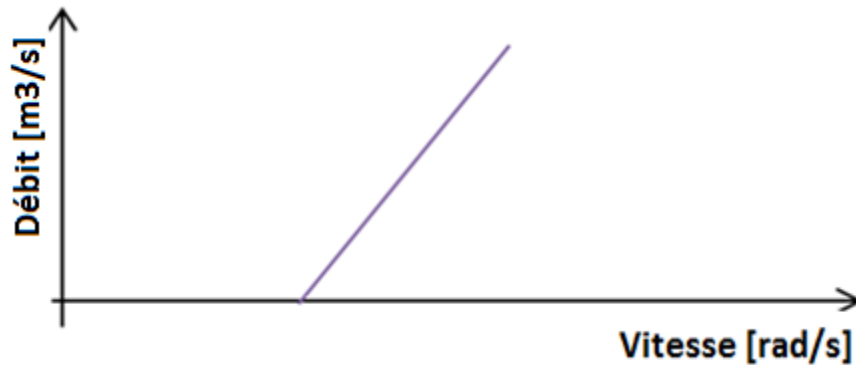
Pour les pompes centrifuges H_a doit être < 7 m

Le point de fonctionnement de la pompe devra être maintenu à gauche de la verticale passant par I (intersection) de façon que le **NPSH disp.** > **NPSH requis**. Au-delà, de petites bulles d'air se forment à l'intérieur de la pompe en quantité toujours plus croissante entraînant une baisse très rapide du rendement et du débit pompé. L'implosion et les chocs de ces petites bulles entre elles provoqueront une importante érosion de la roue et des organes voisins de la pompe. On parle alors du phénomène de cavitation. [39]

IV.8 Caractéristique de la pompe centrifuge

IV.8.1 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.

Figure IV.6 : Caractéristiques « débits – vitesses » d'une pompe centrifuge. [40]

IV.8.2 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.

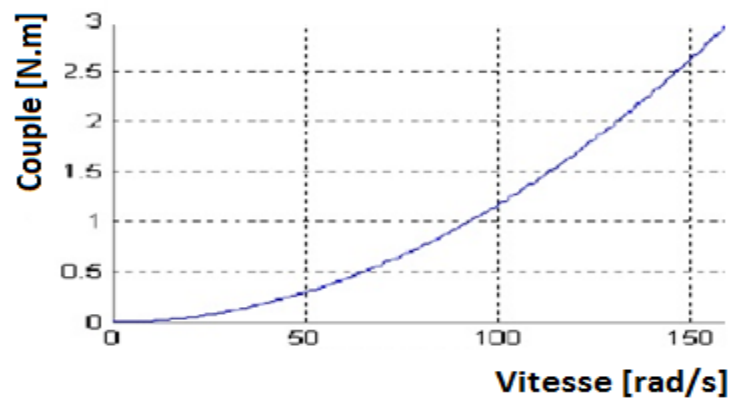


Figure IV.7 : Caractéristiques « Couple – Vitesse » d'une pompe centrifuge. [40]

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. [40]

IV.8.3 Caractéristique « Débit-Hauteur »

Les constructeurs fournissent les courbes $Q(H_{mt})$ maximale et minimale correspondant aux diamètres maximaux et minimaux possibles de la roue. [40]

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 H_{mt} [mètre] en fonction du débit Q [m³/s].

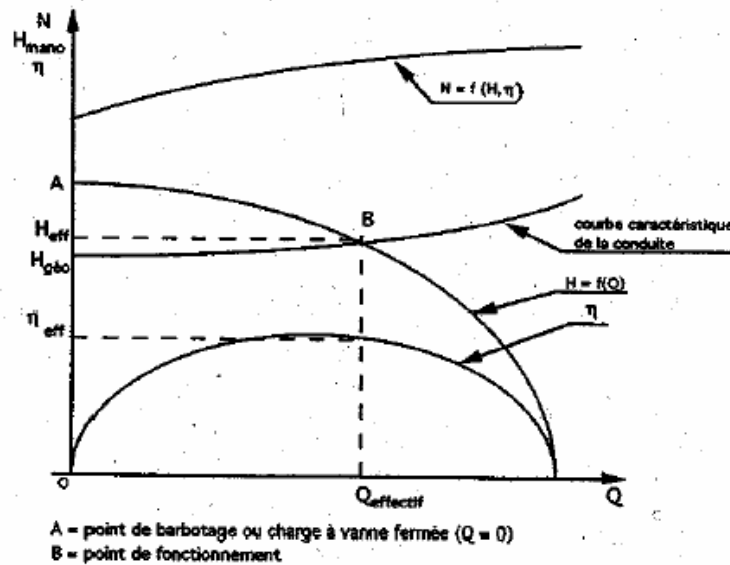


Figure IV.8 : Caractéristiques « Hmt – Débit ». [40]

La courbe $H_{mt}(Q)$ 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.

