

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane Mira de Bejaia



Faculté De Technologie
Département De Génie Electrique



Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme Master

Options : - Commande des Systèmes Electriques
- Electromécanique

Thème

*Influence des harmoniques sur la protection
différentielle « cas d'une installation à
CEVITAL »*

Présenté par :

- BELGHOUL Nassim
- BOUZEKRI Billal

Dirigé par :

- Mr M.ADLI
- Mr H.HAMMACHE



Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu Tout Puissant, pour toute la puissance qu'il nous a donnée pour réaliser ce modeste travail.

*Nous exprimons nos plus vifs remerciements à nos promoteurs **Mr : M.ADLI** et **Mr : H.HAMMACHE** qui nous ont aimablement orienté et assidûment dirigé notre travail.*

Nous présentons aussi nos sincères remerciements à tous les enseignants du département électrotechnique. Tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, trouvent ici notre sincère reconnaissance.

Nous remercions aussi chaleureusement l'ensemble du personnel de l'unité « margarinerie » à CEVITAL.



Dédicaces

Je tiens à dédier ce mémoire :

A ma très chère Mère et à mon cher Père, en témoignage et en gratitude de leurs dévouement, de leur soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leur réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mon affection sans limite.

A ceux qui sont la source de mon inspiration et mon courage, à qui je dois de l'amour et de la reconnaissance :

Ames chers frères.

A la mémoire de ma grande mère.

A toute ma famille.

A mon cher Ami et camarade Nassim pour tous les moments de joie et de peine que nous avons a passés ensemble, A sa Famille aussi.

❖ A mes Voisins et à mes Amis (es) sans citer leur nom, au risque d'oublier certains.

A vous tous un grand merci.

BILLAL

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes parents, qu'ALLAH les protège,

A mes frères et sœurs, merci pour vos encouragements,

A mon neveu Yani,

A mes nièces Ayah , Imane et Mayah,

A tous ceux qui m'ont enseigné, je vous suis très reconnaissant,

A mes amis sans exception,

Nassim. B

Liste des abréviations et signes

ASI	Alimentation Sans Interruption
CEF	Comité Electrotechnique Français
CEI	Commission Electrotechnique Internationale
CEM	Compatibilité électromagnétique
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Electrotechnique
DDR	Dispositif différentiel résiduel
FAP	Filtre actif parallèle
FAS	Filtre actifsérie
GTO	Gate Turn-Off
IGBT	InsulatedGateBipolar Transistor
MLI	Modulation de largeur d'Impulsions
THD	Taux de distorsion harmonique
UPQC	Unified Power Quality Conditionner
UTE	Union Technique de l'Electricité
B	Induction magnétique
C	Capacité
C_d	Couple du démarrage
C_{max}	Couple maximal
D	Puissance déformante
F_c	Facteur de crête
f_n	Fréquence de rang harmonique
f_1	Fréquence du fondamental 50Hz
F_p	Facteur de puissance
f_s	Fréquence statorique
g	Glissement
H_n	Taux de distorsion harmonique individuel
i_f	Courant du filtre
I_{max}	Courant maximale
I_{rms}, I_{eff}	Courant efficace
i_{rp}	Courant du récepteur
I_d	Courant du démarrage
I_n	Courant nominal
I_n	Courant harmonique de rang n

Liste des abréviations et signes

k	Coefficient de multiplication
L	Inductance
N_r	Vitesse de rotation du rotor
P	Puissance active
$P_{Foucault}$	Pertes par courant de Foucault
P_j	Pertes Joule
Q	Puissance réactive
R, r	Résistance
S_n	Puissance apparente
V_r	Tension au nœud filtre/récepteur
U	Tension composé
V	Tension simple
V_n	Tension harmonique de rang n
y_0	Valeur de la composante continue
y_{eff}	Valeur efficaces d'une onde distorsionnée
y_n	Valeur efficace de l'harmonique de rang n
Z_{eq}	L'impédance équivalente du filtre
ΔV	Chute de tension
IP	Indice de protection
ω_a	Pulsation de résonance du filtre
φ_n	Déphasage de la composante harmonique de rang n
n	Taux individuel d'harmonique
ω	Pulsation de la fréquence du fondamental
d	L'épaisseur des tôles magnétiques
ρ	La résistivité du matériau
Ω_s	Vitesse de synchronisme
Ω_r	Vitesse du rotor

Liste des abréviations et signes

Chapitre II

Tableau II.1: courants harmoniques émis par un redresseur triphasé à diodes et filtre capacitif	49
Tableau II.2 : exemple de limitation des émissions de courants harmoniques (CEI 61000-3-4).	36
Tableau II.3: niveau de compatibilité des harmoniques en tension (CEI-1000-2-2)	37
Tableau II.4: Taux des harmoniques en tension à imposer pour vérifier l'immunité des appareils (CEI-61000-4-13).	38

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Résultats mesurés	49
Tableau IV.2 : Le taux de distorsion harmonique individuelle H_i (%)	53

Chapitre V

Tableau V.1 : Obligations de protection par DDR (source NFC 15-100)	67
---	----

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Situation géographique de complexe agroalimentaire (CEVITAL de Bejaia)	4
Figure I.2 : Eclaté d'un moteur à rotor à cage	5
Figure I.3 : Schéma de câblages étoile-triangle	7
Figure I.4 : Variation de la vitesse en agissant sur la fréquence	8
Figure I.5 : Motoréducteur	10
Figure I.6 : Redresseur triphasé tout diode	11
Figure I.7 : Tension a la sortie de redresseur	11
Figure I.8 : Représentation d'un onduleur à transistors	12
Figure I.9 : Schéma simplifié d'un variateur de vitesse	12
Figure I.10 : Prince de l'MLI	13
Figure I.11 : Vue de face de l'Altivar 31	14
Figure I.12 : Schéma global du variateur Altivar 31	16
Figure I.13 : Self-réseau	17
Figure I.14 : Logement pour cartes option sur MOVIDRIVE ^R MDX61B	17
Figure I.15 : Schéma globale du variateur MDX61B 005-5A3-4-00	18
Figure I.16 : Filtre passif résonnant	19
Figure I.17 : Filtre passif amorti	20

Chapitre II

Figure II.1 : Coupure brève et creux de tension	21
Figure II.2 : Déséquilibre des tensions triphasées	22
Figure II.3 : Pont de redresseur triphasé à diodes alimentant une charge résistive	22
Figure II.4 : Courants absorbés par un redresseur à diodes	23
Figure II.5 : Spectre harmonique	23
Figure II.6 : Superposition de courants harmoniques de rang 3 dans le neutre	26
Figure II.7 : Une onde déformée est sa décomposition	27
Figure II.8 : Pont triphasé à diodes	30
Figure II.9 : Spectre des harmoniques pour un pont triphasé à diodes	30
Figure II.10 : Sharge linéaire	31

Liste des figures

Figure II.11 : Charge non linéaire	31
Figure II.12 : Schéma d'un statocompensateur	34

Chapitre III

Figure III.1 : Convertisseur à source de tension	39
Figure III.2 : Modèle d'un convertisseur à source de courant	40
Figure III.3 : Principe de fonctionnement du filtre actif parallèle	40
Figure III.4 : Filtre actif série	41
Figure III.5 : Filtre actif parallèle	42
Figure III.6 : Combinaison parallèles-série des filtres actifs	42
Figure III.7 : Filtre actif série et filtre passif parallèle	43
Figure III.8 : Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle	44
Figure III.9 : Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle	44
Figure III.10 : Estructure d'un filtre actif parallèle	46
Figure III.11 : Exemple de compensation d'harmoniques	46

Chapitre IV

Figure IV.1 : Installation (NOVA)	48
Figure IV.2 : L'allure de courant d'une phase à l'entrée de l'installation	49
Figure IV.3 : Spectre harmonique du courant	50
Figure IV.4 : Compensateur actif d'harmonique	55
Figure IV.5 : Compensation hybride	56

Chapitre V

Figure V.1 : sectionneur porte-fusible	59
Figure V.2 : Disjoncteur magnétothermique	60
Figure V.3 : courbe de déclenchement	60
Figure V.4 : court-circuit en aval du variateur	61
Figure V.5 : Protection les $\frac{di}{dt}$	63
Figure V.6 : Protection contre les $\frac{dU}{dt}$	63

Liste des figures

Figure V.7 : Principe du DDR	64
Figure V.8 : emplacement des DDR	64
Figure V.9 : Sélectivité horizontale	65
Figure V.10 : Sélectivité verticale	65

Introduction générale.....	1
Présentation du complexe CEVITAL	
I.1. Introduction	3
I.2. Présentation du complexe CEVITAL.....	3
I.2.1 Historique de situation géographique de l’entreprise.....	3
I.2.2. Activité de CEVITAL	4
I.2.3 : Margarinerie	4
I.2.4. Gamme de produits.....	4
Chapitre I : étude de l’installation existante	
I.3. Les moteurs asynchrones.....	5
I.3.1. Définition	5
I.3.2. Description et principe de fonctionnement.....	5
I.3.2.1. Constitution	5
I.3.2.1.1. Le stator	5
I.3.2.1.2. Rotor bobiné.....	5
I.3.2.1.3. Rotor en court-circuit (ou à cage d’écureuil).....	6
I.3.2.2. Principe de fonctionnement	6
I.3.2.3. Glissement	6
I.4. Les différents modes de démarrages des moteurs asynchrones.....	6
I.4.1. Démarrage direct.....	6
I.4.2. Démarrage étoile / triangle.....	7
I.4.3. Démarrage par auto – transformateur ou par les gradateurs.....	7
I.5. Différentes types de variation de la vitesse	8
I.5.1. Réglage de la vitesse par la modification du nombre de pair de pôles	8
I.5.2. Réglage de la vitesse à fréquence variable.....	8
I.5.3. Action sur le glissement	9
I.5.3.1. Variation de la tension d’alimentation.....	9
I.5.3.2. Variation de la résistance secondaire.....	9
I.6. Caractéristiques des moteurs.....	9
I.7. Motoréducteurs (SEW)	10
I.8. Présentation des deux variateurs de vitesses étudiées « SEW » et « Altivar 31 »...10	
I.8.1. Variateurs de vitesses	10
I.8.2. Construction d’un variateur de vitesse.....	10
I.8.2.1. Redresseur triphasé à diodes.....	10

I.8.2.2. Circuit intermédiaire	11
I.8.2.3. Onduleur.....	11
I.8.2.4. Circuit de commande	12
I.8.3. Modulation de Largeur D'impulsion (MLI).....	12
I.9. Les variateurs ALTIVAR 31.....	13
I.9.1. Applications Départs-moteurs	14
I.9.2. Fonctionnement	14
I.9.3. Caractéristiques du variateur de vitesse Altivar 31.....	15
I.10. Les variateurs MDX61B.....	17
I.10.1. Présentation des composants MOVIDRIVE. ^R MDX61B.....	17
I.10.1.1. Self-réseau	17
I.10.1.2. Partie principale du variateur de vitesse MDX61B (façade externe)	17
I.10.2. Caractéristiques du variateur de vitesse (MDX61B 005-5A3-4-00).....	19
I.11. Filtres passifs.....	19
I.11.1. Filtre passif résonnant	19
I.11.2. Filtre passif amorti.....	20
I.12. Conclusion	20

Chapitre II :étude des imperfections dues aux harmoniques

II.1. Introduction.....	21
II.2. Les perturbations électriques.....	21
II.2.1. Les surtensions.....	21
II.2.2. Creux de tension et coupure brèves	21
II.2.3. Déséquilibre de tension	22
II.2.4. Les harmoniques	22
II.3. Problèmes liés aux harmoniques.....	22
II.4. Charges industrielles génératrices d'harmoniques	23
II.4.1. Appareils générant des courants harmoniques.....	23
II.4.1.1. Redresseur triphasé à diodes et filtre capacitif.....	24
II.4.1.2. Convertisseur de courant	24
II.4.2. Appareils générant des tensions harmoniques.....	24
II.4.2.1. Les transformateurs.....	24
II.5. Perturbations harmoniques	25
II.5.1. Harmoniques	25

II.5.2. Inter-harmoniques.....	25
II.5.3. Infra-harmoniques	25
II.6. Surcharge de conducteur de neutre.....	25
II.6.1. Harmonique de rangs 3 et multiples de 3.....	25
II.7. Grandeurs caractéristiques des harmoniques.....	26
II.7.1. Décomposition d'un signal périodique en série de Fourier.....	26
II.7.2. Valeur efficaces d'une onde distorsionnée.....	27
II.7.3. Taux individuel d'harmonique	27
II.7.4.Taux global de distorsion	28
II.7.5. Facteur de crête	28
II.7.6. Facteur de puissance.....	28
II.7.7. Rang de l'harmonique	29
II.7.8. Représentation spectral	30
II.8. Notion de charge linéaire et non linéaire.....	30
II.8.1. Charge linéaire.....	30
II.8.2. Charge non linéaire.....	31
II.9. Principaux effets des perturbations harmoniques	31
II.9.1. Effets instantanés.....	31
II.9.2. Effets différés.....	32
II.10. Sensibilité des différents types de matériels.....	32
II.11. Réduction de la pollution harmonique.....	33
II.11.1. Absorption sinusoïdale.....	33
II.11.2. Ajout d'une inductance de lissage du courant	33
II.11.4. Statocompensateur.....	34
II.11.5. Les filtres passifs.....	34
II.11.6.Les filtres actifs	34
II.12. Les normes imposées sur le THD	35
II.12.1. Niveau d'émissions	35
II.12.2. Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques	36
II.12.3.Niveau d'immunité	37
II.13. Conclusion	38

ChapitreIII : étude des filtres actifs

III.1.Introduction.....	39
-------------------------	----

Sommaire

III.2.Filtrage actif	39
III.3.Principaux types de filtres	39
III.4.Principe de fonctionnement du filtre actif	40
III.5.Classification des filtres actifs.....	41
III.5.1.Filtre actif série.....	41
III.5.2.Filtre actif parallèle.....	41
III.5.3.La combinaison parallèle-série Actifs (UPQC).....	42
III.5.4.Combinaison hybride active et passive.....	43
III.5.4.1.Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles	43
III.5.4.2.Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.....	43
III.5.4.3.Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.....	44
III.6.Coût du filtre actif	44
III.7.Avantages et inconvénients des filtres actifs.....	45
III.7.1.Les avantages des filtres actifs.....	45
III.7.2.Les inconvénients des filtres actifs.....	45
III.8. Exemple d'application	45
III.9.Conclusion	47

ChapitreIV : dimensionnement du filtre adéquat

IV.1. Introduction	48
IV.2.Transformateur d'intensité.....	49
IV.3. Signal relevé.....	49
IV.4. Etude des remèdes	50
IV.4.1. Inductance de lissage.....	51
IV.4.2. Dimensionnement du filtre passif.....	51
IV.4.3.Dimensionnementdufiltreactif	54
IV.4.3.1. Calcul le THDi après l'installation de filtre actif.....	56
IV.4.4. Filtrage hybride.....	56
IV.5.Etude technico-économique.....	57
IV.5. Conclusion	58

CHAPITRE V : protection de l'installation et modification après insertion du filtre

V.1. Introduction	59
V.2. Les éléments de protection cas d'une installation (NOVA) à Cevital.....	59

Sommaire

V.2.1. Protections en amont des variateurs.....	59
V.2.1.1. Sectionneur.....	59
V.2.1.2. Disjoncteur magnétothermique.....	60
V.2.2. Protections intégrées aux variateurs.....	61
V.2.2.1. Protection des surcharge moteur	61
V.2.2.2. protection contre les courts-circuits moteurs ou ligne en aval du variateur....	61
V.2.2.3. Les variateurs disposent d'autres fonctions d'autoprotection	62
V.2.2.4. Action des protections intégrées	62
V.2.2.5. Protection des composantes	62
V.2.2.5. 1. Protection des diodes	62
V.2.2.5.2. Protection des thyristors.....	62
V.2.3. Les dispositifs différentiels résiduels (DDR)	63
V.2.3.1. Principe.....	63
V.2.3.2. Emplacement de la DDR	64
V.2.3.2.1. sélectivité différentielle horizontale	65
V.2.3.2.2. sélectivité différentielle verticale	65
V.2.3.3. Applications	66
V.2.3.3.1. Protection complémentaire contre les contacts directs.....	66
V.2.3.3.2. Protection contre les contacts indirects.....	66
V.2.3.3.3. Protection contre les risques d'incendie	66
V.2.3.4. Perturbations électriques et conséquences sur les protections différentielles	68
V.2.3.4.1 Les harmoniques	68
V.2.3.4.2. Les courants de fuite transitoires en haute fréquence	68
V.3. Conclusion	68
Conclusion générale.....	68

I.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous donnons en premier temps l'évolution historique du complexe agroalimentaire CEVITAL, sa situation géographique, ses différentes activités industrielles, ses différents objectifs et l'organigramme de ses différentes directions. En outre, nous allons faire une description générale sur les différents constituants de la ligne 4.

I.2. Présentation du complexe CEVITAL [3]

I.2.1 Historique de situation géographique de l'entreprise

CEVITAL compte parmi les entreprises Algériennes qui ont vu le jour dès l'entrée de notre pays en économie de marché, Elle a été créée en par des fonds privés en 1998. Son complexe de production se situe dans le nouveau port de Bejaia et s'étend sur une superficie de 45000 m².

CEVITAL contribue largement au développement de l'industrie agroalimentaire nationale, elle vise à satisfaire le marché national et exporter le surplus, en offrant une large gamme de produits de qualité. En effet les besoins du marché national sont de 1200 T/j d'huile l'équivalent de 12 litres pour une personne par an. Les capacités actuelles de Cevital sont de 1800 T/j, soit un excédent commercial de 600T/j.

Les nouvelles données économiques nationales dans le marché de l'agroalimentaire font que les meilleurs sont ceux qui maîtrisent de façon efficace et optimale les coûts, les charges et ceux qui offrent le meilleur rapport qualité prix. Ceci est nécessaire pour s'imposer sur le marché que CEVITAL partage avec les grandes sociétés commerciales internationales, ses produits se vendent dans différentes villes africaines (Lagos, Niamey, Bamako, Tunis, Tripoli...).

CEVITAL est implanté au nouveau quai du port de BEJAIA à 3 Km du sud-ouest de cette ville, à proximité de la RN 26. Cette situation géographique de l'entreprise lui a beaucoup profité étant donné qu'elle lui confère l'avantage de proximité économique. En effet elle se trouve proche du port et d'aéroport.



Fig I.1 : Situation géographique de complexe agroalimentaire (CEVITAL de Bejaïa)

I.2.2. Activité de CEVITAL

L'ensemble des activités de CEVITAL est concentré sur la production d'huile végétale, de margarine et de sucre et se présente comme suit :

- ✓ Raffinage des huiles (1800 Tonnes/jour).
- ✓ Conditionnement d'huile (1400 Tonnes/jours).
- ✓ Production de margarine (600Tonnes/jour).
- ✓ Fabrication d'emballage PET ; Poly-Ethylène-Téréphtalate (9600 unité/jour).
- ✓ Raffinage de sucre (1600Tonnes/jours).
- ✓ Stockage céréales (120000 Tonnes).

I.2.3 :Margarinerie

- ✓ Mise en production : novembre 2001 ;
- ✓ Capacité de production : 600 tonnes/jour ;

I.2.4. Gamme de produits

- ✓ Margarine de table : "FLEURIAL" ;
- ✓ Margarine à tartiner : "MATINA" (beurre et margarine) ;
- ✓ Margarine de feuilletage : La Parisienne ;
- ✓ Margarine SHORTENING (pour boulangerie, pâtisserie) ;
- ✓ Graisses végétales pour l'industrie agroalimentaire ;
- ✓ Smen et d'Han (MEDINA) ;



Introduction générale

Notre but au niveau de l'entreprise CEVITAL est de faire une étude précise pour l'élimination des courants générés par des charges non linéaires (variateurs de vitesse), et d'installer une protection différentielle.

L'utilisation croissante des dispositifs d'électronique de puissance dans les systèmes électriques a entraîné de plus en plus de problèmes liés aux perturbations ou distorsions harmoniques des réseaux électriques.

La distorsion harmonique est générée par les charges non linéaires connectées au réseau et qui absorbent des courants non sinusoïdaux. Dans de nombreux cas, ces charges se comportent comme des sources de courants harmoniques.

Plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution seront présentées. Nous allons montrer que la solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrements et de résonance. De plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et aux charges polluantes.

En revanche, la solution des filtres actifs parallèles et séries avec leurs combinaisons se présente comme la meilleure jusqu'à ce jour pour tous types de perturbations susceptibles d'apparaître dans le réseau électrique.

Les installations doivent être conçues de manière à fournir une protection principale en fonctionnement normal (protection contre les contacts directs) et une protection en cas de défaut (protection contre les contacts indirects).

Nous avons organisé notre mémoire en cinq chapitres :

Nous consacrerons le premier chapitre à la description du complexe agroalimentaire de CEVITAL en particulier l'unité conditionnement de margarinerie et quelques généralités sur l'installation que on nous allons étudier.

Le deuxième chapitre sera consacré à la description des perturbations en courant pouvant intervenir dans un réseau électrique. Les origines, les conséquences et les normes inhérentes à ces perturbations seront analysées.

Dans le troisième chapitre, on va étudier les différentes structures concernant le filtrage actif. Nous détaillerons les avantages, inconvénients et les perspectives de développement des solutions de type filtre actif, aujourd'hui très utilisés dans l'industrie.

Dans le quatrième chapitre sera consacré à dimensionnés les filtres adéquats (filtre passif, filtre actif et filtre hybride), et on proposea le meilleur filtre pour remédier aux problèmes proposés par la pollution harmonique dans notre installation notre installation.

Introduction générale

Dans le cinquième chapitre on va présenter les différents types de protections et les principales solutions à mettre en œuvre pour assurer la sécurité des appareils et des personnes tout en préservant la meilleure disponibilité de service

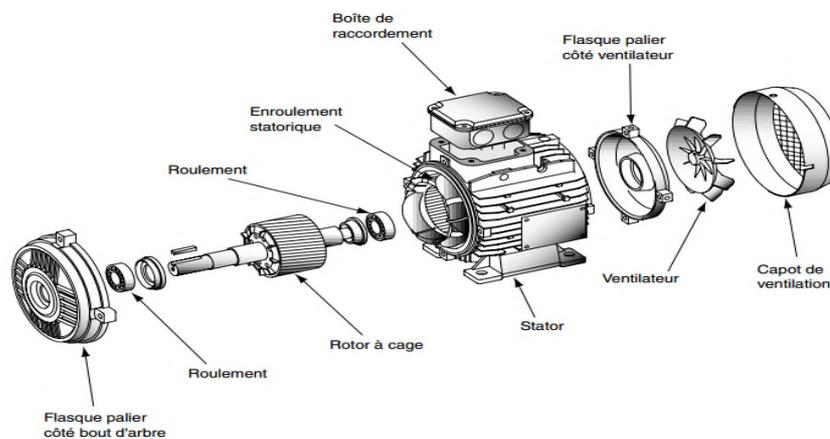
Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

Dans l'installation objet de notre étude, les systèmes à entraîner utilisent principalement le moteur asynchrone commandé par des variateurs de vitesses à base de composants d'électronique de puissance. C'est le comportement des convertisseurs statiques qui donne le caractère non linéaire à ces charges

I.1 Les moteurs asynchrones

I.1.1. Définition [4]

Le moteur asynchrone, dit parfois d'induction, est utilisé depuis de très nombreuses années pour assurer la variation de vitesse de processus industriels. Cependant, le développement des semi-conducteurs de puissance permet l'alimentation à fréquence variable.



FigI.2 :Eclaté d'un moteur à rotor à cage[5]

I.1.2.Description et principe de fonctionnement [6]

I.1.2.1. Constitution

Le moteur asynchrone est constitué d'un inducteur fixe, appelé stator est d'une partie mobile (induit), appelé rotor.

I.1.2.1.1. Le stator

Le stator comporte une carcasse en fonte ou en tôles d'acier dans laquelle est inséré un circuit magnétique formé d'un empilage de tôles. Le stator d'un moteur asynchrone porte un enroulement triphasé reparté dans des encoches du circuit magnétique, il est généralement couplé en étoile.

I.1.2.1.2. Rotor bobiné

L'enroulement, semblable à celui du stator, comporte p paires de pôles par phase ; les trois paires sont reliées à trois bagues qui permettent d'insérer un rhéostat dans le circuit rotorique. Ce moteur est aussi nommé moteur à bagues.

I.1.2.1.3. Rotor en court-circuit (ou à cage d'écureuil)

Au lieu des conducteurs on dispose des barres (en cuivre ou en aluminium) dans les encoches court-circuitées par deux anneaux, de résistance plus faible, On peut avoir un rotor à encoche profonde, ce procédés son utilisés pour améliorer les performances du démarrage.

I.1.2.2.Principe de fonctionnement [7]

Lorsque les enroulements statoriques sont alimentés, ils produisent un champ tournant. Les lignes de flux qui traversent le rotor se déplacent par rapport aux barres conductrices ; un courant induit prend naissance dans ces barres mises en court-circuit par leurs extrémités. L'action du champ magnétique sur ce courant génère des forces (Loi de Laplace), donc un couple qui entraîne le rotor dans le sens du champ tournant. Le couple produit par la machine est un couple moteur car il s'oppose au couple appliqué par la charge qui est à l'origine du glissement.

I.1.2.3.Glisement

Le glissement de la machine repère la différence relative de vitesse entre de rotation du rotor et vitesse de synchronisme des champs. Le glissement défini par :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} \quad (I.1)$$

I.2.Les différents modes de démarrages des moteurs asynchrones[6]

Le démarrage des moteurs asynchrones dépend essentiellement du couple et du courant de démarrage. Dans la majorité des cas on cherche à avoir un couple C_d relativement important et un appel de courant au démarrage le moindre possible.

Donc on voudrait avoir :

✓ $\frac{C_d}{C_{max}}$ le plus grand possible.

✓ $\frac{I_d}{I_n}$ le plus faible possible.

I.2.1. Démarrage direct

C'est le mode de démarrage le plus simple.

a) *Avantages* :

- ✓ Simplicité de l'appareillage.
- ✓ Couple important.

- ✓ Temps de démarrage minimal pour à cage.

b) **Inconvénients :**

- ✓ Au niveau du réseau d'alimentation : en provoquant, une chute de tension non négligeable ($\Delta V > 5\%$ de V) et en sollicitant la fourniture d'une puissance apparente élevée.
- ✓ Appel de courant très important : $I_d = (4 \text{ à } 8) I_n$.
- ✓ Démarrage brutal.

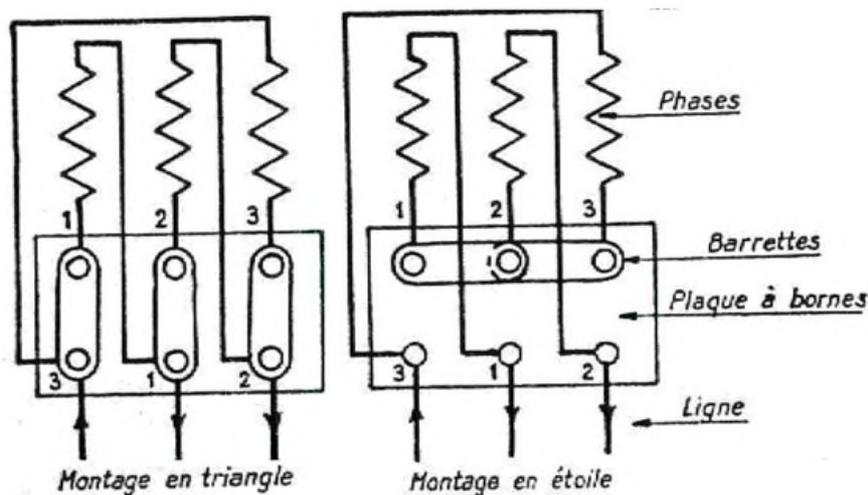
I.2.2. Démarrage étoile / triangle

Principe : démarrage s'effectue en deux temps.

1^{er} temps : mise sous tension et couplage étoile des enroulements, le moteur démarre à tension

réduite $\frac{U}{\sqrt{3}}$.

2^{ème} temps : suppression du couplage étoile et mise en couplage triangle le moteur est alimenté à pleine tension.



FigI.3 : schéma de câblages étoile-triangle.

a) **Avantages :**

- ✓ Appel de courant en étoile au tiers de valeur en direct.
- ✓ Faible complication d'appareillage.

b) **Inconvénients :**

- ✓ Couple réduit au tiers de sa valeur en direct.
- ✓ Coupure entre les positions étoile et triangle d'où apparition de phénomènes transitoires.

I.2.3. Démarrage par autotransformateur ou par les gradateurs

a) **Avantages :**

- ✓ Possibilité de choisir le couple de démarrage.
- ✓ Réduction dans le même rapport, du couple et de l'appel de courant.
- ✓ Les phénomènes transitoires sont supprimés.

b) Inconvénients :

- ✓ Prix élevés, il faut un transformateur spécial.

c) Emplois :

- ✓ Ce système présente le plus d'avantage technique. Il est utilisé, en général, pour les machines de puissance supérieure à 100 W et convient bien pour les compresseurs rotatifs à piston, les pompes, les ventilateurs.

I.2. Différentes types de variation de la vitesse [8]

La vitesse de rotation d'un moteur asynchrone est donnée par l'équation suivante :

$$N_r = (1 - g) \frac{f_s}{P} \left(\frac{tr}{s} \right) \quad (I.2)$$

D'après l'équation (I.2) la variation de la vitesse de rotation d'un moteur asynchrone peut être effectuée, en agissant sur le nombre de pair de pôles ou en augmentant le glissement ou bien avec le changement de la fréquence statorique.

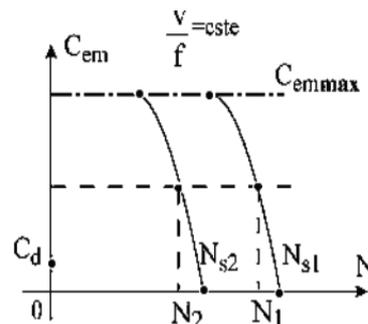
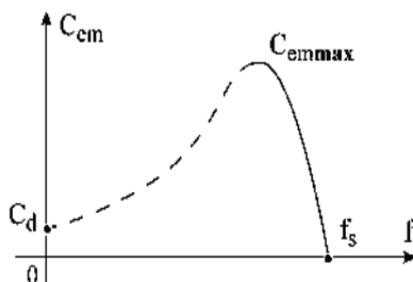
I.3.1. Réglage de la vitesse par la modification du nombre de pair de pôles

On modifie le nombre de pair de pôles (P) par commutation sans modifier l'implantation des bobinages du stator.

Dans la pratique, on construit des moteurs dont le stator prend plusieurs polarités différentes par simple modification du couplage des bobines statoriques convenablement dimensionnées. Le rotor à cage d'écureuil convient à toutes polarités.

I.2.2. Réglage de la vitesse à fréquence variable [9]

Quand il est nécessaire de faire varier la vitesse du moteur, on l'alimente par un onduleur de tension fonctionnant à fréquence variable en maintenant le rapport $\frac{V}{f}$ constant.



FigI.4 :Variation de la vitesse en agissant sur la fréquence**I.2.3.Action sur le glissement [8]****I.2.3.1.Variation de la tension d'alimentation**

Le procédé le plus simple pour faire varier la vitesse du moteur asynchrone consiste à alimenter la machine à fréquence constante mais à faire varier la tension à ces bornes.

I.2.3.2.Variation de la résistance secondaire

La façon la plus classique d'augmenter le glissement en charge du moteur à rotor bobiné est d'utiliser un rhéostat secondaire.

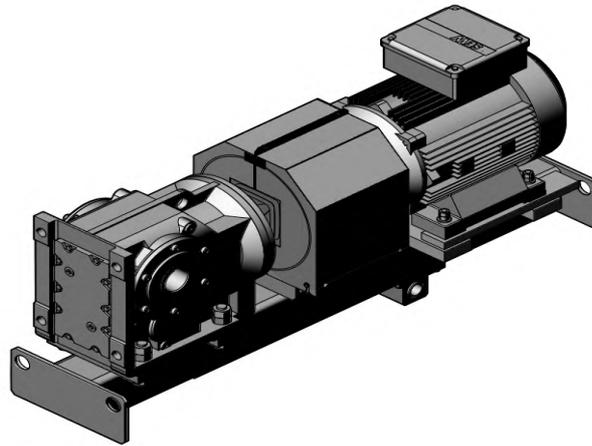
I.2.Caractéristiques des moteurs

Motoréducteur convoyeur de sortie
✓ Type: KA37 DT80N4
✓ $f_n = 225$ Hz
✓ $N_n = 1380$ tr /min
✓ $I_n = 1.15$ A
✓ $U_n = 400$ V
✓ $\cos(\varphi) = 0.81$
✓ $P(W) = 750$
✓ IP = 65

Motoreducteur avance convoyeur pots
✓ Type : KH37 DT71D4-BMG/HR
✓ $f_n = 225$ Hz
✓ $N_n = 1380$ tr/min
✓ $I_n = 1.3$ A
✓ $U_n = 400$ V
✓ $P(w) = 370$
✓ $\cos(\varphi) = 0.76$
✓ IP = 65

I.3. Motoréducteurs (SEW) [10]

Les variateurs de vitesse sont les compléments parfaits aux motoréducteurs pour former un système d'entraînement complet optimal. Il est possible d'obtenir des vitesses de sortie particulièrement lentes en utilisant les motoréducteurs.



FigI.5 : Motoréducteur.

I.4. Présentation des deux variateurs de vitesses étudiées « SEW » et « Altivar 31 » :

I.4.1. Variateurs de vitesses [11]

Le variateur de vitesse est un dispositif électronique de puissance, qui convertit une alimentation triphasée de tension et de fréquence constante en tension continue; puis transforme cette tension en une nouvelle alimentation triphasée de tension et fréquence variables. Cette dernière peut être utilisée pour le réglage continu de la vitesse des moteurs asynchrones triphasés. On l'insère entre le réseau et le stator du moteur. Il offre la possibilité de régler la vitesse d'un moteur asynchrone d'une manière progressive tout en gardant le couple constant.

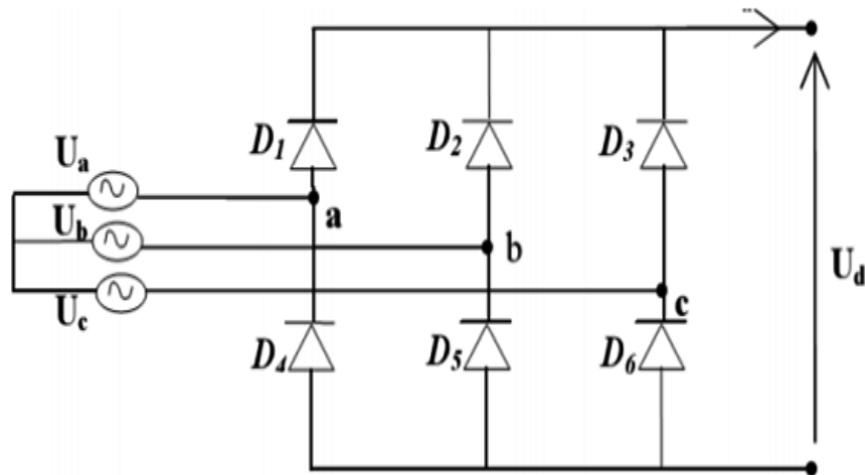
I.4.2. Constitution d'un variateur de vitesse

Depuis la fin des années 60, les variateurs de vitesse ont évolué très rapidement suite au développement des microprocesseurs et semi-conducteurs et à la baisse de leurs prix. Les principes de base des variateurs de vitesse n'ont cependant pas changé.

Les variateurs de vitesse sont constitués de quatre composants principaux :

I.4.2.1. Redresseur triphasé à diodes

La fonction du redresseur au sein du variateur de vitesse est de transformer la tension triphasée alternative en tension continue monophasée.



FigI.6: redresseur triphasé tout diode

La tension redressée est représentée dans la (figure I.7)

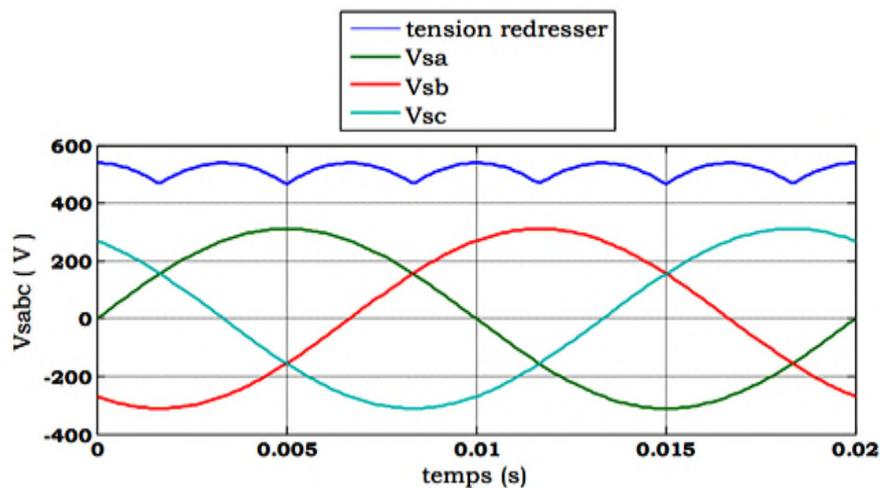


Fig.I.7 : Tension a la sortie de redresseur

I.4.2.2. Circuit intermédiaire

L'alimentation continue de l'onduleur est assurée par redresseur par l'intermédiaire d'un filtre LC dont le principal intérêt est de filtrer les ondulations de la tension continue à la sortie de redresseur.

I.4.2.3. Onduleur

L'onduleur de tension est un convertisseur statique, constituées de cellules de commutation généralement à transistor ou à thyristor GTO pour les grandes puissances, il permet d'imposer à la machine des ondes de tension à amplitudes et fréquences variables à partir d'un réseau

standard 220V/380V-50Hz. Après redressement, la tension continue filtrée est appliquée à l'onduleur.

Le schéma structurel d'un tel onduleur triphasé est illustré par la figure I.8.