IV.8.4 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 :

$$\eta_H = \frac{P_h}{P_{ab}} \quad (\text{IV.20})$$

Avec : $P_h = \rho g Q H_{MT}$

Tel que ρ : masse volumique,

g : pesanteur, Q : débit,

H_{mt} : hauteur manométrique totale

P_{ab} : puissance absorbée par le moteur.

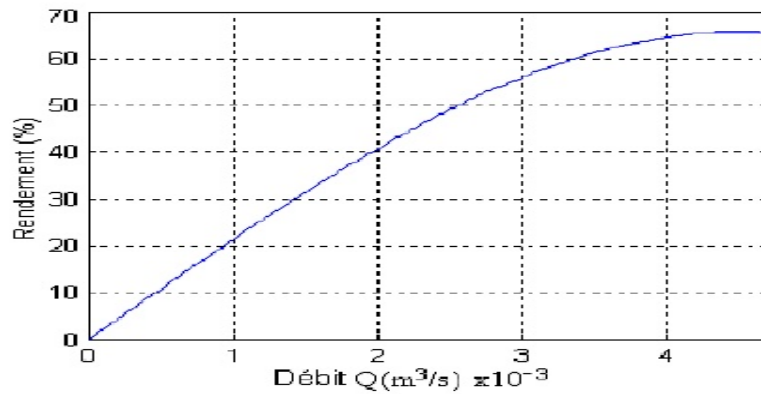


Figure IV.9 : Caractéristiques du rendement

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

IV.9 Application de la MASDE au Pompage

IV.9.1 Modélisation de la pompe centrifuge

Des équations données précédentes la pompe centrifuge est modélisée, pour pouvoir ainsi suivre l'évolution des différents paramètres caractérisant la pompe.

IV.9.1.1 Bloc de simulation de la pompe centrifuge

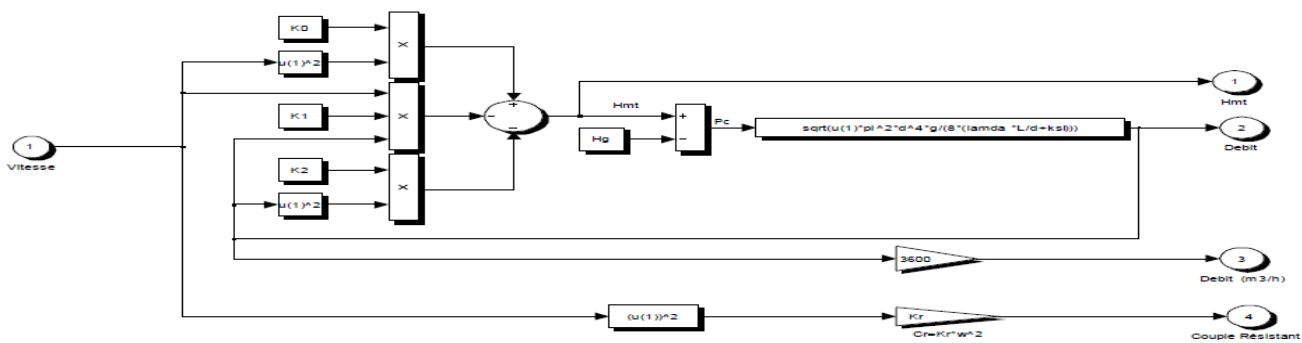


Figure IV.10 : Bloc de Simulation de la Pompe Centrifuge (1)

IV.9.1.2 Lois de similitude

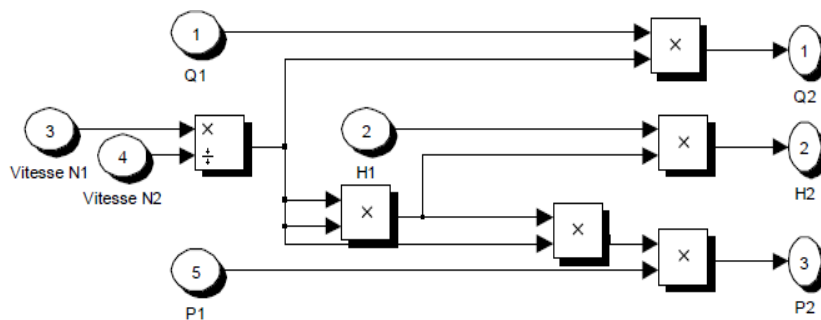


Figure IV.11 : Bloc de Simulation de la Pompe Centrifuge (2)