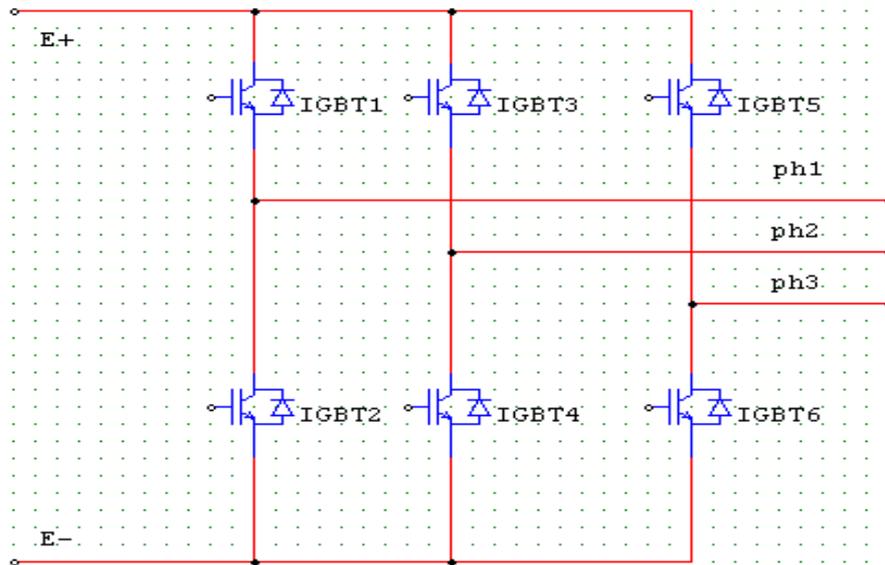
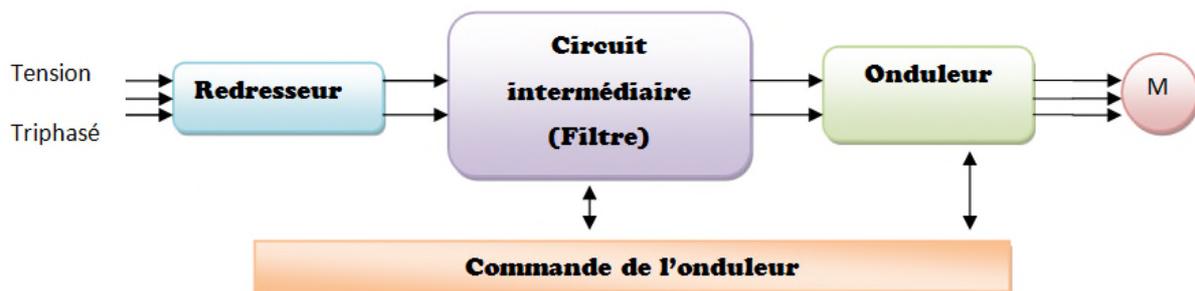


Fig.I.8 :Représentation d'un onduleur à transistors.

I.4.2.4.Circuit de commande

Le circuit de commande est la quatrième partie principale du variateur de vitesse. Ce circuit, appelé couramment carte de commande, a quatre fonctions essentielles suivantes :

- 1- Commande des semi-conducteurs du variateur de vitesse.
- 2- Echange de données entre le variateur de vitesse et les périphériques.
- 3- Collecte de compte-rendu de message de défaut.
- 4- Exécution des fonctions protectrices pour le variateur de vitesse et le moteur.



FigI.9: Schéma simplifié d'un variateur de vitesse

I.4.3. Modulation de Largeur D'impulsion (MLI) [12]

Le principe de la MLI utilisée dans le pont onduleur consiste à appliquer aux enroulements du moteur une suite d'impulsions de tension, d'amplitude égale à la tension continue fournie

par le redresseur. Les impulsions sont modulées en largeur de manière à créer une tension alternative d'amplitude variable.

La MLI alimente les machines à courant alternatif par des courants quasi sinusoïdaux.

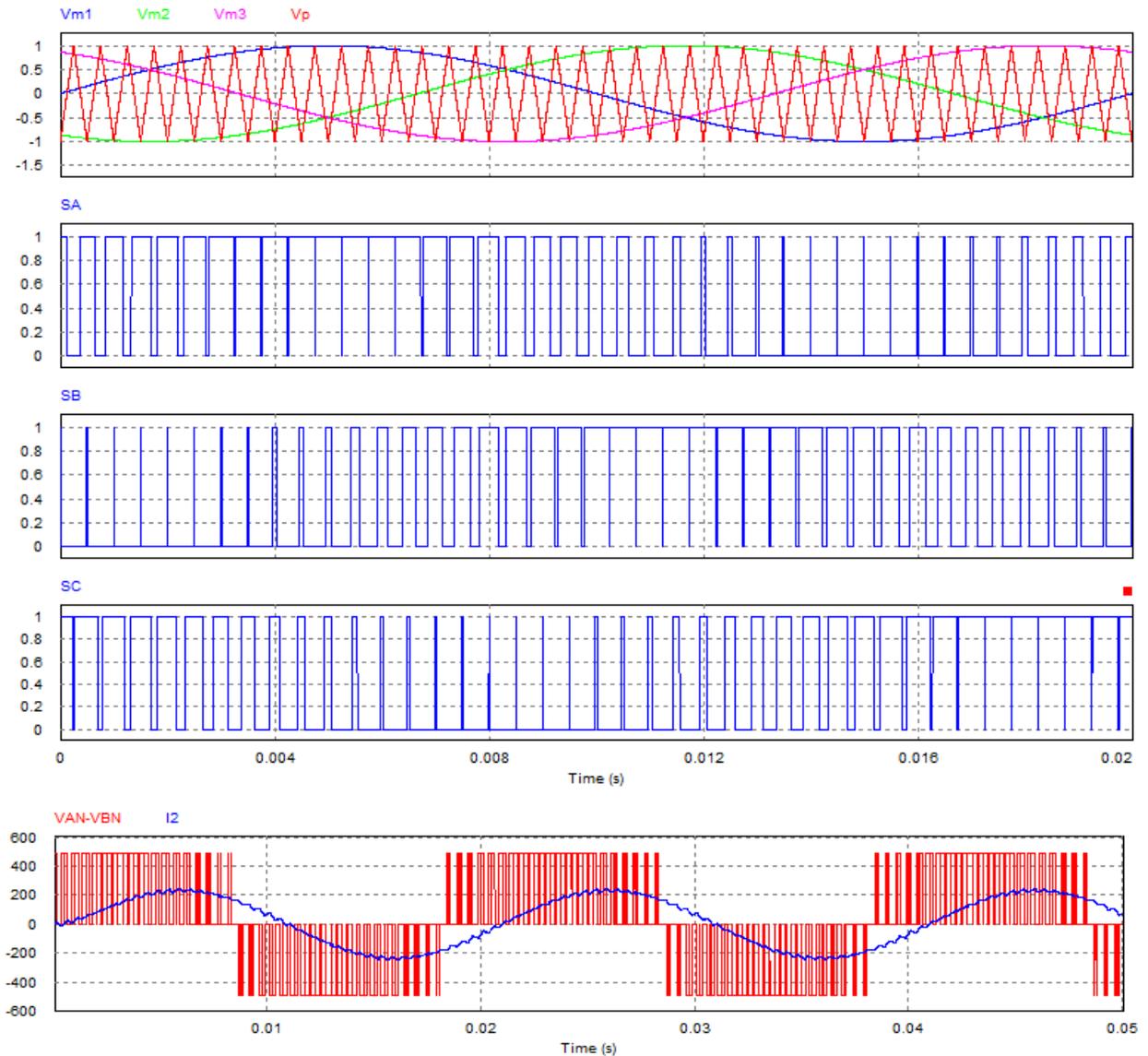


Fig I.10 : Principe de l'MLI.

I.5. Les variateurs ALTIVAR 31 [13]

Le variateur Altivar 31 est un convertisseur de fréquence pour moteurs asynchrones triphasés à cage. L'Altivar 31 est robuste, peu encombrant, facile à mettre en œuvre. Il est livré avec radiateur pour ambiances normales et enveloppes aérées. Il est possible de monter plusieurs côte à côte, ce qui entraîne un gain de place important.

Il intègre des fonctions répondant aux applications les plus courantes, notamment:

- ✓ Manutention (petits convoyeurs, palans ...),
- ✓ Machines d'emballage et de conditionnement,

- ✓ Machines spécialisées (mélangeurs, malaxeur, ...),
- ✓ Pompe, compresseur, ventilateur,

I.5.1.Applications Départs-moteurs

Les associations proposées ANNEXE 1 permettent de réaliser un départ-moteur complet composé d'un disjoncteur, d'un contacteur et d'un variateur de vitesse Altivar 31.

Le disjoncteur assure la protection contre les courts circuits accidentels, le sectionnement, et si nécessaire la consignation.

Le contacteur assure la commande et la gestion des sécurités éventuelles, ainsi que l'isolement du moteur à l'arrêt.

Le variateur de vitesse Altivar 31 est protégé par son électronique contre les courtscircuits entre phases et entre phase et terre, il assure donc la continuité de service, ainsi que la protection thermique du moteur.

I.5.2. Fonctionnement

La figure ci-dessus montre la vue de face et différents boutons de l'Altivar 31.

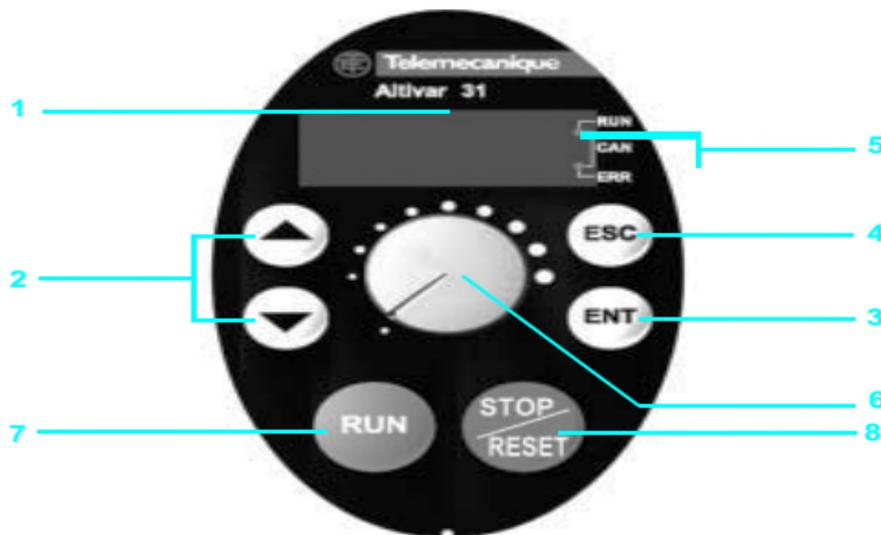


Fig I.11: vue de face de l'Altivar 31

- 1- L'affichage est fait sous forme de codes ou de valeurs par l'intermédiaire de 4 afficheurs "7 segments".
- 2- Touches de défilement dans les menus ou de modification des valeurs.
- 3- "ENT" : Touche de validation pour entrer dans un menu ou valider la nouvelle valeur choisie.
- 4- "ESC" : Touche de sortie des menus (pas d'action de validation).
- 5- Deux DEL de diagnostic pour le bus CANopen.
- 6- Potentiomètre de consigne vitesse.

- 7- "RUN" : Commande locale de marche du moteur.
- 8- "STOP/RESET" : Commande locale d'arrêt du moteur ainsi que la remise à zéro des défauts.

I.5.3.Caractéristiques du variateur de vitesse Altivar 31

- ✓ A l'entrée du variateur :
 - ◆ $U(V) = 380/500$;
 - ◆ $I(A) = 3,6 \text{ max}$;
 - ◆ $f(\text{Hz}) = 50/60$;
- ✓ A la sortie du variateur :
 - ◆ $U(V) = 380/500$;
 - ◆ $I(A) = 2,3$;
 - ◆ $f(\text{Hz}) = 0,5/500$;

Le schéma d'un variateur de vitesse Altivar 31 est représenté dans la figure I.12.

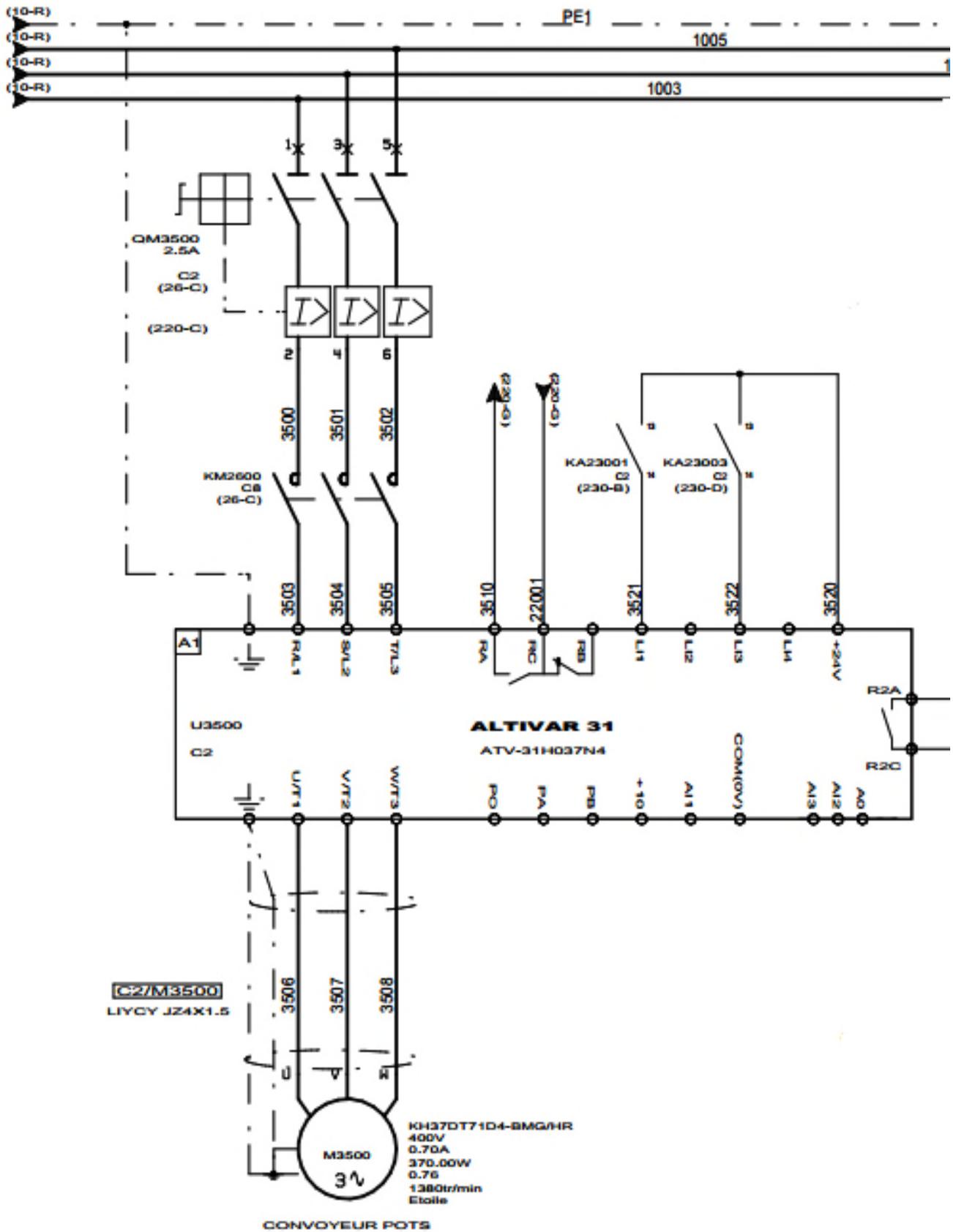


Fig I.12: schéma global du variateur Altivar 31[14]

I.6. Les variateurs MDX61B [15]

Ce sont des variateurs pour les moteurs asynchrones triphasés.

I.6.1. Présentation des composants MOVIDRIVE.^R MDX61B

I.6.1.1. Self-réseau

Elle sert à la :

- ✓ Protection du variateur contre les surtensions réseau.
- ✓ Limitation du courant d'enclenchement si plus de trois variateurs sont branchés en parallèle.



Fig I.13 : Self-réseau

I.6.1.2. Partie principale du variateur de vitesse MDX61B (façade externe)

Les variateurs MOVIDRIVE.^R MDX61B disposent des logements pour cartes options.

Taille 0 (0005...0014)

Taille 1 à 6 (0015... 1320)

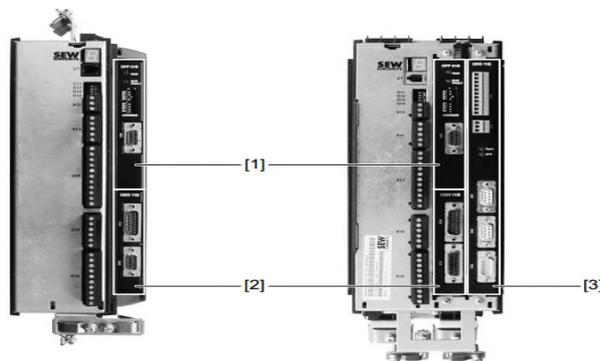


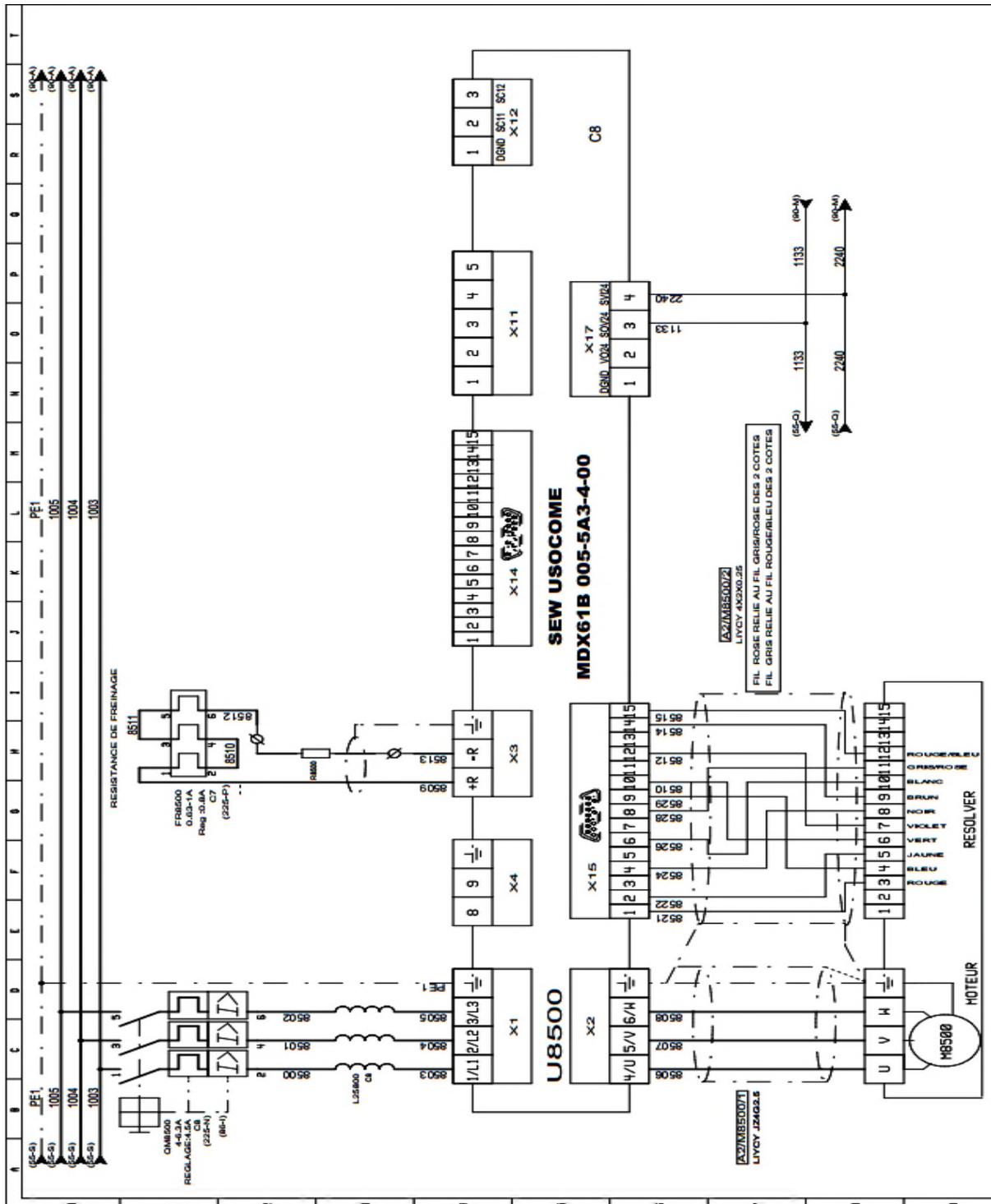
Fig I.14 : logement pour cartes option sur MOVIDRIVE.^R MDX61B

[1] Logement bus de terrain pour option de communication.

[2] Logement pour option codeur.

[3] Logement carte extension pour options de communication (uniquement tailles 1 à 6).

Le schéma d'un variateur de vitesse MDX61B est représentée dans la figure I.15.



I.6.2. Caractéristiques du variateur de vitesse (MDX61B 005-5A3-4-00)

- ✓ A l'entrée du variateur :
 - ◆ $P = 0.5 \text{ KW}$;
 - ◆ $U(\text{V}) = 380/500$;
 - ◆ $F(\text{Hz}) = 50/60$;
- ✓ A la sortie du variateur :
 - ◆ $U(\text{V}) = 380/500$;
 - ◆ $I(\text{A}) = 2,3$;
 - ◆ $F(\text{Hz}) = 0,5/500$;

I.7. Filtres passifs [16]

Pour atténuer la perturbation harmonique les filtres passifs sont traditionnellement employés. Leur principe consiste à dériver le courant harmonique dans une faible impédance placée en parallèle avec la charge polluante pour éviter sa propagation dans le réseau.

Deux types de filtre passif ont été utilisés : le filtre résonnant et le filtre amorti.

I.7.1. Filtre passif résonnant

Le filtre résonnant donné à la Figure I.16 présente une impédance très faible à la fréquence d'accord. Ce filtre est très sélectif et sert à atténuer fortement les harmoniques de rang déterminé, généralement le 5 et le 7.

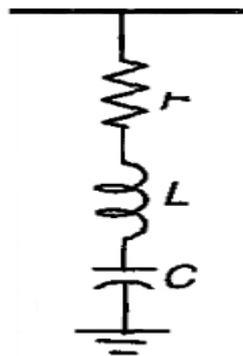


Fig I.16: Filtre passif résonnant

r : est en général la résistance interne de l'inductance.

L'impédance du filtre est donnée par la relation suivante :

$$Z_{eq}(\omega) = \frac{1 - LC(\omega)^2 + jrC\omega}{jC\omega} \quad (I.6)$$

Avec ω_a la pulsation de résonance du filtre:

$$\omega_a = 2\pi \cdot f_a = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

I.7.2. Filtre passif amorti

Le filtre amorti donné à la figure I.17 (filtre passe-haut du second ordre) possède une impédance faible pour les harmoniques aux fréquences supérieures ou égales à sa fréquence d'accord. Il est généralement utilisé pour l'atténuation de l'ensemble des harmoniques de rang élevé (>11).

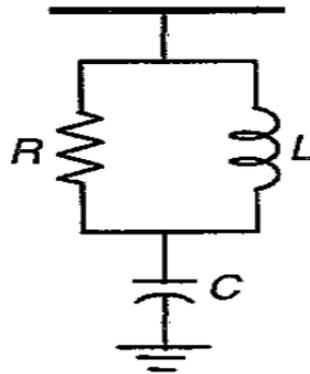


Fig I.17 : Filtre passif amorti

L'impédance d'un filtre amorti est donnée par la relation suivante :

$$Z_{eq}(\omega) = \frac{1 - LC\omega^2 + j\frac{L}{R}\omega}{-\frac{L}{R}C\omega^2 + jC\omega} \quad (I.6)$$

Le filtrage passif a déjà largement fait ses preuves dans le milieu industriel grâce à son coût faible, son efficacité et son adaptation pour des réseaux de forte puissance. Il présente cependant les inconvénients suivants :

- ✓ Lorsqu'il y a plusieurs rangs harmoniques à filtrer, il est nécessaire de mettre autant de filtres accordés sur les rangs correspondants.
- ✓ La présence sur un même réseau de deux filtres passifs accordés sur un rang théoriquement égal, mais en pratique légèrement différent, provoque entre eux la circulation de courants harmoniques très importants qui provoque rapidement leur destruction.

I.8. Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons présenté les différents moteurs et variateurs de vitesses et leurs principes de fonctionnement, ainsi le bilan de puissance de chaque élément, et les différents filtres passifs déjà installés.

II.1.Introduction

Parmi les perturbations électriques que nous avons traitées dans ce chapitre sont les perturbations harmoniques et leurs grandeurs caractéristiques.

Les charges non linéaires sont les principales causes de ces perturbations harmoniques en raison de la multiplication des composants semi-conducteurs.

Les effets de ces perturbations sont connus pour la destruction des équipements électriques.

Dans la fin de ce chapitre nous allons mentionner les normes imposées sur le taux de distorsion harmonique (THD).

II.2.Les perturbations électriques [17]

II.2.1.Les surtensions

La surtension est une augmentation de la tension jusqu'à dépassement de la plage nominale d'une variation de l'ordre de 10%.

II.2.2.Creux de tension et coupure brèves

Les creux de tension sont généralement définis comme une baisse de 10% à près de 100% de la valeur nominale de la tension pendant un temps compris entre 10ms et quelques secondes.

Lorsque la tension est absente (baisse de tension de 100%) pendant 1s à 1mn on parle de « coupure brève » et entre 10ms et 1s de « coupure très brève ».

Lorsque la durée est $\leq 10\text{ms}$, la coupure est généralement due à des phénomènes transitoires ou volontaires, par exemple l'emploi de gradateur, les défauts de courts circuits.

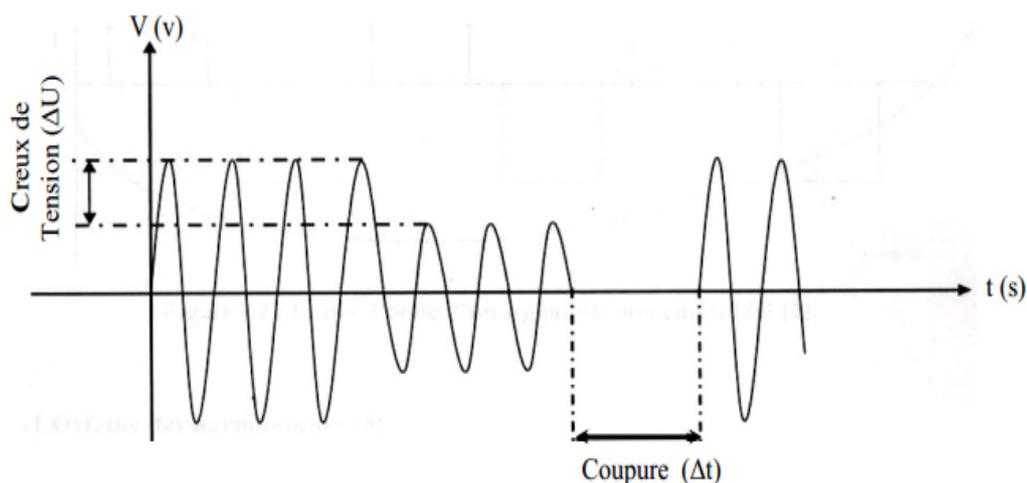


Fig II.1 : Coupure brève et creux de tension

II.2.3. Déséquilibre de tension

L'inégalité en amplitude des tensions des trois phases est due à l'inégalité des puissances appelées sur chaque phase. Ce déséquilibre résulte essentiellement de la présence de fortes charges monophasées raccordées de manière non uniforme au réseau.

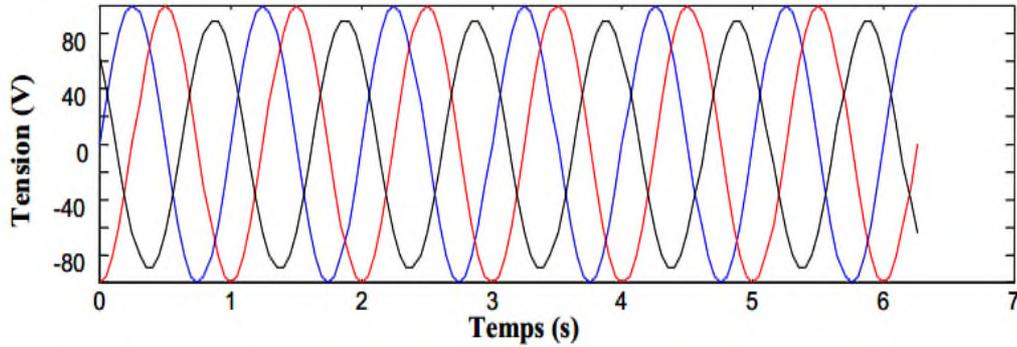


Fig II.2: Déséquilibre des tensions triphasées

II.2.4. Les harmoniques

Ce sont des tensions ou des courants sinusoïdaux dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence fondamentale du réseau. En général, les harmoniques pairs sont négligeables et seuls les harmoniques impairs existent. Les principaux harmoniques présents sont le troisième, le cinquième, le septième et le neuvième.

II.3. Problèmes liés aux harmoniques [18]

Certains appareils, contenant en général des éléments d'électronique de puissance, absorbent un courant qui n'est pas sinusoïdal. Ces charges sont connues sous le nom de charges non linéaires et sont principalement à l'origine de la distorsion harmonique présente sur le réseau. La Figure II.4 illustre les courants nonsinusoïdaux absorbés par la charge non linéaire la plus répandue : le redresseur à diodes ou à thyristors. Ce dispositif génère les harmoniques impairs non multiples de 3 (dans le cas triphasé), les plus importants étant les harmoniques 5, 7, 11 et 13 illustrés dans la figure II.5.

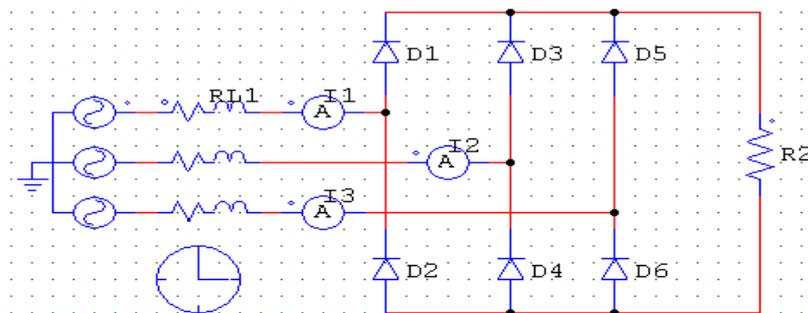


Fig II.3 : Pont de redresseur triphasé à diodes alimentant une charge résistive

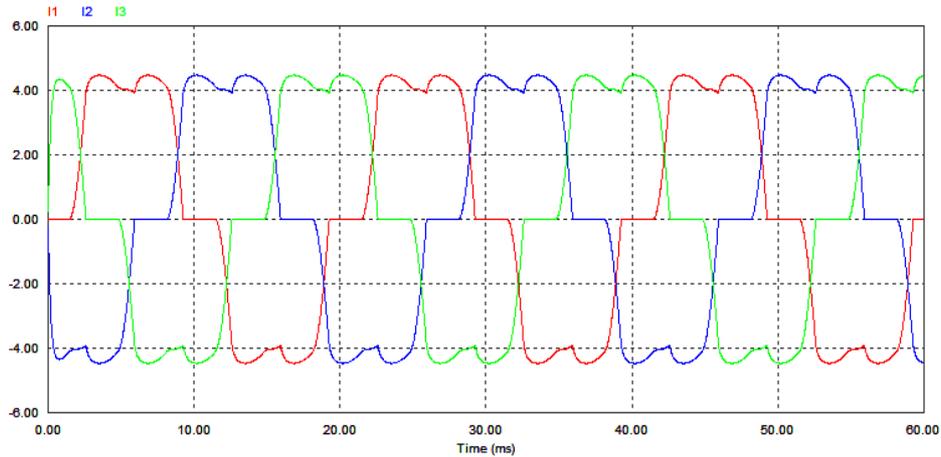


Fig II.4 : Courants absorbés par un redresseur à diodes

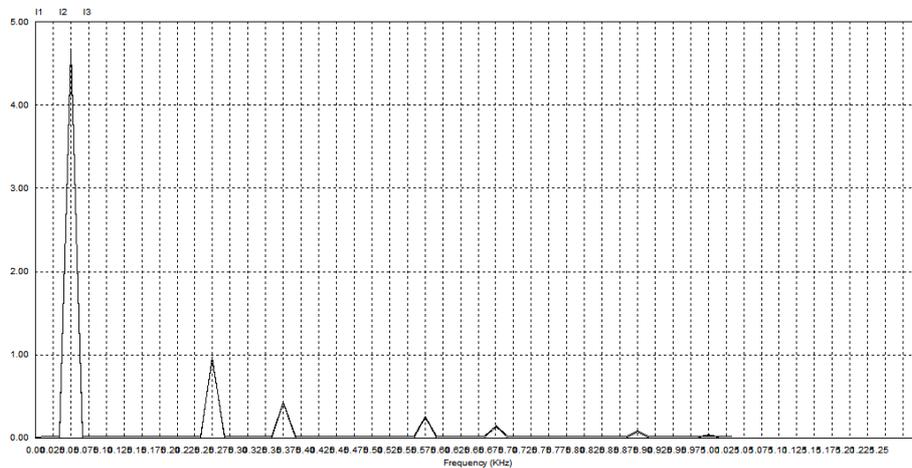


Fig II.5 : Spectre harmonique

II.4.Charges industrielles génératrices d'harmoniques [19][20]

II.4.1.Appareils générant des courants harmoniques

L'avènement de l'électronique de puissance a eu un impact majeur sur le monde industriel au cours des dernières décennies. Cet avènement s'est produit par l'arrivée sur le marché des composants d'électronique de puissance tels que les thyristors, les diodes, les GTO, les IGBT ou les transistors de forte puissance. Ces composants ont permis le développement de convertisseurs statiques de grande puissance qui permettent la conversion de la puissance électrique d'une forme quelconque à une autre forme. Ces convertisseurs apportent un progrès considérable au niveau des procédés industriels. Ils sont vus comme étant des charges

non linéaires qui injectent des courants harmoniques sur le réseau électrique. Nous présentons les charges les plus importantes :

II.4.1.1. Redresseur triphasé à diodes et filtre capacitif

Ce montage est utilisé comme premier étage pour la commande en vitesse variable des machines asynchrones. La commande de la machine asynchrone en vitesse variable est utilisée dans des applications comme l'entraînement de compresseurs, de ventilateurs, de pompes, de convoyeurs... etc.

Le contenu harmonique du courant absorbé par ce type de convertisseur et particulièrement important en comparaison des autres injecteurs rencontrés dans le secteur industriel tableau II.1.

Rang harmonique	3	5	7	11	13
Module (en % I1)	0	80	60	30	25

Tab II.1: Courants harmoniques émis par un redresseur triphasé à diodes et filtre

capacitif En théorie, les seuls rangs présents dans le spectre d'émission sont de la forme :

$$n = 6K \pm 1, K \text{ entier}$$

II.4.1.2. Convertisseur de courant

Les convertisseurs de courant constituent l'un des montages les plus répandus dans le secteur industriel. Ce type de montage est constitué de thyristors qui sont commandés en ouverture. Ceci se fait en jouant sur l'angle d'allumage α de la commande des gâchettes des thyristors. Ils sont utilisés dans de nombreuses applications telles.

a) La commande en vitesse variable des moteurs à courant continu

Les machines à courant continu sont utilisées dans de multiples activités nécessitant de la vitesse variable aussi bien dans les applications de faible puissance.

b) La commande en vitesse variable des machines synchrones

On rencontre des convertisseurs de courant suivis d'un onduleur pour commander les machines synchrones en vitesse variable.

II.4.2. Appareils générant des tensions harmoniques [17]

II.4.2.1. Les transformateurs

Les transformateurs peuvent être générateurs de tensions harmoniques lorsqu'ils fonctionnent en régime saturé. Sur les réseaux, le taux de distorsion harmonique en tension dû à ces appareils reste toujours inférieur à 1%.

II.5. Perturbations harmoniques

II.5.1. Harmoniques [22]

y_n pour $n \geq 2$ est la composante harmonique de rang n du signal $y(t)$, c'est-à-dire la valeur efficace de la sinusoïde de fréquence égale à n fois celle du réseau d'alimentation.

II.5.2. Inter-harmoniques [17]

Les inter-harmoniques sont des signaux de fréquence non multiples entiers de la fréquence fondamentale (130Hz, 170Hz, ...) c'est-à-dire situées entre les harmoniques.

Certains sont émis par les charges non linéaires, d'autres sont injectés intentionnellement par les distributeurs sur leurs réseaux pour télécommander des relais et ainsi piloter les changements de tarification des compteurs domestiques et professionnels.

II.5.3. Infra-harmoniques

Ce sont des composantes sinusoïdales qui sont des fréquences inférieures à celle du fondamentales : 10Hz, 20Hz, ...

La présence d'inter-harmoniques ou d'infra-harmoniques est due à des variations périodiques ou aléatoires de la puissance absorbée par certains récepteurs. Dans ce cas, le signal n'est pas périodique à une période du fondamental T , ce qui explique l'apparition de composantes supplémentaires à celles du développement en série de Fourier.

Ces variations sont provoquées par des machines telles que :

- ✓ Cycloconvertisseurs.
- ✓ cascade hypo synchrone.

II.6. Surcharge de conducteur de neutre [23][24]

II.6.1. Harmonique de rangs 3 et multiples de 3

Dans les installations où le neutre est distribué, les charges non-linéaires peuvent entraîner dans ce conducteur des surcharges importantes par la présence de l'harmonique de rang 3.