IV.9.2 Bloc de simulation globale de la MASDE- Pompe centrifuge

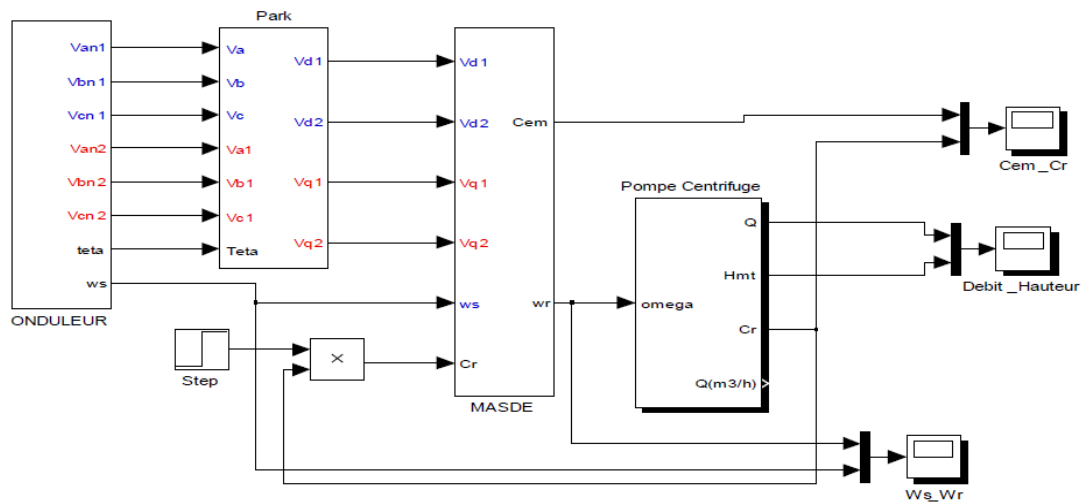


Figure IV.12 : Bloc de simulation globale de la MASDE couplée à la Pompe Centrifuge

IV.9.3 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 indiquée (b), où, la pompe est connectée après le démarrage du moteur avec une sorte d’embrayage à $t=1.8s$.

IV.9.3.1 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 ».

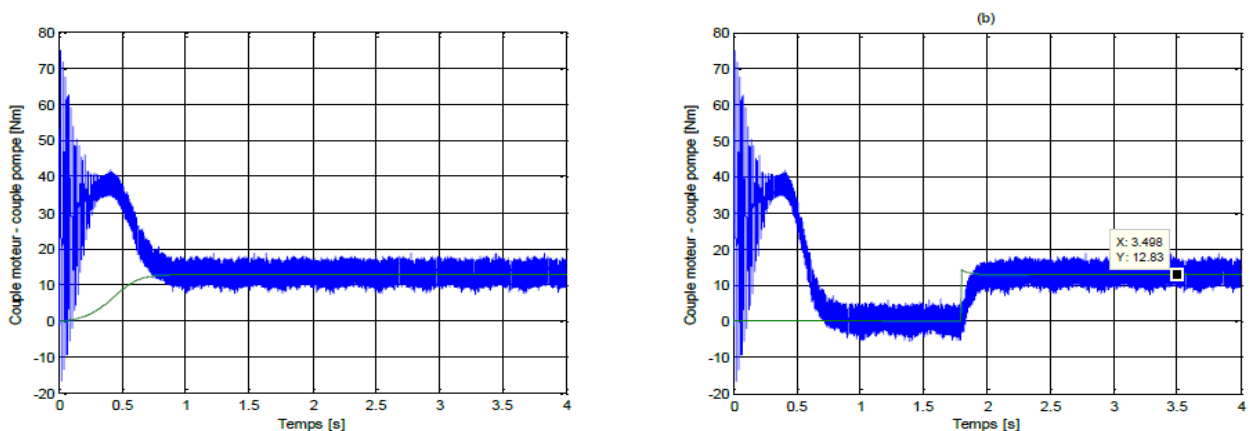


Figure IV.13: Couple moteur –couple pompe

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.9.3.2 Vitesse de synchronisme – vitesse de rotation

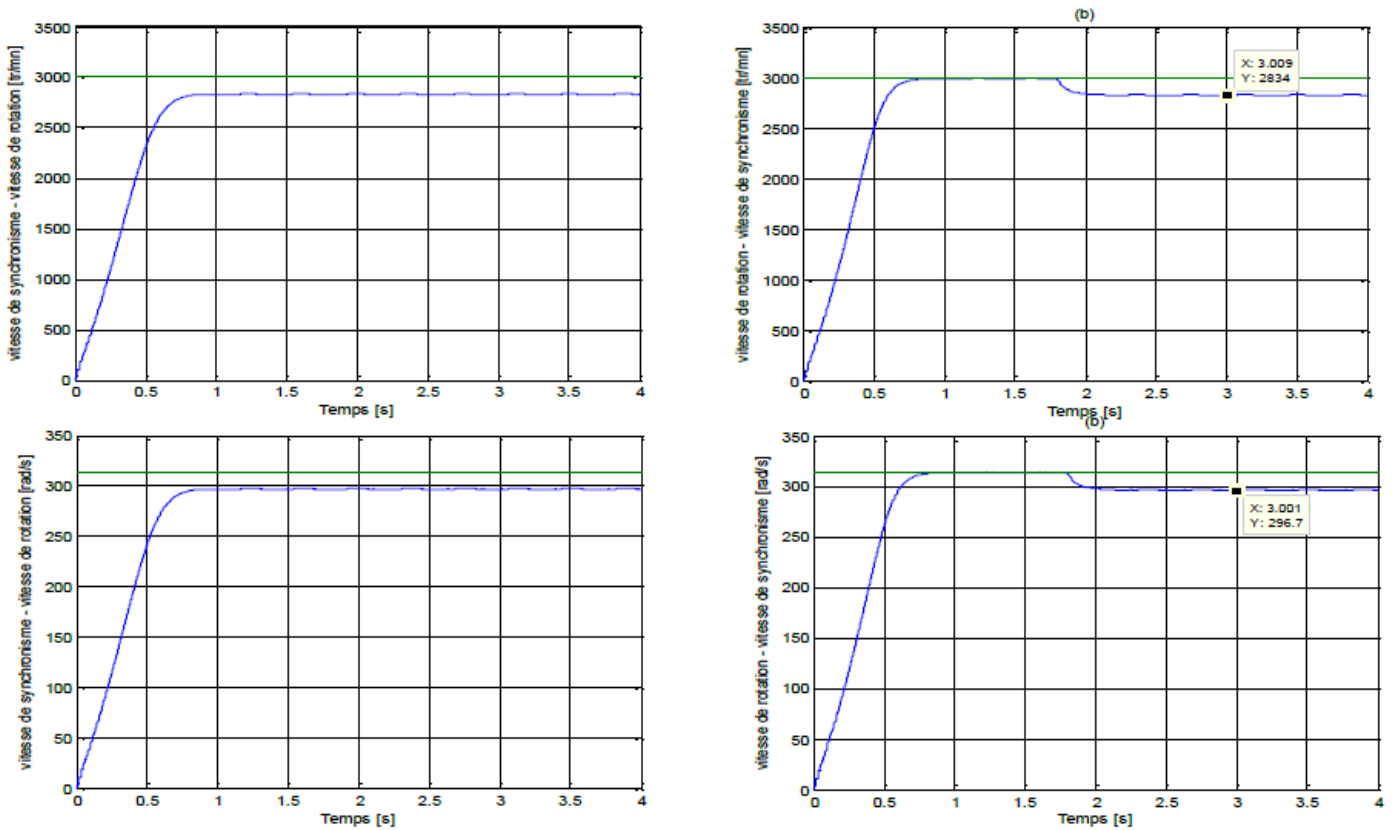


Figure IV.14 : Vitesse de synchronisme et de rotation

IV.9.3.3 Caractéristique « Couple – Vitesse de rotation »

Le couple augmente très rapidement en fonction de la vitesse de rotation du moteur.

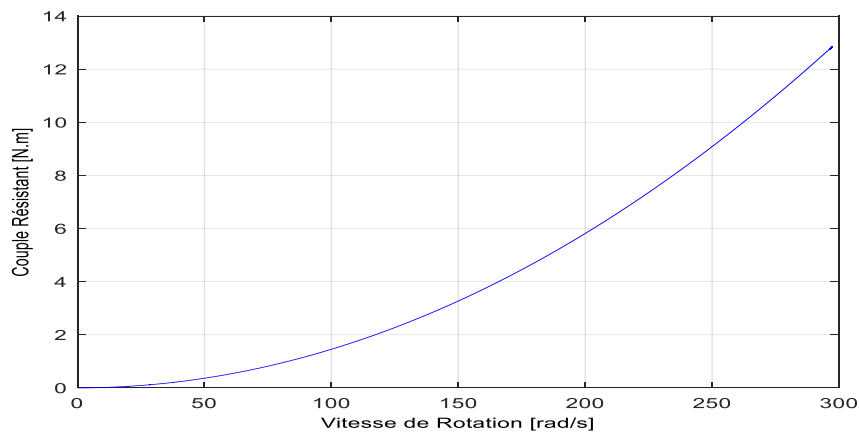
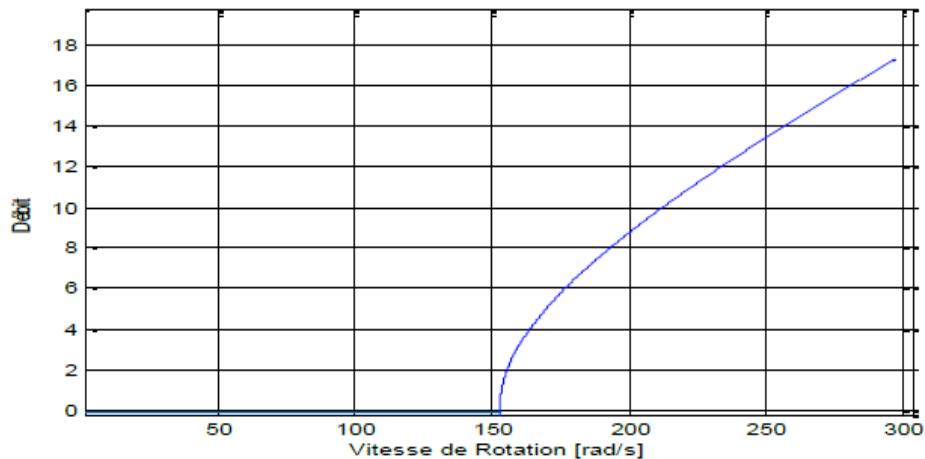


Figure IV.15 : Caractéristique « Couple-Vitesse de rotation »

IV.9.3.4 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.