Si les charges sont linéaires, les courants constituent un système triphasé équilibré. La somme de courants de phase est donc nulle, ainsi que le courant du neutre.

$$I_n = \sum I_i = 0$$

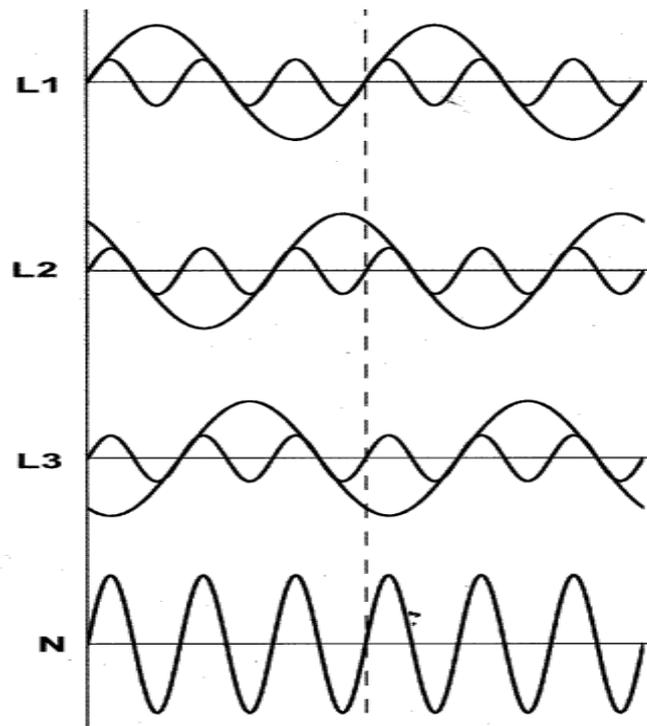


Fig II.6: Superposition de courants harmoniques de rang 3 dans le neutre

Dans le cas de charges non linéaires, les courants de phases ne sont pas sinusoidaux et contiennent donc des harmoniques, pouvant même être multiple de rang 3.

Les composantes harmoniques de rang trois (et tous ses multiples, le rang six, neuf, etc.) des courants de chaque conducteur actif sont tous en phases les uns les autres (c'est-à-dire qu'ils sont homopolaires), et donc s'additionnent arithmétiquement au lieu de s'annuler par addition vectorielle Figure II.6.

II.7. Grandeurs caractéristiques des harmoniques

II.7.1. Décomposition d'un signal périodique en série de Fourier [25][26]

Joseph FOURIER a démontré que toute fonction périodique non sinusoidale peut être représentée par une somme de termes sinusoidaux dont le premier, à la fréquence de répétition de la fonction, est appelé fondamental, et les autres à des fréquences multiples du fondamental appelés harmoniques.

Formule de FOURIER :

$$y(t) = y_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} y_n \sqrt{2} \sin(n \omega t - \varphi_n) \quad (II.1)$$

Avec

y_0 : Valeur de la composante continue généralement nulle.

y_n : Valeur efficace de l'harmonique de rang n .

ω : Pulsation de la fréquence du fondamental.

φ_n : Déphasage de la composante harmonique de rang n .

La figure illustre un exemple de cette décomposition

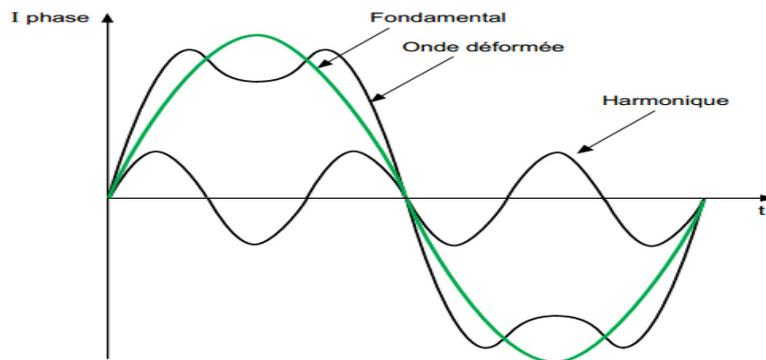


Fig II.7 : une onde déformée est sa décomposition

II.7.2. Valeur efficaces d'une onde distorsionnée [27]

La valeur efficace est responsable des échauffements. Pour une grandeur périodique non sinusoïdale, son expression est la suivante :

$$y_{eff} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} (y_n)^2} \quad (II.2)$$

II.7.3. Taux individuel d'harmonique

Selon les organismes, le taux individuel d'harmonique est défini différemment.

Il sera soit :

- ✓ Le rapport entre la valeur efficace d'un harmonique de rang n est la valeur efficace du fondamental pour la norme CIGREE :

$$H_n(\%) = 100 \frac{y_n}{y_1} \quad (II.3)$$

- ✓ Le rapport entre la valeur efficace d'un harmonique de rang n est la valeur efficace du signal pour la norme CEI :

$$H_n(\%) = 100 \frac{y_n}{\sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} (y_n)^2}} \quad (II.4)$$

II.7.4. Taux global de distorsion

Le taux de distorsion est un paramètre qui définit globalement la déformation de la grandeur alternative.

De la même manière, le taux de distorsion sera :

- ✓ Le rapport entre la valeur efficace des harmoniques à celle du fondamental pour la norme CIGREE.

$$THD(\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} (y_n)^2}}{y_1} \quad (II.5)$$

- ✓ Le rapport entre la valeur efficace des harmoniques à celle de la grandeur alternative, pour la norme CEI.

$$THD(\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} (y_n)^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} (y_n)^2}} \quad (II.6)$$

Avec :

THD : taux de distorsion harmoniques.

y_n : Valeur efficace de l'harmonique de rang n .

y_1 : Valeur efficace de l'harmonique à la fréquence fondamentale.

II.7.5. Facteur de crête [28]

Le facteur de crête F_c est donné par l'équation suivante :

$$F_c = \frac{\text{valeur crête}}{\text{valeur efficace}} \quad (II.7)$$

Pour une onde sinusoïdale F_c est égal à $\sqrt{2}$. Le facteur de crête peut atteindre des valeurs supérieures à 5 pour des ondes très déformées.

II.7.6. Facteur de puissance

Dans le cas d'un réseau équilibré, la puissance apparente. S est définie par :

$$S(va) = V_{eff} \cdot I_{eff} \quad (II.8)$$

La puissance active P , conséquence d'un déphasage entre les fondamentaux du courant et de la tension est alors :

$$P(w) = V_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos(\alpha) \quad (II. 9)$$

Le facteur de puissance F_p , défini par le rapport entre la puissance active et la puissance apparente s'exprime par :

$$F_p = \frac{P}{S} \quad (II. 10)$$

La puissance réactive Q , est quant à elle définie par :

$$Q(var) = V_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \sin(\alpha) \quad (II. 11)$$

A fin d'estimer la participation des harmoniques dans la puissance apparente, on utilise la notion de puissance déformante D définie par :

$$D(w) = V_{eff} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (I_n)^2} \quad (II. 12)$$

I_n : La valeur efficace de l'harmonique de rang n .

La puissance apparente peut donc se mettre sous la forme :

$$S(var) = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (II. 13)$$

Le facteur de puissance s'écrit alors :

$$F_p = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (II. 14)$$

D'où, on peut constater que le facteur de puissance se dégrade par la présence d'harmoniques d'une part et la consommation d'énergie réactive d'autre part.

II.7.7. Rang de l'harmonique [25]

C'est le rapport de sa fréquence f_n à celle du fondamental, la fréquence industrielle 50 Hz.

$$n = \frac{f_n}{f_1} \quad (II. 15)$$

Par principe, le fondamental f_1 a le rang 1.

II.7.8.Représentation spectral [17][29]

C'est un histogramme donnant l'amplitude de chaque harmonique en fonction du rang. L'amplitude est donnée en valeur relative par rapport au fondamental en un point spécifié.

Les variateurs de vitesse, les unités ASI et les convertisseurs de courant sont d'une façon générale alimentés par un pont triphasé avec un nombre de pulsation égale à 6 représenté dans la figure II.8.

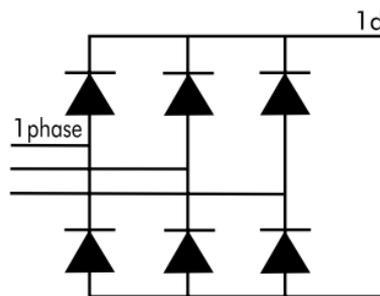


Fig II.8 : Pont triphasé à diodes

Un spectre typique est donné à la figure II.9

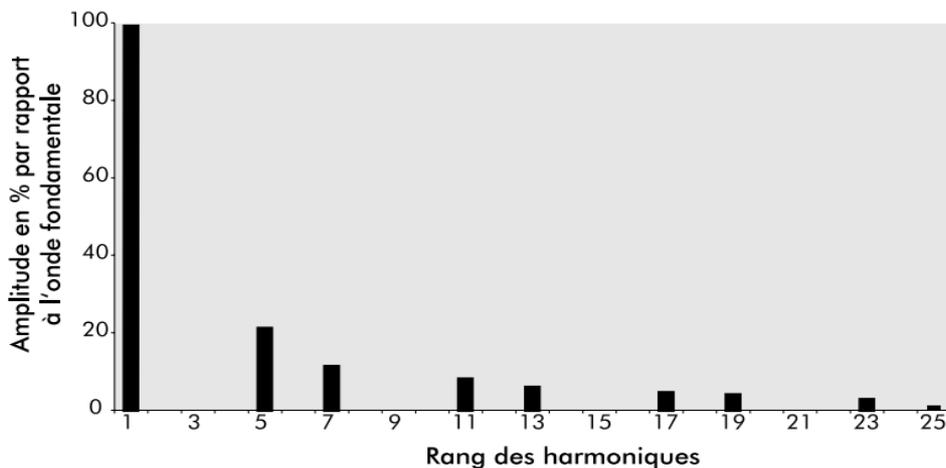


Fig II.9 : Spectre des harmoniques pour un pont triphasé à diodes

II.8.Notion de charge linéaire et non linéaire[22]

II.8.1.Charge linéaire

Une charge est dite linéaire lorsque son impédance est constante, le courant qu'elle absorbe est alors sinusoïdal lorsque la tension est sinusoïdale.

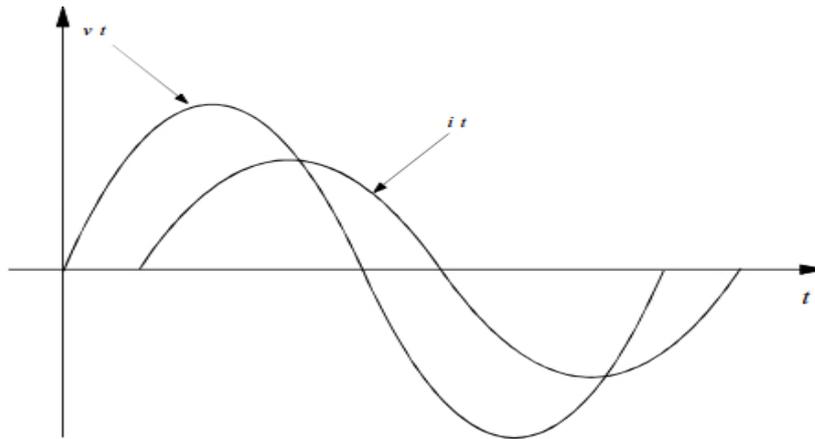


Fig II.10 :Charge linéaire

II.8.2.Charge non linéaire.

Une charge est dite non linéaire lorsque son impédance varie au cours d'une même période, le courant qu'elle absorbe n'est pas sinusoïdal lorsque la tension est sinusoïdale.

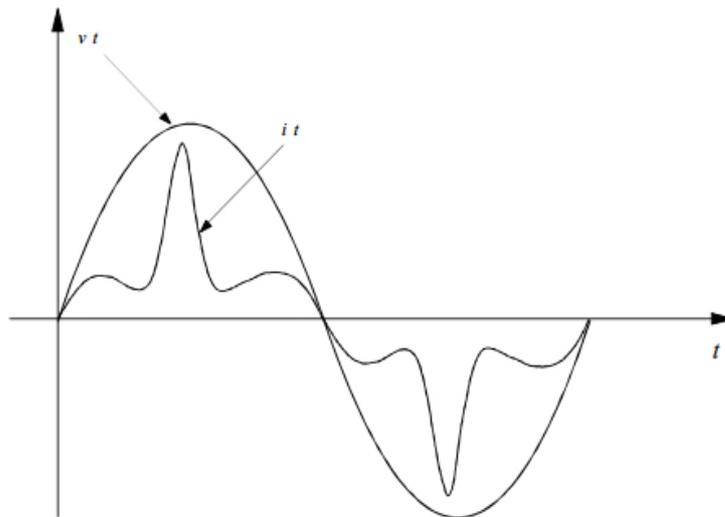


Fig II.11 :Charge non linéaire

II.9.Principaux effets des perturbations harmoniques [17]

II.9.1.Effets instantanés

Ce sont les effets immédiats sur le fonctionnement d'un matériel, comme les parasites qui perturbent les appareils de mesure, ce type d'effets est dû à la déformation de l'onde et aux phénomènes de résonance, il peut aussi causer les déclenchements intempestifs de disjoncteurs ou de relais d'automatisme.

- a. perturbation des matériels électroniques.
- b. Vibrations et bruits

c. Dysfonctionnement des systèmes de protection et des relais.

II.9.2.Effets différés

Ce sont les effets qui apparaissent après une exposition plus au moins longue au phénomène. Ils se traduisent par une perte partielle des fonctionnalités, une indisponibilité et même une destruction complète de l'appareil.

Les effets différés sont classés selon le délai avant destruction comme suit :

- ✓ effets à court terme (quelque secondes).
- ✓ Effets à moyen terme (de quelque secondes à quelques heures).
- ✓ Effets à long terme (de quelques heures à quelques années).

a. Echauffement des condensateurs.

b. Echauffement dû aux pertes supplémentaires des machines et des transformateurs.

c. Echauffement des câbles et des équipements.

II.10.Sensibilité des différents types de matériels [30]

1. Machines asynchrone

La circulation des courants harmoniques dans les enroulements du moteur, crée des échauffements supplémentaires ainsi qu'une altération, généralement faible, du couple moteur.

2. Transformateur

Ils subissent des échauffements supplémentaires en présence des courants harmoniques et peuvent également entrer en résonance mécanique aux fréquences harmoniques, ce qui entraîne outre l'inconvénient sonore, une fatigue mécanique. Les pertes dans le transformateur se composent :

- ✓ Des pertes Joule dans les enroulements :

$$P_j = R. I_{eff}^2 \quad (II. 16)$$

- ✓ Des pertes par courant de Foucault :

$$P_{Foucault} = \frac{\pi^2}{6} \times \frac{d^2}{\rho} \times B_{eff}^2 \times F^2 \quad (II. 18)$$

d : L'épaisseur des tôles magnétiques [mm].

ρ : La résistivité du matériau [Ω/m^2].

B : L'inductance magnétique [T].

3. Câbles de puissance

La circulation de courants harmoniques dans les câbles se traduit par des pertes Joule supplémentaires selon la loi d'Ohm.

$$P = R \cdot I_{eff}^2 = R \cdot \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 \quad (II.19)$$

4. Compteur électrique

La précision des mesures de puissances : active, réactive et apparente est influencée par la présence d'harmonique de tension et du courant.

La puissance apparente peut s'écrire en faisant apparaître la notion de la puissance déformante D :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$$

5. Relais de protection des réseaux

La présence de courants harmoniques se traduit par des déclenchements intempestifs ou par une perte de précision du seuil de déclenchement.

II.11. Réduction de la pollution harmonique

II.11.1. Absorption sinusoïdale [6]

Le prélèvement sinusoïdal est une technique qui permet aux convertisseurs statiques d'absorber un courant très proche d'une sinusoïde avec un facteur de puissance unitaire. Dans ce cas, ces structures se positionnent dans une stratégie préventive et non curative. Ces techniques de prélèvement sinusoïdal s'appliquent aux structures monophasées et triphasées. Ces convertisseurs propres utilisent la technique MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions) également appelée PWM (Pulse Width Modulation) comme principe de pilotage des interrupteurs commandés. En monophasé ce type de structure est assez répandu alors que les convertisseurs triphasés propres sont rares sur le marché, car le surcoût est important. L'évolution de la normalisation peut imposer ce type de convertisseur dans l'avenir.

II.11.2. Ajout d'une inductance de lissage du courant [31]

L'ajout d'inductances de lissage en amont des dispositifs polluants est une solution communément utilisée afin d'atténuer les harmoniques de rangs élevés puisque leurs impédances augmentent avec la fréquence. Ces inductances réduisent donc la distorsion de la tension au point de raccordement mais induisent un coût supplémentaire. De plus, elles doivent être dimensionnées pour le courant nominal circulant en ligne.

On constate dans les deux cas suivants que les allures du courant généré par des charges non linéaires sont éloignées de l'allure sinusoïdale.

II.11.4. Statocompensateur [1][8]

Le statocompensateur constitue une application originale des gradateurs triphasés. Pour obtenir une source de puissance réactive continûment variable, on monte en parallèle des condensateurs créant un maximum de puissance nécessaire et une inductance triphasée commandée par un gradateur. Les condensateurs jouent, dans cet équipement, un double rôle : ils créent la puissance réactive ; il offre un trajet de faible impédance aux courants harmoniques venant de l'inductance et réduisent ainsi très fortement les harmoniques des courants pris au réseau par l'ensemble de l'équipement.

Il s'agit d'une méthode de compensation utilisée pour relever le facteur de puissance,

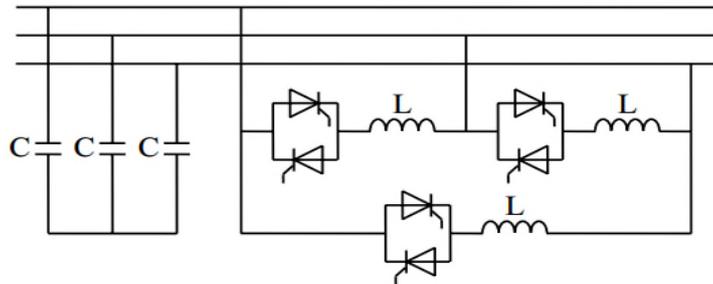


Fig II.12 : Schéma d'un statocompensateur

II.11.5. Les filtres passifs [1][30]

Le plus ancien pour le traitement des harmoniques de courant. Il consiste à piéger les courants harmoniques pour empêcher qu'ils ne se propagent dans le reste du réseau.

II.11.6. Les filtres actifs [1]

Les filtres actifs sont proposées comme des solutions efficaces de dépollution des réseaux électriques afin de traiter les inconvénients inhérents aux solutions traditionnelles comme les filtres passifs. On trouve deux types de structures classiquement utilisées :

- ✓ Le filtre actif (série, parallèle ou bien encore associant les deux).
- ✓ Le filtre actif hybride (série, parallèle).

Le but de ces filtres actifs est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant ou la tension redevienne sinusoïdal. Le filtre actif est connecté au

réseau soit en série (FAS), soit en parallèle (FAP) suivant qu'il est conçu respectivement pour compenser les tensions ou les courants harmoniques, soit associé à des filtres passifs.

II.12. Les normes imposées sur le THD [1]

Afin de garantir un niveau de qualité de l'énergie satisfaisant en limitant les effets des perturbations harmoniques, les distributeurs d'énergie et les utilisateurs sont amenés à respecter des normes et des recommandations qui définissent les règles relatives à la compatibilité électromagnétique (CEM) définies :

- ✓ au niveau international par la CEI (Commission Electrotechnique Internationale).
- ✓ au niveau européen par la CENELEC (Comité Européen de Normalisation Electrotechnique).
- ✓ au niveau Français par l'UTE (Union Technique de l'Electricité) et le CEF (Comité Electrotechnique Français).

En effet, ces normes ont été établies par des groupes d'experts internationaux, qui représentent les constructeurs, les utilisateurs de matériels, ainsi que par des représentants de laboratoires d'essais, des consultants et des universitaires spécialistes du domaine considéré. Afin de faciliter la connaissance des normes pour chaque domaine, les normes CEI qui couvrent tous les domaines de l'électrotechnique sont numérotées et référencées comme par exemple CEI 61000 sur la compatibilité électromagnétique et CEI 60063 qui définit les séries de valeurs normalisées pour les résistances et condensateurs,...etc. Les normes internationales publiées par la CEI dans les domaines de l'électricité et de l'électronique ont pour objectifs de :

- ✓ garantir l'interopérabilité des produits et des systèmes.
- ✓ contribuer à la sécurité lors de l'utilisation des produits.
- ✓ assurer la qualité des produits.