Figure IV.16 : Caractéristique « Débit-Vitesse de rotation »

Le moteur atteint la vitesse de 150 rad/s en 0,3 seconde, un temps suffisant pour remplir la tuyauterie de refoulement.

IV.9.3.5 Evolution du Débit

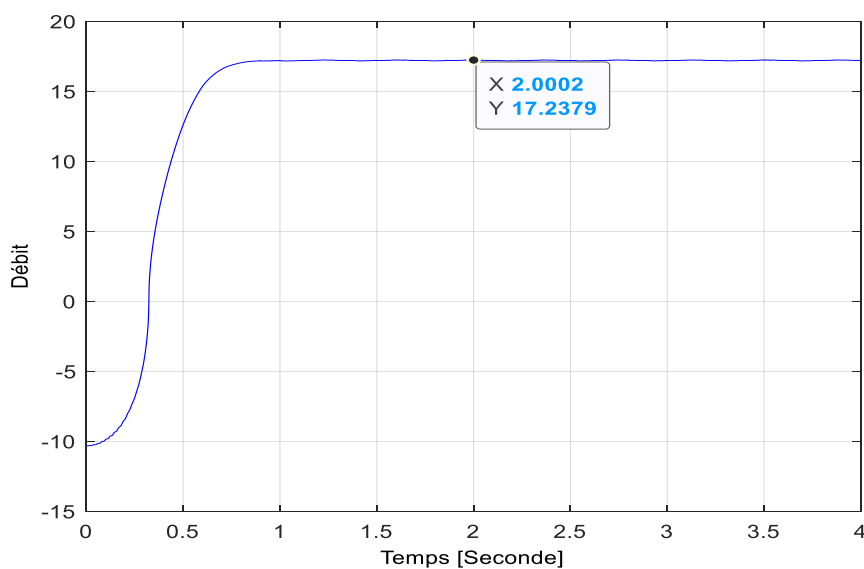


Figure IV.17 : Evolution du débit

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.9.3.6 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.

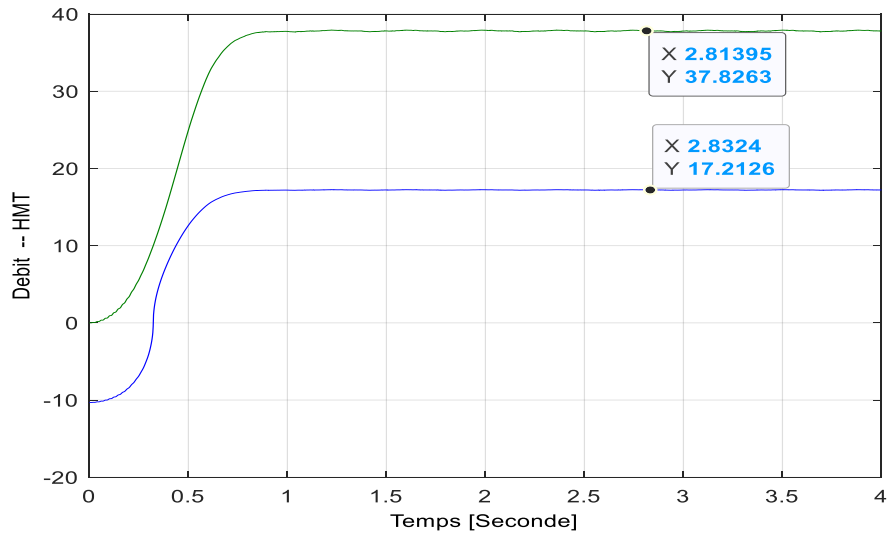


Figure IV.18 : Caractéristique « Débit – Hauteur manométrique totale »

IV.9.3.7 Caractéristique « Hauteur manométrique totale – Vitesse de rotation »

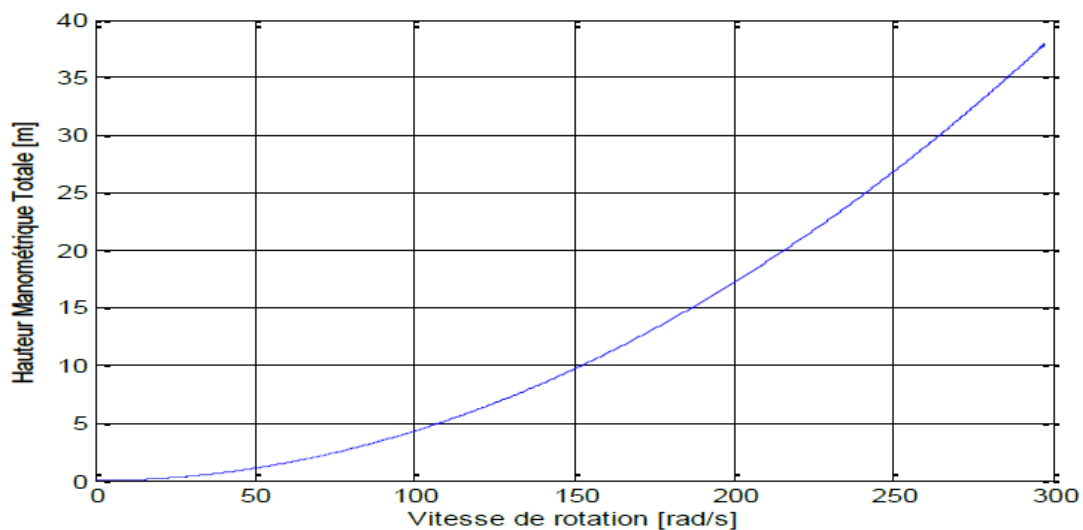


Figure IV.19 : Caractéristique « Hauteur manométrique totale – Vitesse de rotation »

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.10 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 [m³/h] et la hauteur manométrique totale H [mce], peuvent caractériser le système de pompage.

IV.10.1 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 :

$$P = \frac{Q HMT}{367 \eta} \quad (\text{IV.21})$$

Avec P en Watt et un correcteur d'unité d'une valeur de « 367 ».

IV.10.2 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.

Diamètre : $d = 25 \cdot Q$, Vitesse : $V = 350 \cdot Q/d^2$ V [m/s], d [mm] et Q [m³/h].

IV.10.3 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.

$$NPSHa - NPSHr \geq 0.6 \text{ m}$$

IV.11 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 :

IV.11.1 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.11.2 Inconvénients

- Limitation de la viscosité
- Débit légèrement instable dans les basses valeurs

IV.12 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.

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

10. Conclusion

Ce chapitre est consacré à l'application du "fluide pompé", en particulier la large gamme d'applications et le large champ d'application.

En dehors de la classification classique de ces machines et des différents types de pompes, les pompes centrifuges sont les plus utilisées, ce qui est très intéressant pour étudier leur comportement en analysant diverses propriétés.

Grâce au logiciel "MATLAB Simulink", le comportement de la pompe peut être surveillé sans utiliser l'équipement du laboratoire.

La pompe peut conserver un excellent rendement, fournir des débits et des hauteurs différents, à condition que sa vitesse de rotation soit modifiée et que la loi de similarité permette de déduire les nouvelles performances de la pompe ou d'une autre pompe.

En pratique, les ingénieurs hydrauliques utilisent des concepts plus simples pour dimensionner les systèmes de pompage.

Conclusion générale

Notre travail est porté sur l'étude d'une MASDE dédiée au pompage photovoltaïque en mode normal et dégradé.

Pour atteindre notre objectif, nous avons commencé par prendre connaissance de la machine asynchrone a doublé étoile (MASDE), c'est différents éléments, caractéristiques et fonctionnement, elle est la machine la plus courante, sans doute parce qu'elle constitue un bon compromis entre une segmentation de puissance suffisante et un ensemble convertisseur-machine pas trop compliqué. Puis nous avons élaboré un modèle mathématique de la machine asynchrone double étoile en vue de son alimentation par un convertisseur statique.

Dans le deuxième chapitre, l'idée de changer l'alimentation conventionnelle par une alimentation photovoltaïque a germé. 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.

Au troisième chapitre nous avons développé une technique de commande en mode dégradé de la MASDE. De très nombreuses méthodes ont été proposées. Tout d'abord la machine a été spécialement conçue afin de prendre en compte certaines propriétés pour fonctionner en mode dégradé puis les références de courant ont été modifiées dès l'apparition d'un défaut en utilisant la méthode (1) ou (2). Cette stratégie de contrôle permet d'assurer un fonctionnement le plus satisfaisant possible en diminuant drastiquement les ondulations de couple. Les résultats de simulation du comportement dynamique obtenus permettent de valider la structure tout en assurant un fonctionnement possible lors de la déconnection d'une ou plusieurs phases.

Pour finir le dernier chapitre est dédié aux pompes qui assurent le déplacement d'un fluide tout ce qui concerne fonctionnement, type, caractéristiques. Les pompe centrifuges sont les plus utilisées, ce qui nous amène à les étudier leur comportement en analysant diverses propriétés.