Il s'agit de limitations qui sont maintenant très anciennes (plus de 20ans). Ci-dessous, nous allons détailler les normes internationales les plus récentes concernant les courants et les tensions.

II.12.1.Niveau d'émissions

La norme (CEI-1000-3-4) spécifie les limites d'émissions de courants harmoniques des équipements individuels d'intensité assignée supérieure à 16A et jusqu'à 75A. Ces

limitess'appliquent aux réseaux publics de tensions nominales comprises entre 230 V (monophasé) et 600 V (triphase).

Rang harmonique	Courant harmonique En % du fondamental
3	21.6
5	10.7
7	7.2
9	3.8
11	3.1
13	2.0
15	0.7
17	1.2
19	1.1
21	≤0.6
13	0.9
25	0.8
27	≤0.6
29	0.7
31	0.7
≥33	≤0.6
Pair	≤0.6 ou ≤8/n

Tab II.2 : Exemple de limitation des émissions de courants harmoniques (CEI 61000-3-4).

II.12.2.Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques :

Les normes CEI-1000-2-2 et CEI-1000-2-4 précisent le niveau des harmoniques de tension à respecter au point de raccordement sur les réseaux de distribution basse tension, public et industriel respectivement. Le tableau II.3 présente les niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques sur les réseaux publics basse tension.

Harmoniques impairs non multiple de 3		Harmoniques impairs multiple de 3		Harmonique pairs	
rang	$V_n(\%)$	Rang	$V_n(\%)$	Rang	$V_n(\%)$

5	6	3	5	2	2
7	6	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	$0.2+0.5*25/n$				

Tab II.3: Niveau de compatibilité des harmoniques en tension (CEI-1000-2-2)

II.12.3.Niveau d'immunité

La norme CEI 61000-4-13 précise les essais d'immunité basse fréquence aux harmoniques et inter-harmoniques incluant les signaux transmis sur le réseau électrique. Le tableau II.3 indique les taux des harmoniques en tension à utiliser pour vérifier l'immunité des appareils pour les matériels et systèmes sensibles et les réseaux industriels.

Rang harmonique	Matériels et systèmes sensibles	Réseaux Industriels
	%	%
3	8	8
5	8	12
7	6.5	10
9	2.5	4
11	5	7
13	4.5	6
15	-	3
17	3	5
19	2	5
21	-	2
23	2	4

25	2	4
27	-	2
29	1.5	4
31	1.5	3

Tab II.4:Taux des harmoniques en tension à imposer pour vérifier l'immunité des appareils (CEI-61000-4-13).

Compte tenu de toutes ces normes imposées par la réglementation CEM, nous avons besoin de mettre en œuvre des moyens efficaces afin de limiter la propagation de la pollution harmonique des réseaux de distribution d'énergie. De plus, les normes actuelles ne sont pas tout à fait satisfaisantes car elles ne tiennent pas compte de l'influence du réseau et de la déformation initiale de la tension. Par ailleurs, elles paraissent un peu laxistes pour les appareils de faibles puissances.

II.13. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons traité quelques perturbations électriques du réseau industriels, on a consacré la plus part de temps à expliquer les perturbations harmoniques leurs origines et les effets sur le matériels électriques.

Cette pollution harmonique à des effets nocifs. Pour réduire ces derniers on a cité plusieurs techniques de dépollution.

III.1.Introduction

Parmi les solutions de réduction des perturbations harmoniques de courant ou de tension, on peut les regrouper en deux familles : les filtres actifs et les filtres passifs.

Les filtres passifs traditionnellement utilisés pour la compensation des harmoniques sont de plus en plus abandonnés au profit de nouveaux dispositifs appelés filtres actifs de puissance.

Les filtres actifs de puissance ont été étudiés pour la compensation d'harmoniques dans les réseaux de puissance industriels depuis le principe de compensation proposé par H. Sasaki et T. Machida en 1971. [30]

III.2.Filtrage actif [31]

Les inconvénients inhérents aux filtres passifs (non adaptatifs aux variations de la charge et du réseau, phénomène de résonance) et l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les Transistors IGBT, ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtres appelée filtres actifs de puissance. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant et la tension du réseau soient rendus sinusoïdaux et parfois avec un facteur de puissance unitaire. Le filtre actif est connecté en série, en parallèle, en combinant ces deux dernières structures ensemble ou associé avec des filtres passifs en fonction des grandeurs électriques harmoniques (courants ou tensions) à compenser.

III.3.Principaux types de filtres [30]

Le filtre actif peut être à source de tension ou à source de courant dont les schémas généraux sont présentés aux figures (III.1 et III.2).

- ✓ Filtre actif à source de tension.

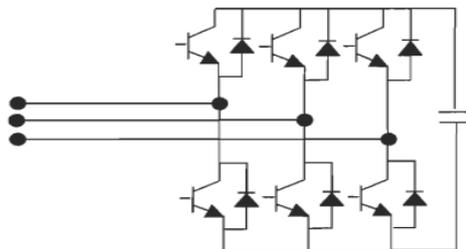


Fig III.1 : Convertisseur à source de tension

- ✓ Filtre actif à source de courant.

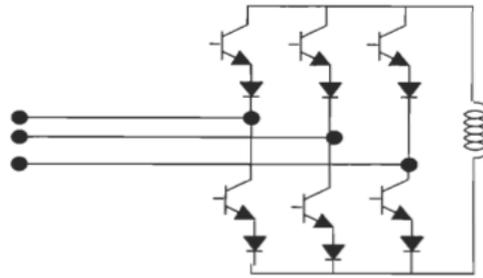


Fig III.2 :Modèle d'un convertisseur à source de courant.

Un système de filtrage pratique consiste en une combinaison d'un filtre actif et d'un filtre passe-haut de second ordre, une excellente performance de filtrage avec une faible fréquence de commutation. Le filtre actif supprime les harmoniques de rangs faibles, pendant que le filtre passe haut s'occupe du filtrage des harmoniques de rangs élevés dans les courants de la charge.

III.4.Principe de fonctionnement du filtre actif [20]

Les filtres actifs sont composés

d'onduleurs qui sont des convertisseurs statiques de puissance. Alimenté par une source de courant ou de tension continue, l'onduleur peut délivrer un courant ou une tension dont le contenu harmonique dépend uniquement de la loi de commande de commutation des interrupteurs.

Les filtres actifs agissent donc comme des sources de tension ou de courant harmoniques en opposition de phase avec ceux du réseau afin de rétablir un courant de source quasi sinusoïdal.

Le filtre actif peut être reconnecté au réseau en série ou en parallèle, suivant qu'il est conçu pour compenser les tensions ou les courants harmoniques.

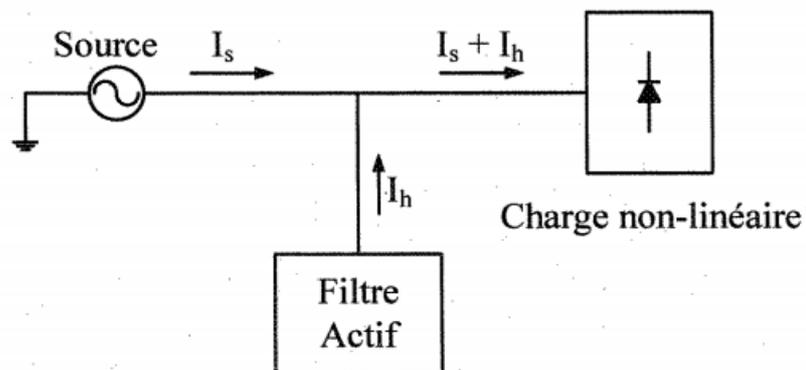


Fig III.3 :Principe de fonctionnement du filtre actif parallèle

Ou : I_s : Courant de source sinusoïdal (fondamental).

I_h : Courants harmoniques.

III.5.Classification des filtres actifs

Les filtres actifs peuvent être classifiés à partir du type de convertisseur qu'ils utilisent, de leur topologie ou encore de leur nombre de phases. Nous nous limiterons ici à la classification selon leurs différentes topologies. Suivant leurs topologies, les filtres actifs peuvent être en série, en parallèle ou mixtes (hybride).

III.5.1.Filtre actif série [32]

Le filtre actif série est connecté en série sur le réseau figure III.4. Il se comporte comme une source de tension qui engendre des tensions harmoniques dont la somme avec la tension réseau est une onde sinusoïdale. Il est destiné à protéger les installations sensibles aux tensions perturbatrices (harmoniques, creux de tension, déséquilibres) provenant de la source et également celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Toutefois, cette topologie présente quelques difficultés et inconvénients lors de sa mise en œuvre : elle ne permet pas, par exemple, de compenser les courants harmoniques consommés par la charge.

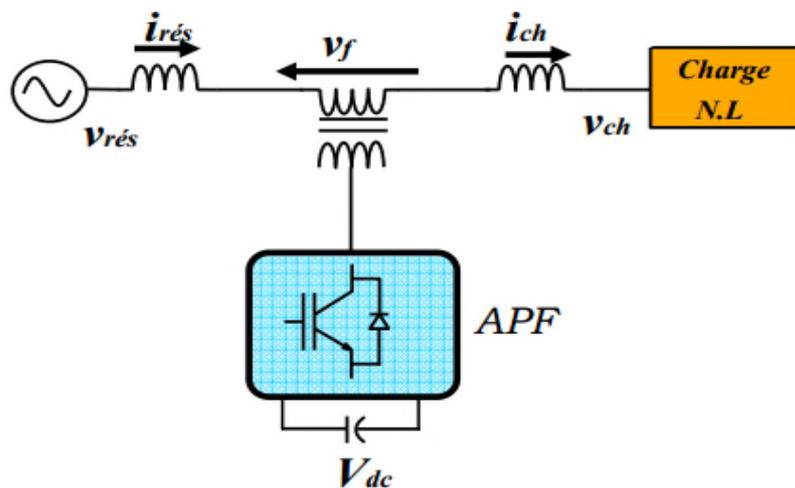


Fig III.4 :Filtre actif série [6]

III.5.2.Filtre actif parallèle [33]

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau comme le montre la figure III.5 est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de

phase avec ceux-ci. Le courant du côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du FAP consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés) produits par des charges polluantes de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif.

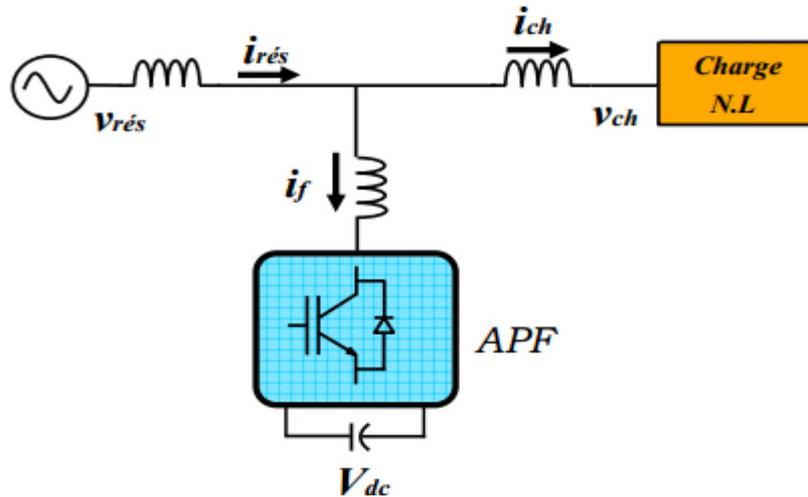


Fig III.5 :Filtre actif parallèle [31]

III.5.3.La combinaison parallèle-série Actifs (UPQC)

La figure III.6 schématise la configuration de la combinaison parallèle-série actifs qui s'appelle aussi (Unified Power QualityConditionner UPQC),elle résulte de l'association des deux filtres actifs de puissance parallèle et série. Cette structure bénéficie des avantages de deux types de filtres actifs série et parallèle et elle permet d'assurer simultanément un courant sinusoïdal et une tension du réseau électrique également sinusoïdale.

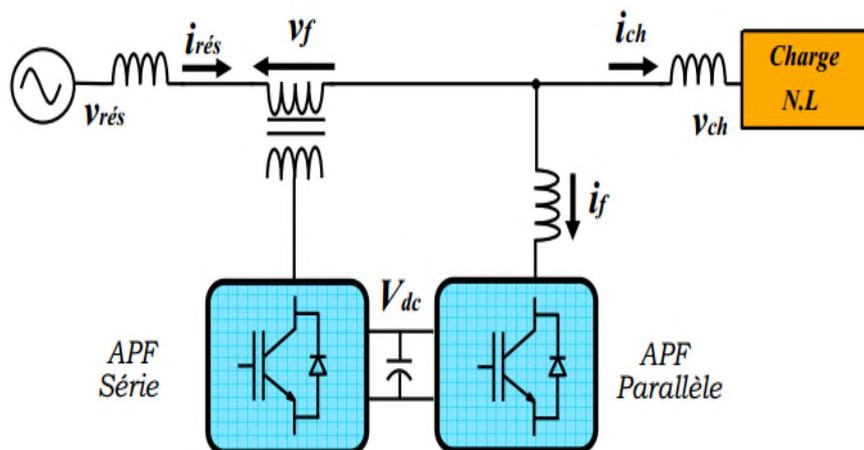


Fig III.6 :Combinaison parallèles-série des filtres actifs [31]

III.5.4. Combinaison hybride actif et passif [34]

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association de filtres actifs de faible puissance à des filtres passifs peut être une solution. Dans ce cas, les filtres passifs ont pour rôle d'éliminer les harmoniques prépondérants (par exemple les courants harmoniques de rangs 3, 5 et 7) permettant de réduire le dimensionnement des filtres actifs qui ne compensent que le reste des perturbations. On peut distinguer trois configurations du filtre actif hybride :

- 1) le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.
- 2) le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.
- 3) le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

III.5.4.1. Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles [31]

Le filtre série régule la tension au point commun de connexion tandis que le filtre parallèle est réglé sur quelques harmoniques de courant (rangs inférieurs) qui doivent être supprimés. Il est représenté par la Figure III.7.

Cette structure a la possibilité de réduire les harmoniques de tension et de courant à un prix raisonnable.

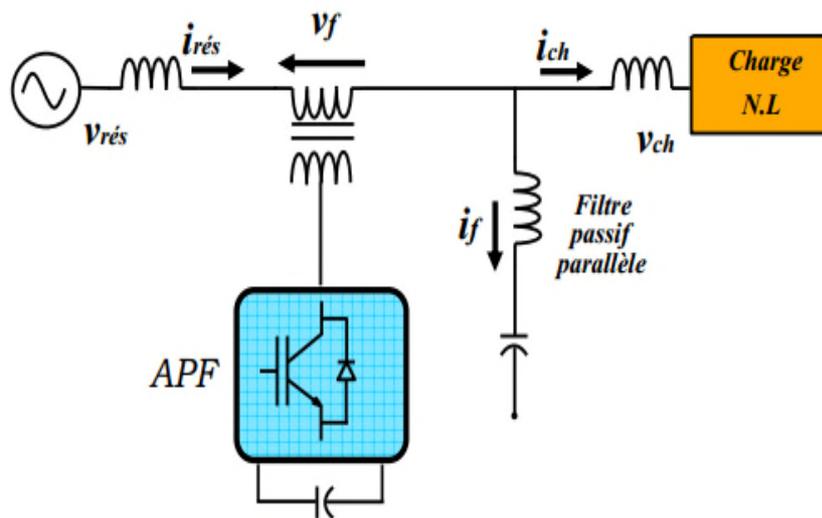


Fig III.7 : Filtre actif série et filtre passif parallèle

III.5.4.2. Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles

Le principe de fonctionnement de cette configuration, présentée en figure III.8 est la même que la précédente avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du filtre actif série car

le courant qui le traverse est plus faible. De plus, le filtre actif série est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge.

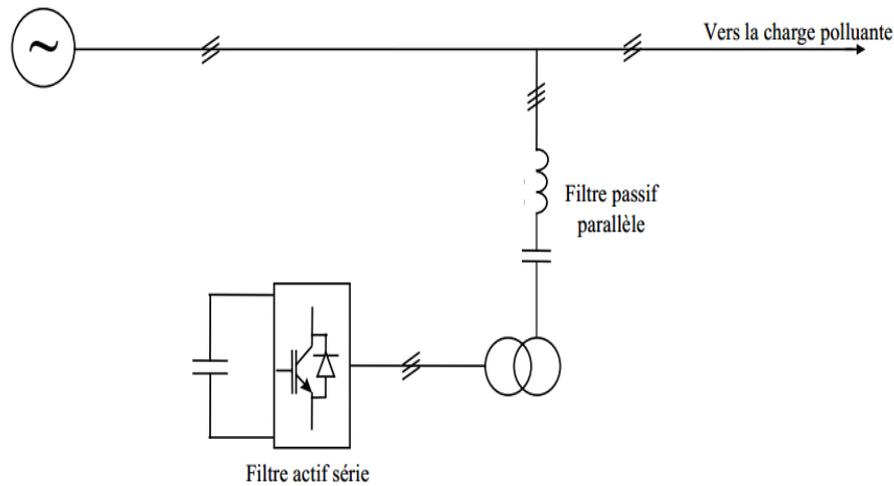


Fig III.8 : Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle.

III.5.4.3. Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

Le rôle du filtre actif parallèle dans cette configuration, montrée en Figure III.9, est la compensation des courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante. Le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques hautes fréquences y compris ceux créés par le filtre actif parallèle.

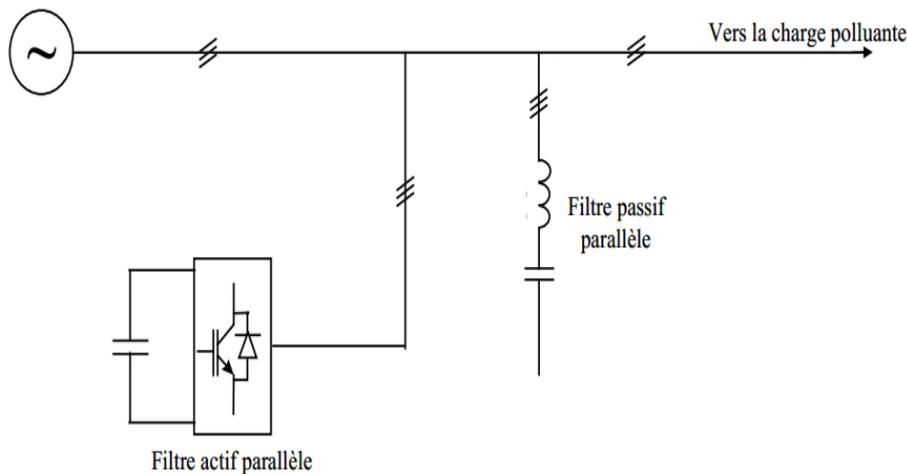


Fig III.9 : Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

III.6: Coût du filtre actif [20]

Le coût du filtre actif varie principalement en fonction de la taille de son élément de stockage d'énergie, du nombre de semi-conducteurs qu'il contient ainsi que de sa topologie. La topologie du filtre actif joue un grand rôle

dans le coût en amenant des économies potentielles du montage. La topologie hybride, de son côté, permet de réduire les coûts du filtre actif.