Annexe

A1. Equation et Transformations utiles pour l'étude es 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

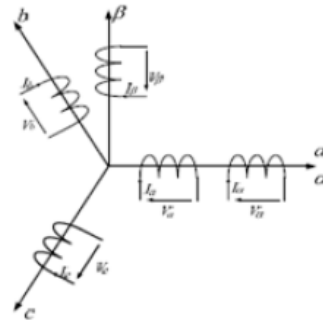


Figure (A1.1)
Représentation schématique d'une transformation triphasée - biphasée

L'axe « α » étant confondu avec l'axe « a »

Il existe deux types de transformation vers le repère « α - β » :

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 :

$$X_{\alpha,\beta,0} = \begin{bmatrix} X_{\alpha} \\ X_{\beta} \\ X_0 \end{bmatrix} = T_{32} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = T_{32} \cdot X_{a,b,c} \quad \dots \dots (A1.1)$$

$$\text{Avec } T_{32} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad \dots \dots (A1.2)$$

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 »

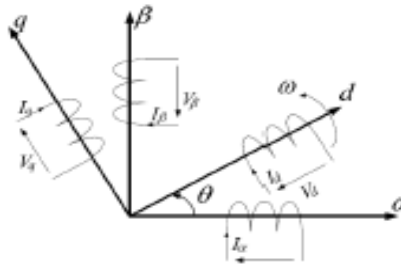


Figure (A1.2)
Représentation schématique d'une transformation de

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 ».

A2. Paramètre des équipements étudié

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	$L_m = 0,3672 \text{ H}$

La MASDE

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 m/(rad/sec) ²
Constante k_1	1.5826.10-5 m/(rad/sec)(m ² /sec)
Constante k_2	-18144 m/(m ³ /sec) ²

La pompe centrifuger

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	$g = 9,81 \text{ m}^2/\text{s}$

La canalisation

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'incrémentatation du courant I_{CC} . « α_T »	1,4 mA/ $^\circ\text{C}$
Coefficient d'incrémentatation de la tension V_{CO} . « β_T »	-152 mV/ $^\circ\text{C}$

BIBLIOGRAPHIE

- [01]: J. Bonal, G.Séguier. « Entraînements électriques à vitesse variable ». Volume 2, Lavoisier,1998.
- [02]: 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.
- [03]: J. Faiz, Mohammad Bagher, B. Charifian, A. Keyhani, and A. Bogda Poca « Sensorless Direct Torque Control of Induction Motors Used in Electric Vehicle».IEEE , transactions on energy conversion. Vol. 18, n°.1, March.2003.
- [04]: Klingshirn, E. A., "High Phase Order Induction Motors-Part I - Description and Theoretical Considerations", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-102, no. 1, pp.47-53, Jan. 1983.
- [05]: Toliyat, H. A.; Lipo, T. A.; Coleman W., "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.
- [06]: H.Yantour, J.Saadi, A.Khoumsi. « Modélisation et simulation d'une commande directe du couple appliquée à la machine asynchrone (DTC) ». 6eme conférence Francophone de Modélisation et Simulation-MOSIM'06- Rabat-Maroc.
- [07]: 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.
- [08]: H.Yantour, J.Saadi, A.Khoumsi. « Modélisation et simulation d'une commande directe du couple appliquée à la machine asynchrone (DTC) ». 6eme conférence Francophone de Modélisation et Simulation-MOSIM'06- Rabat-Maroc.
- [09]: HAH JU CHA et PRASAD N. ENJET, ‘‘ Matrix converter FED ASDS’’ department of electrical engineering college station, TX, USA, this article first appeared in this forms at the 200 IEEE IAS ANNUEL Meeting, 2003.
- [10]: E.M. Berkouk, « Contribution à la conduite des machines asynchrones monophasées et triphasées alimentées par des convertisseurs directs et indirects. Application aux gradateurs et onduleurs multiniveaux » Thèse de doctorat, CNAM paris 1995.
- [11]: A. Aneur : ‘‘Commende sans capteur de vitesse par DTC d'une machinesynchrone a aimants permanentes dotée d'un observateur d'ordre complet à modeglissants ’’ mémoire de magister en électrotechnique, université de BATNA le25/10/2005.

- [12]: 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.
- [13]: E.Merabet, R.Abdessemmed, 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.
- [14]: B.Fornel. « Machines asynchrones ; commande par contrôle direct de couple». Technique de l'ingénieur D3623, 2003.
- [15]: D.Hadiouche « Contribution à l'Etude de la Machine Asynchrone Double Etoile : Modélisation, Alimentation et Structure ». Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1.200.
- [16]: 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.
- [17]: M.Azib, « Etude et Commande d'une MASDE Alimentée par Convertisseurs Matriciels », thèse de magistère en génie électrique, université A.Mira – Bejaia, 2009
- [18]: Alain Cheron – Le rayonnement solaire dans l'environnement terrestre, 2014.
- [19]: W.BENSACI : Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT. 2012.
- [20]: F.HANANOU et A.Rouabah : Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque. juin 2014.
- [22]: D.BETAOUAF et O.H.Mohamed Kaber: COMMANDE robuste d'un système photovoltaïque à usage domestique. Juin 2013.
- [23]: 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.
- [24]:Y.Pankow, « Etude de l'intégration décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque », Thèse de Doctorat, France, Lille, décembre 2004.
- [25]: A.Morsli: Etude d'un système solaire photovoltaïque, utilisant des super condensateurs. Edition universitaire européennes, 2012.
- [26]: E.Kechar, E.Azzagetl.Touaïbia: Influence des rayonnements solaires sur le rendement des panneaux photovoltaïques. Thèse de doctorat, Université Abou bekr Belkaid – Tlemcen, 2015.
- [27]: 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.

- [28]: Nelson, R. H.; Krause, P. C., "Induction Machine Analysis for Arbitrary Displacement Between Multiple Winding Sets", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-93, pp. 841-848, May/June 1974.
- [29]: S.Williamson, S.Smith, C.Hodge, «Fault tolerance in multiphase propulsion motors», journal of marine engineering and technology, n°4, A4, 2004.
- [30]: 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, issu 5,2002.
- [31]: J.P.Martin, F.Meibody-Tabar, B.Davat, «multiple phase permanent magnet synchronous machine supplied by VSIS, working under fault conditions», CDROM, IAS2000.
- [32]: S. Alloune, « Commande des machines polyphasées », thèse de magistère en génie électrique, université de Bejaia, Octobre 2005.
- [33]: Huangsheng Xu, Member, IEEE, Hamid A. Toliyat, Senior Member, IEEE, and Lynn J. Peteren, Member, IEEE, " Five-phase induction motor drives with DSP- Based control system," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 17, No.4, July 2002, pp. 524-533.
- [34]: 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 Electric Drives 2002, August 18-21, Electric Drives II.
- [35]: R.Kianinezhad, B.Nahid-Mobarakeh, member IEEE, L.Baghli, F.Betin, member IEEE and G.A.Capolino, «Modeling and control of six-phase symmetrical Induction Machine Under», Fellow IEEE, 2008.
- [36]: G.Lemasson, « les machines transformatrices d'énergie », tome2, Delagrave, 1982.**(generalit)**
- [37]: J.M.Hirtz, « Les stations de pompage d'eau », 6e édition, Association Scientifique et Technique pour l'eau et l'environnement, éditions Lavoisier TEC & DOC 1991.**(rue,turbine)**
- [38]: 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. **(rue,turbine)**
- [39]: A.Dominique, « Cours de mécanique des fluides et agitation », université Henri Poincaré,2004. **(lois de similitudes)**
- [40]: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. **(domaine d'utilisation)**

الملخص

المحرك غير المتزامن ثلاثي الأطوار عبارة عن نظام محرك يتم تغذيته بالعاكس من الفولتية التي تمثل مزايا ولكنها تقتصر على طاقة معينة. بالنسبة للتطبيقات عالية الطاقة، يعتبر استخدام الآلات ذات أكثر من ثلاث مراحل هو الحل النهائي.

في البداية درسنا MASDE المدعوم بشبكة كهربائية، ثم بواسطة محولات الجهد. تتمثل ميزة هذا النوع من المشغلات في إمكانية تثبيت وضع تشغيل متدهور في حالة فشل مرحلة أو أكثر من مراحل تزويد المحرك.

لقد نشأت فكرة تغيير مصدر الطاقة التقليدي باستخدام مصدر طاقة كهروضوئية، وبعد الضخ الكهروضوئي أحد أكثر التطبيقات انتشاراً في العالم والذي يتمثل في تشغيل مضخة بمحرك بمصدر توليد الطاقة الكهروضوئية.

أخيراً، نحن مهتمون فقط بمضخات الطرد المركزي الأكثر استخداماً، مما أدى بنا إلى دراسة خصائصها.

Abstrait

The three-phase asynchronous motor is an inverter-fed drive system of voltages representing advantages but limited to a certain power. For high power applications the use of machines with more than three phases is considered the ultimate solution.

At first, we studied the MASDE powered by an electrical network, then by voltage inverters. The advantage of this type of actuator is the possibility of installing a degraded operating mode in the event of failure of one or more motor supply phases.

The idea of changing the conventional power supply with a photovoltaic power supply has germinated, photovoltaic pumping is one of the most widespread applications in the world which consists in operating a motor pump with a photovoltaic generation source.

finally, we are only interested in the centrifugal pumps which are the most used, which led us to a study of their characteristics.

Résumé

Le moteur asynchrone triphasé est un système d'entraînement alimenté par onduleur de tensions représentant des avantages mais se limitant à une certaine puissance. Pour des applications de forte puissance une utilisation de machine ayant plus de trois phases est considérée comme la solution ultime.

Dans un premier temps nous avons fait l'étude de la MASDE alimenté par un réseau électrique, ensuite par des onduleurs de tension. Le plus de ce genre d'actionneur est la possibilité d'installer un mode de fonctionnement dégradé dans le cas de défaillance d'une ou plusieurs phases d'alimentation du moteur.

L'idée de changer l'alimentation conventionnelle par une alimentation photovoltaïque a germé, le pompage photovoltaïque est l'une des applications les plus répandus dans le monde qui consiste à faire fonctionner une motopompe avec une source de de génération photovoltaïque.

Enfin nous ne sommes intéressés aux pompes centrifuges qui sont les plus utilisées, ce qui nous a amenés à une étude de leurs caractéristiques.