III.7. Avantages et inconvénients des filtres actifs [30]

III.7.1. Les avantages des filtres actifs.

Le filtre actif offre de nombreux avantages :

- ✓ Il s'adapte automatiquement à l'évolution des charges et du réseau.
- ✓ Il peut compenser plusieurs rangs harmoniques.
- ✓ Il ne passe pas en surcharge lorsque le courant harmonique à compenser dépasse le dimensionnement du filtre actif. Il limite son émission de compensation harmonique au maximum de ses capacités, mais il n'y a aucun risque de destruction.
- ✓ Il peut protéger des condensateurs de compensation par élimination des courants harmoniques générés par une charge.

III.7.2. Les inconvénients des filtres actifs

Le filtrage actif présente quelques inconvénients :

- ✓ Le filtrage actif n'est possible que dans le cas des réseaux de faible puissance.
- ✓ Il permet la compensation de l'énergie réactive, mais à un coût très élevé par rapport au filtrage passif.
- ✓ Son coût est beaucoup plus élevé que celui du filtrage passif.

III.8. Exemple d'application [35]

La figure III.10 montre un exemple typique de filtre actif parallèle réalisé à partir d'un onduleur de tension. Selon le mode de commande retenu, on pourra traiter uniquement les composantes harmoniques et/ou la puissance réactive. Dans cette application, l'onduleur doit d'abord absorber des courants compensant les courants harmoniques créés par le récepteur polluant. Pour cela, il est muni d'un contrôle de courant triphasé dont les consignes peuvent être élaborées par différence entre le courant instantané issu de ce récepteur et sa composante fondamentale.

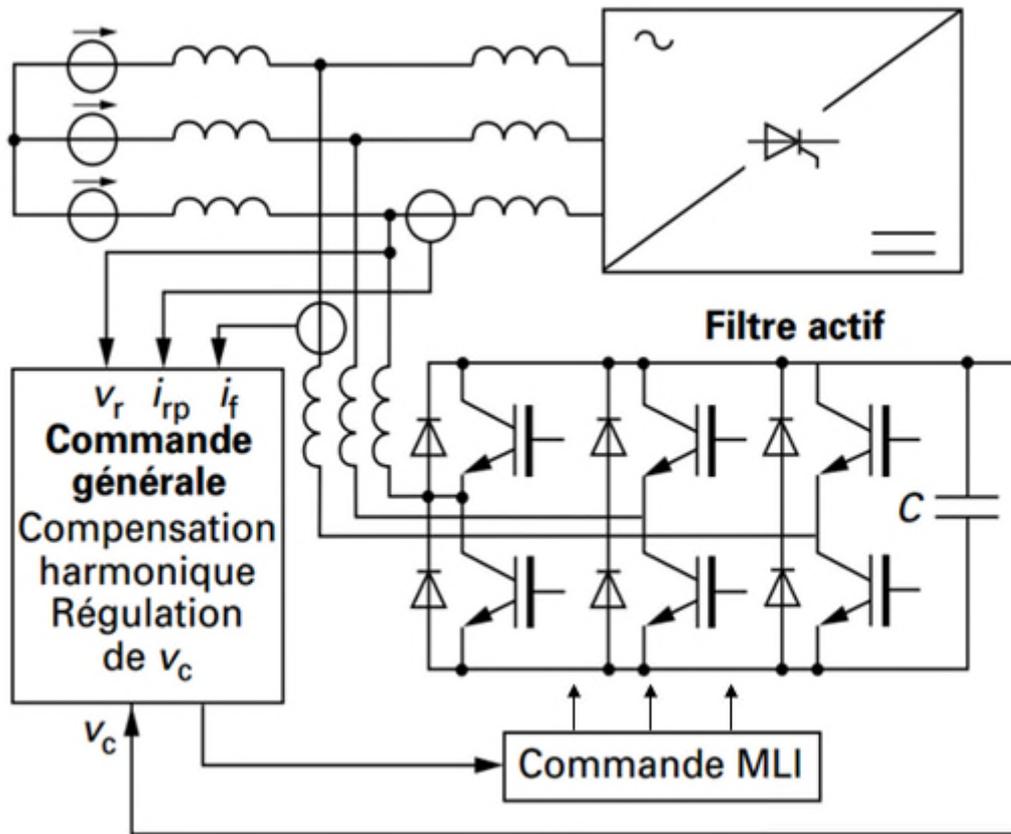


Fig III.10 :Structure d'un filtre actif parallèle

L'exemple très classique d'un récepteur polluant constitué par un redresseur à thyristor(en pont triphasé) est donné sur la (figure III.11).

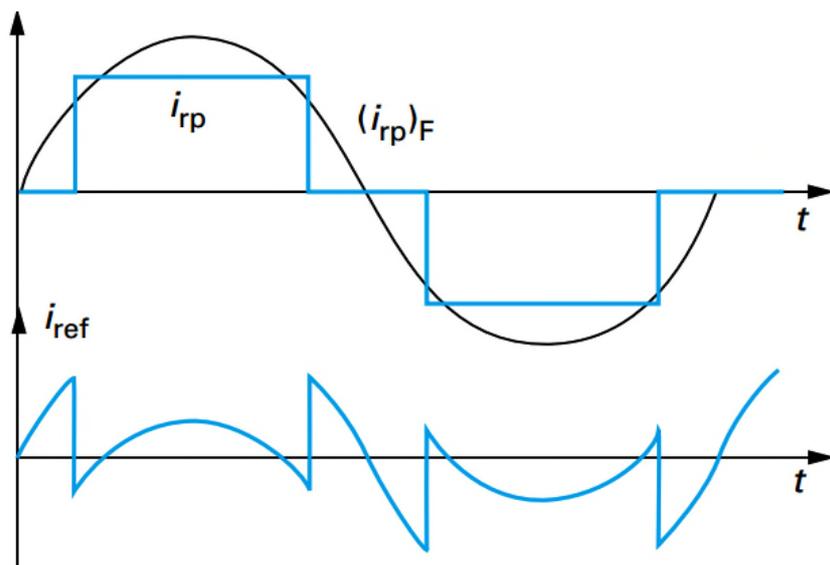


Fig III.11 : Exemple de compensation d'harmoniques

III.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expliqué plusieurs solutions de dépollution des réseaux électriques, celles qui répondent le mieux aux contraintes industrielles aujourd'hui sont les compensateurs actifs parallèles, série, combinaison parallèle-série actifs, et hybride (actifs et passif).

Les filtres actifs sont les plus avantageux, mais présentent toujours quelques inconvénients.

IV.1. Introduction

Durant la période de stage pratique de fin d'études que nous avons fait à l'entreprise CEVITAL, nous avons identifié dans l'unité de margarinerie l'une des installations électrique (NOVA) représentée sur la (figure IV.1). Cette installation est constituée des éléments pollueurs de réseau électrique de l'entreprise.

Ces éléments sont des variateurs de vitesse de type (SEW MDX 61 B et Altivar 31). Notre travail consiste à mesurer les courants de phases de l'installation, afin de dimensionner les filtres adéquats.

Pour mesurer le courant électrique nous avons utilisé les appareils suivants :

- ✓ Un oscilloscope à mémoire.
- ✓ Une pince ampère métrique.
- ✓ Un voltmètre.
- ✓ Un transformateur d'intensité.
- ✓ Un micro-ordinateur.
- ✓ Des fils.
- ✓ Les logiciels (MATLAB, Open Choice Disktop).



Fig IV.1 : Installation (NOVA)

IV.2. Transformateur d'intensité

Avant de nous déplacer à l'entreprise pour faire les mesures nécessaires, nous avons calculé au laboratoire de mesures électriques le coefficient de multiplication k d'un transformateur d'intensité qu'on va utiliser durant notre mesure. Les résultats sont donnés dans le tableau ci-dessous.

Nombre de mesure	1	2	3
I(A)	2	3	4
V(V)	4,85	5,7	6,29

Tab IV.1 : Résultats mesurés

$$k = \frac{V_3 - V_1}{2}$$

Application : $k = \frac{6,29 - 4,85}{2} = 0,72$

IV.3. Signal relevé

La figure ci-dessous représente le signal du courant d'une phase, qui a été relevé avec un oscilloscope à mémoire. Nous avons transféré ce signal vers un micro ordinateur sous forme fichier Excel à l'aide d'un logiciel (Open Choice Disktop). Avec deux programmes sous MATLAB, on a obtenu le signal de courant, le spectre harmonique, le taux de distorsion et la valeur efficace du courant.

Signal to analyze

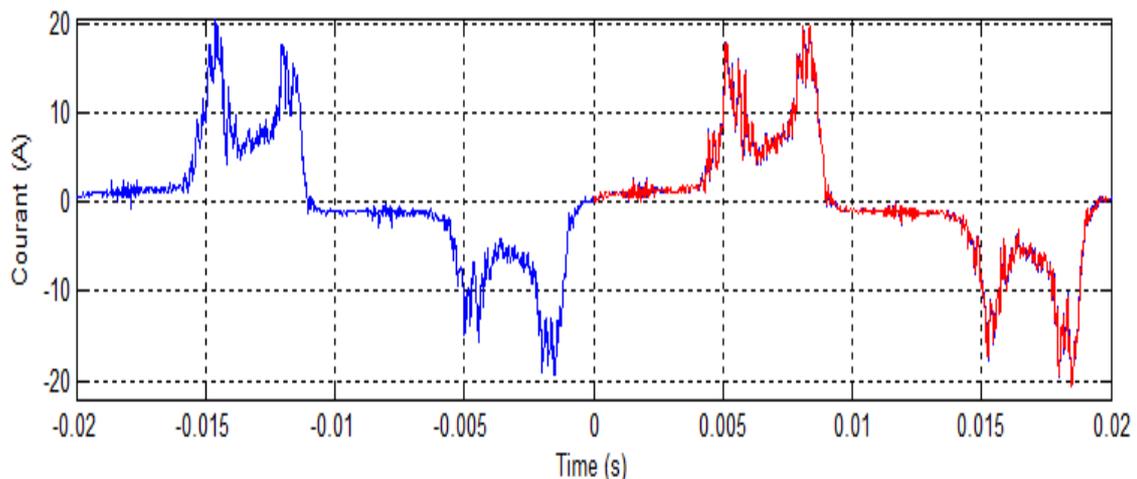


Fig IV.2: L'allure de courant d'une phase à l'entrée de l'installation

D'après le spectre harmonique il y a des rangs harmoniques remarquable tels $n = 3, 5, 7, 9, 11$ et le 13 .

FFT analysis

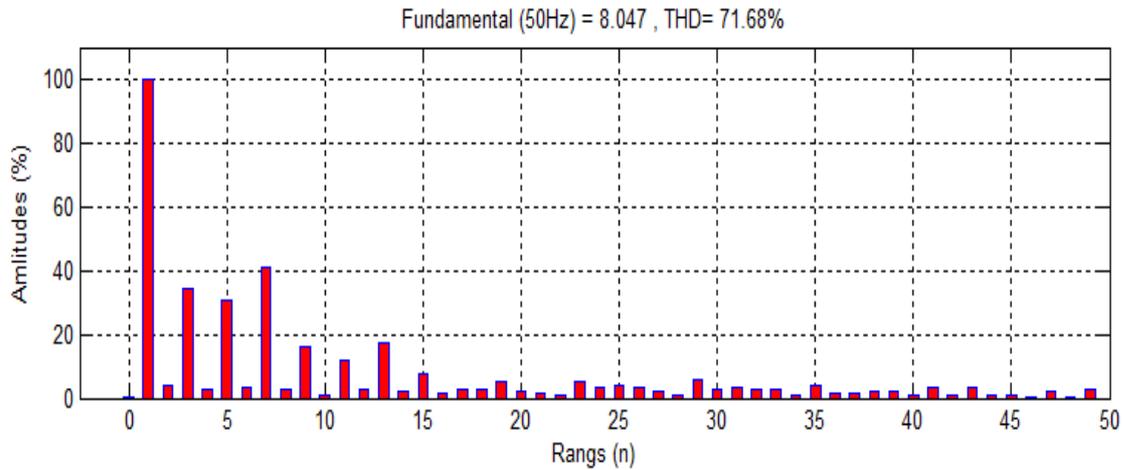


Fig IV 3:Spectre harmonique du courant

La valeur maximale et efficace du courant fondamental est :

$$I_{1max} = 8,05 \text{ A}$$

$$I_{1rms} = 5,7 \text{ A}$$

Le taux de distorsion harmonique total est :

$$THDi = 71,68 \%$$

Une valeur de $THDi$ supérieure à 50 % révèle une pollution harmonique importante. Des dysfonctionnements sont probables. Une analyse approfondie et la mise en place de dispositifs d'atténuation sont nécessaires.

IV.4. Etude des remèdes [35]

Les relevés précédents mettent en évidence que le taux de distorsion en courant, à l'entrée de la charge polluante, est trop important.

Il est donc nécessaire de réduire les courants harmoniques. Pour ce faire, quatre méthodes sont utilisées :

- ✓ Mettre une inductance supplémentaire à l'entrée du redresseur pour atténuer globalement l'amplitude des harmoniques.
- ✓ Utiliser un Filtre Passif accordé sur une fréquence particulière.
- ✓ Utiliser un Filtre Actif capable de balayer tout le spectre harmonique.
- ✓ Utiliser un Filtre Hybride pour optimiser le filtrage.

IV.4.1. Inductance de lissage

Cette disposition est utilisée en particulier pour les redresseurs avec condensateurs en tête. L'utilisation d'inductances de ligne en amont des variateurs de vitesse a des effets suivants :

- ✓ Réduction des harmoniques de courant et donc de la valeur efficace du courant demandé au réseau.
- ✓ Augmentation du facteur de puissance FP sans introduire de déphasage $\cos \varphi$ reste constant.
- ✓ Diminution du facteur de crête.

La valeur de la self est définie pour une chute de tension comprise entre 3 et 5% de la tension nominale du réseau.

Calcul de la valeur de self

Chute de tension : ΔU totale admissible pour maintenir le couple moteur $\leq 3\%$ de $219V$ $\Delta U \leq 6,57V$

$$L = \frac{\Delta U}{\omega \cdot I_{h1}} = \frac{6,57}{2 \times \pi \times 50 \times 5,7} = 3,7 \text{ mH}$$

Choix de l'inductance : 3,7mH, 5,7A

IV.4.2. Dimensionnement du filtre passif

La branche parallèle du filtre constituée d'un condensateur C_p en série avec une impédance L_p à une impédance complexe $Z_p = r + j(L\omega - \frac{1}{C\omega})$.

Calcul de S_n de la charge

$$\begin{aligned} S_n &= U_1 \cdot I_1 \\ S_n &= 219 \times 5,7 \\ S_n &= 1248,3 \text{ VA} \end{aligned}$$

1) Calcul de Q_c :

Hypothèse de travail :

$(Q_c/S_n) < 15\%$ En présence des condensateurs de compensation d'énergie réactive:

$(Q_c/S_n) < 30\%$ En absence des condensateurs de compensation d'énergie réactive

$$(Q_c/S_n) < 30\% \text{ donc } Q_c = \frac{30}{100} \times 1248,3$$

$$Q_c = 374,49 \text{ VAR}$$

2) Calcul de C :

$$Q = U^2 \cdot C \cdot \omega$$

$$D'où C = \frac{Q}{U^2 \cdot \omega} = \frac{374.49}{219^2 \times 2 \times \pi \times 50} = 24,86 \mu F$$

3) Calcule de la tension de dimensionnement U_d du condensateur C :

$$U_d = U \frac{n^2}{n^2 - 1} + U_{h3} + U_{h5}$$

Le terme $\frac{n^2}{n^2 - 1}$ permet de tenir compte de la surtension de la self sur la circulation des courants harmoniques.

Dans notre cas on prendra $n=3$ car le filtre de rang 3.

$$\text{Donc } \frac{n^2}{n^2 - 1} = \frac{3^2}{3^2 - 1} = 1,125$$

a) Calcul de U_{h3} :

$$U_{h3} = \frac{I_{h3}}{C \omega} = \frac{1.85}{24,86 \times 10^{-6} \times 2 \times \pi \times 150} = 79 V$$

b) Calcul de U_{h5} :

Par hypothèse nous fixerons une valeur de 30% de circulation I_{h5} dans le filtre. Par contre I_{h7} reste négligeable.

$$U_{h5} = \frac{I_{h5}}{C \omega} = \frac{1,69 \times 0,3}{24,86 \times 10^{-6} \times 2 \times \pi \times 250} = 12,98 V$$

c) Calcul de U_d :

$$U_d = (219 \times 1,125) + 79 + 43,29 = 338,35 V$$

4) Calcul de dimensionnement en courant de la capacité C :

$$I_{eff} = \sqrt{I_{ch1}^2 + I_{ch3}^2 + I_{ch5}^2} \text{ (Dans la capacité)}$$

$$I_{ch1} = U1 \cdot C \cdot \omega_1 = 219 \times 24,86 \times 10^{-6} \times 2 \times \pi \times 50 = 1,7 A$$

$$I_{ch3} = U3 \cdot C \cdot \omega_3 = 79 \times 24,86 \times 10^{-6} \times 2 \times \pi \times 150 = 1,85 A$$

$$I_{ch5} = U5 \cdot C \cdot \omega_5 = 12,98 \times 24,86 \times 10^{-6} \times 2 \times \pi \times 250 = 1,68 A$$

$$I_{eff} = \sqrt{1,7^2 + 1,85^2 + 1,68^2} = 3,02 A$$

❖ Choix de condensateur C dans le filtre passif (pour les rangs 3, 5 et 7).

24,6 μF

5) Calcul de la self L dans filtres passifs :

a) $L \cdot C \cdot \omega_3^2 = 1 \text{ \AA}$ l'accord au rang 3 à 150Hz.

$$L = \frac{1}{C \cdot \omega_3^2}$$

$$L = \frac{1}{24,86 \times 10^{-6} (2 \times \pi \times 150)^2} = 45,33 \text{ mH}$$

b) $LC\omega_5^2 = 1$ à l'accord au rang 5 à 250 Hz.

$$L = \frac{1}{C \cdot \omega_5^2}$$

$$L = \frac{1}{24,86 \times 10^{-6} (2 \times \pi \times 250)^2} = 16,30 \text{ mH}$$

c) $L \cdot C \cdot \omega_7^2 = 1$ à l'accord au rang 7 à 350 Hz.

$$L = \frac{1}{C \cdot \omega_7^2}$$

$$L = \frac{1}{24,86 \times 10^{-6} (2 \times \pi \times 350)^2} = 8,32 \text{ mH}$$

❖ Choix des inductances :

Pour n=3.

$$L = 45,33 \text{ mH}$$

Pour n=5.

$$L = 16,30 \text{ mH}$$

Pour n=7.

$$L = 8,32 \text{ mH}$$

Diminution de taux distorsion harmonique

$$THDi = 71,68 \%$$

Le taux de distorsion harmonique individuelle H_n et donné sur le (tableau IV.1) suivant :

K	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
H_n	100	4,04	34,32	2,97	30,85	3,07	41,13	2,64	16,27	1,15	12	2,86	17,11	2,02
K	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
H_n	7,66	1,6	3,03	2,86	4,89	2,02	1,27	0,96	5,08	3,18	3,97	3,55	2,3	0,89
K	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
H_n	6,03	2,59	3,56	2,95	2,43	0,83	3,66	1,47	1,62	2,16	2,13	0,71	3,51	0,74
K	43	44	45	46	47	48	49							

H_n	3,16	1	0,99	0,52	1,92	0,44	2,79							
-------	------	---	------	------	------	------	------	--	--	--	--	--	--	--

Tab IV.2: Le taux de distorsion harmoniques individuelles H_n

La loi générale pour éliminer les courants harmoniques.

$$THDi = 100 \times \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{effn}^2 - I_{effk}^2}}{I_{1eff}}, (k=3, 5 \text{ et } 7)$$

$$\sum_{n=2}^{n=49} I_{effn}^2 = 16,69 \text{ A}$$

✓ Si on veut éliminer I_{h3} on trouve le taux de distorsion harmonique égale a :

$$THDi = 100 \times \frac{\sqrt{(16,69 - 3,83)}}{5,7} = 62,91 \%$$

$$THDi = 62,91 \%$$

✓ Cas élimination I_{h3} et I_{h5} le $THDi$ sera :

$$THDi = 100 \times \frac{\sqrt{(16,69 - 3,83 - 3,09)}}{5,7} = 53,83 \%$$

$$THDi = 53,83 \%$$

Malgré on a éliminé courants harmoniques de rang 3 et 5 le $THDi$ reste important.

✓ Cas élimination I_{h3} , I_{h5} et I_{h7} le $THDi$ sera :

$$THDi = 100 \times \frac{\sqrt{(16,69 - 3,83 - 3,09 - 5,5)}}{5,7} = 36,25 \%$$

$$THDi = 36,25 \%$$

Une valeur de $THDi$ comprise entre 10 et 50 % révèle une pollution harmonique significative. Il y a risque d'échauffements, ce qui implique le surdimensionnement des câbles et des sources qui va provoquer dysfonctionnement des appareils de protection.

IV.4.3. Dimensionnement du filtre actif

L'objectif est d'annuler au point de raccordement les harmoniques du courant, par injection d'un courant «complémentaire».

Sous réserve que le dispositif soit apte à injecter à tout instant un courant dont chaque composante harmonique est de même amplitude que celle du courant dans la charge, et de

phase opposée, alors la loi de sommation des courants garantit que le courant fourni par la source est purement sinusoïdal.

L'association «charges perturbatrices + compensateur actif» constitue une charge linéaire.

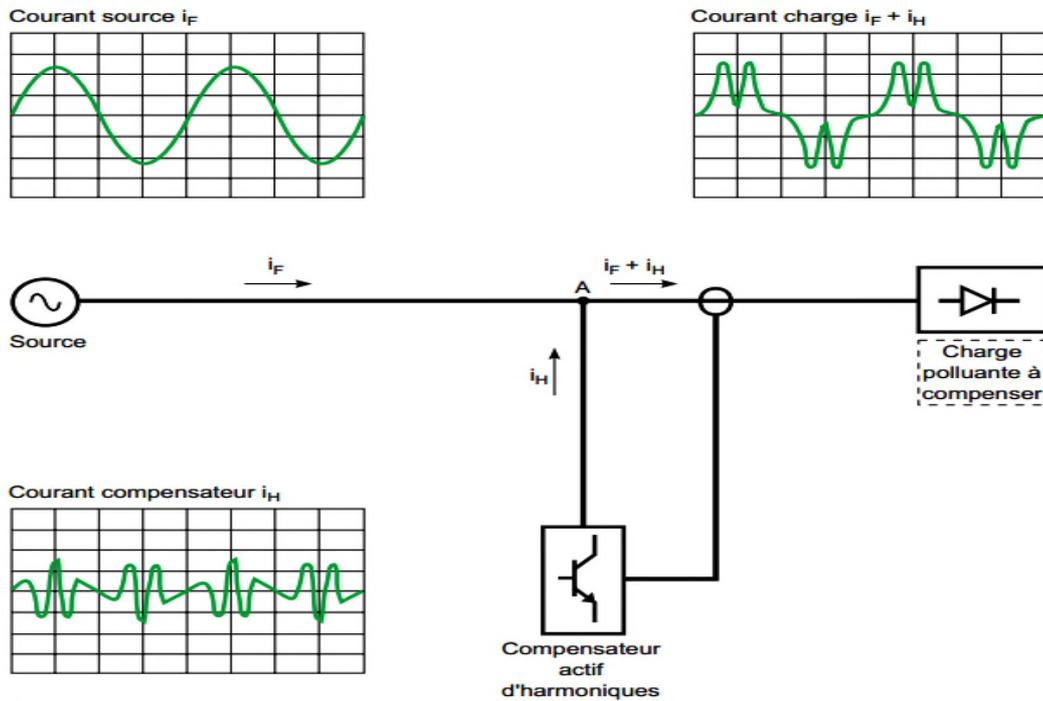


Fig 4 : compensateur actif d'harmoniques

Cetypededispositif est particulièrement bien adapté à la dépollution des réseaux BT, et ce quel que soit le point de raccordement choisi et le type de charge (car ce dispositif est auto adaptatif).

Le compensateur actif «shunt» constitue d'une source de courant indépendante de l'impédance réseau, et qui présente les caractéristiques intrinsèques suivantes :

- ✓ Sa bande passante est suffisante pour garantir la suppression des composantes harmoniques majoritaires du courant de la charge. Typiquement, nous considérons que la plage $H_2 - H_{25}$ est satisfaisante ; car plus le rang est élevé, plus le niveau de l'harmonique est faible.
- ✓ Son temps de réponse est tel que la compensation harmonique soit effective non seulement en régime établi, mais encore en régime transitoire «lent» (quelques dizaines de ms).
- ✓ Sa puissance permet d'atteindre les objectifs de dépollution fixés, ce qui ne signifie pas nécessairement la compensation totale et permanente des harmoniques générés par les charges. Sous réserve que ces trois objectifs soient simultanément atteints, alors le compensateur actif «shunt» constitue un excellent dépollueur, car auto

adaptatif, et ne présente aucun risque d'interaction avec l'impédance réseau.

IV.4.3.1. Calcul le THDi filtre actif

$$THDi = 100 \times \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{49} I_{effn}^2 - \sum_{n=2}^{25} I_{eff}^2}}{I_{1eff}}$$

$$\sum_{n=2}^{49} I_{effn}^2 = 16,69 A$$

$$THDi = 100 \times \frac{\sqrt{16,69 - 14,73}}{5,7} = 24,56 \%$$

$$THDi = 100 \times \frac{\sqrt{16,69 - 16,55}}{5,7} = 6,56 \%$$

Des dysfonctionnements sont observés pour taux harmoniques supérieur à 8%. [19]

IV.4.4. Filtre hybride

Le filtre passif élimine les rangs faibles de fortes amplitudes et évite la saturation de du filtre actif qui peut se consacrer au rang élevés de plus faible amplitudes.

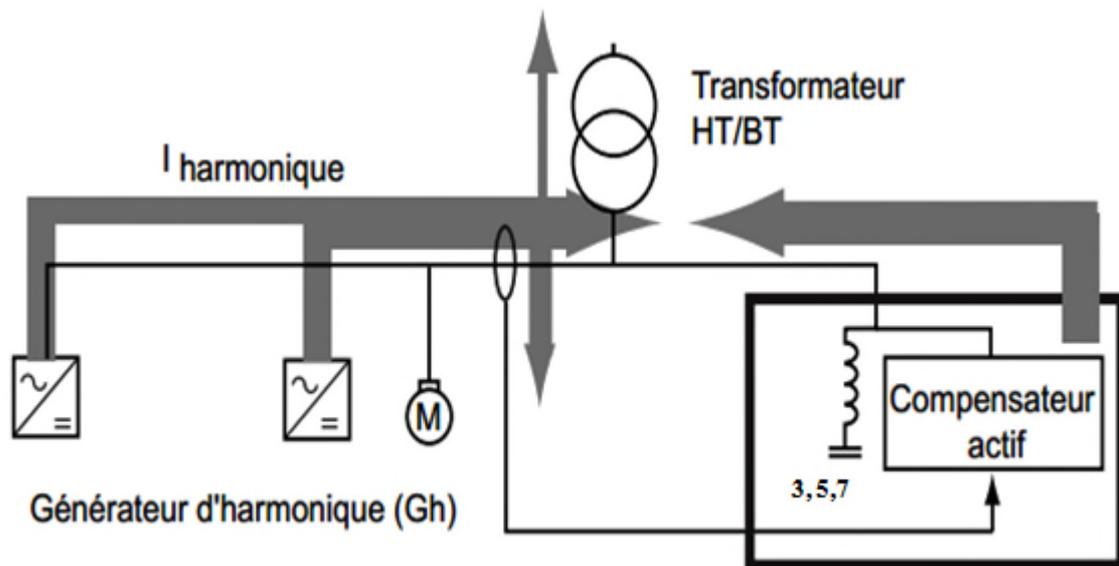


Fig 5 :compensation hybride

Dans ce cas le filtre actif paramétré pour balayer le spectre harmonique >7.

Les rangs 3, 5 et 7 seront absorbés par le filtre passif.

Remarque :

Les filtres actifs industriels travaillent jusqu'au rang 25 environ.

$$THDi = 100 \times \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{49} I_{effn}^2 - \sum_{n=3}^{25} I_{eff}^2}}{I_{1eff}}$$

$$\sum_{n=2}^{n=49} I_{effn}^2 = 16,69 A$$

$$THDi = 100 \times \frac{\sqrt{16,69 - 16,49}}{5,7} = 7,7 \%$$

IV.5. Etude technico-économique

Suite à cette étude des remèdes, il convient de faire une synthèse sur le bien fondé de leur application respective. Pour cela nous proposons un argumentaire technico-économique progressif en commençant par la solution de base.

Remèdes	Efficacité de filtrage	Incidence économique sur l'installation	Coût du remède *
Inductance de ligne seule.	Affaiblissement de tout spectre car self non accordée, aucune suppression de rang harmonique.	En fonction de leur efficacité les incidences sur l'installation sont les réductions suivantes : - réduction du IRMS dans les câbles et dans l'installation.	A
Filtre passif, shunt accordé, cellule avec protection.	Accord de la branche série self + condensateur sur un rang riche en harmonique, suppression totale du rang d'accord.	- réduction des sections de câble ph+neutre. - réduction du THD. -réduction du coût de l'installation.	B
Compensateur actif dimensionné pour la puissance totale.	Suppression de tout un spectre d'harmonique (2 à 25 environ).	- Donc amélioration globale du bon fonctionnement de l'installation (continuité des services).	C

<p>Filtrage hybride, association filtre passif compensateur actif.</p>	<p>Solution très efficace, suppression de tous les spectres :</p> <ul style="list-style-type: none"> - rangs bas = filtrage passif. - rangs élevés = filtrage actif. <p>Le système permet d'optimiser la puissance du filtre actif.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Respect des normes (surtout le spectre). - Solution bien adaptée à un filtrage réseau. - Compensation d'énergie réactive. 	<p style="text-align: center;">D</p>
---	---	---	--------------------------------------

A : -cher,

C : +cher

B et D : Coût économiquement moyen

Solution

Suit à l'analyse technico-économique, le filtre actif est souple d'emploi, auto-adaptatif et qui ne nécessite pratiquement pas d'études préalables à la mise en service, et qui répond aux besoins de notre installation à CEVITAL.

IV.6. Conclusion

Aux progrès des semi-conducteurs, les convertisseurs, qui sont habituellement des pollueurs harmoniques, sont capables d'être des dépollueurs efficaces et auto-adaptatifs du fait de la profusion des charges non-linéaires, la distorsion harmonique des réseaux est un phénomène dont l'amplitude est croissante.

La solution la plus couramment mise en œuvre jusqu'à ce jour a été le filtrage passif. A cette solution lourde et non exempte de risque, il est aujourd'hui proposé une alternative fort séduisante : l'utilisation des filtres actifs. Ces dispositifs utilisent une structure de type convertisseur statique de puissance.

V.1. Introduction

Toute installation électrique a des limites de fonctionnement. Dépasser ces limites conduit, à plus ou moins long terme, à sa destruction mais aussi à celle des mécanismes qu'elle anime, avec pour conséquence immédiate des arrêts et des pertes d'exploitation. Il est donc nécessaire de faire un bon choix et un bon dimensionnement de l'appareillage électrique assurant la commande, le contrôle et ses protections. Ces protections sont assurées par des appareils spécifiques tels que des fusibles, disjoncteurs, relais de surcharge et les Dispositifs Différentiels Résiduels (DDR).

Les (DDR) sont aujourd'hui reconnus dans le monde entier comme le moyen le plus efficace pour assurer la protection des personnes et des biens contre les risques électriques en basse tension.

V.2. Les éléments de protection cas d'une installation (NOVA) à CEVITAL

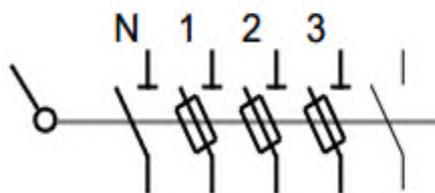
V.2.1. Protections en amont des variateurs

V.2.1.1. Sectionneur [37]

Son rôle est de mettre hors tension une installation électrique. On ne doit jamais actionner un sectionneur en charge.

Fonctionnalités supplémentaires :

- ✓ le sectionnement est visible, par observation des contacts ou du levier de commande.
- ✓ verrouillage possible par un cadenas en position ouvert pour consignation.
- ✓ un ou des contact(s) auxiliaire(s) permet de couper le circuit de commande qui est associé au circuit principal d'un équipement.



FigV.1 :Sectionneur porte-fusible

V.2.1.2. Disjoncteur magnétothermique

Le disjoncteur magnétothermique assure la protection d'une installation contre les surcharges et les courts-circuits.

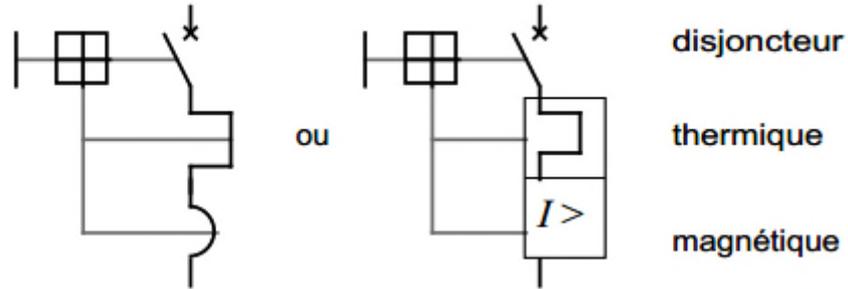


Fig V.2 :Disjoncteur magnétothermique

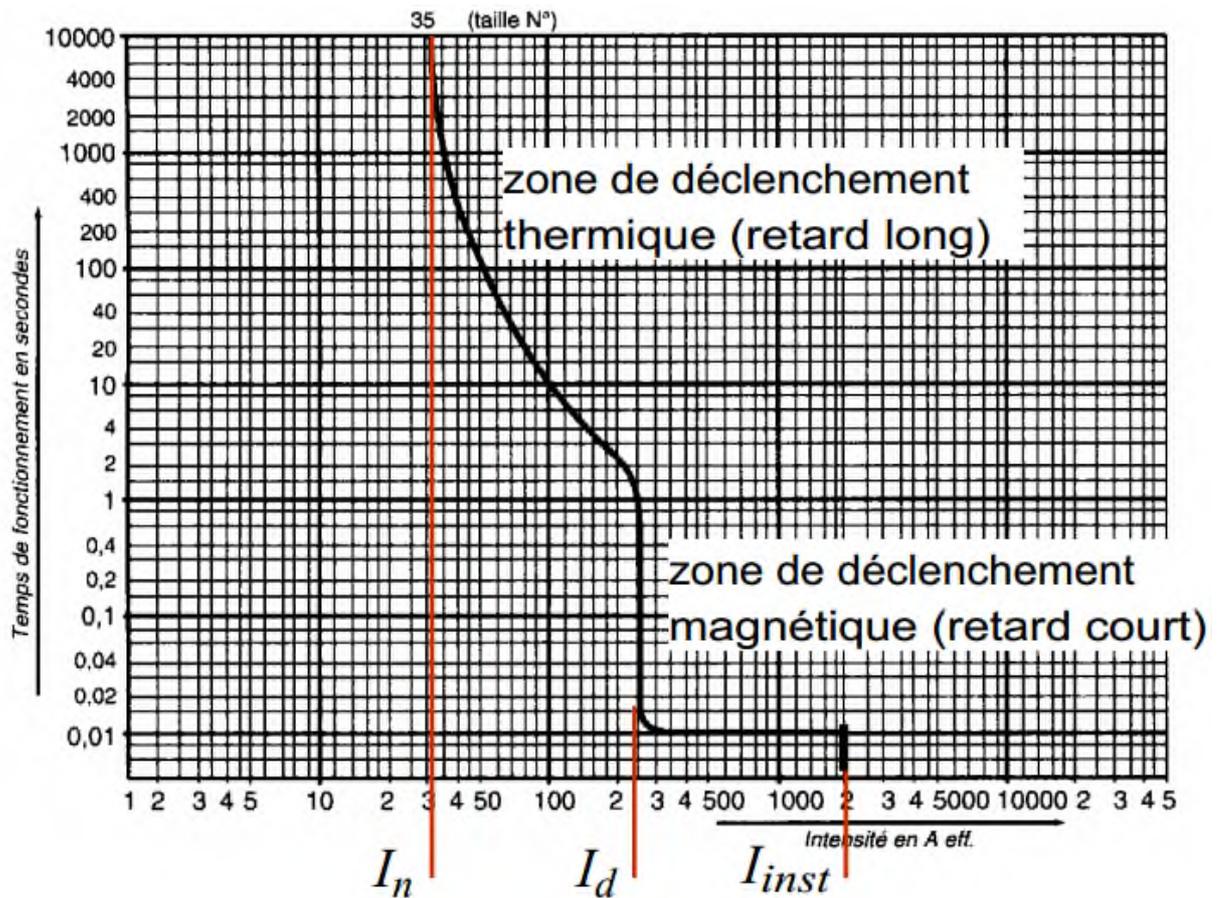


Fig V.3 :Courbe de déclenchement

Caractéristique :

- ✓ Calibre I_n :courant nominal ou courant assigné d'emploi
- ✓ Courant de réglage I_r :réglage du déclenchement thermique : typiquement, $0,1I_n \leq I_r \leq I_n$
- ✓ Courant de déclenchement magnétique I_d : en général, $I_d \approx 10$ à $20I_n$.
- ✓ Courant de déclenchement instantané I_{inst} : n'existe que sur les disjoncteurs électroniques.

V.2.2. Protections intégrées aux variateurs [12] [38]

V.2.2.1. Protection de surcharge moteur

Les variateurs modernes assurent la protection du moteur contre les surcharges.

V.2.2.2. Protection contre les courts-circuits moteurs ou ligne en aval du variateur

En cas de court-circuit entre phases en sortie de variateur (aux bornes du moteur ou à un endroit quelconque de la ligne entre le variateur et le moteur), la surintensité est détectée au sein du variateur et un ordre de blocage est envoyé très rapidement aux *GTO*. Le courant de court-circuit (figure V.4) est interrompu en quelques microsecondes, ce qui assure la protection du variateur. Ce courant très bref est essentiellement fourni par le condensateur de filtrage associé au redresseur, et est donc indiscernable dans la ligne d'alimentation.

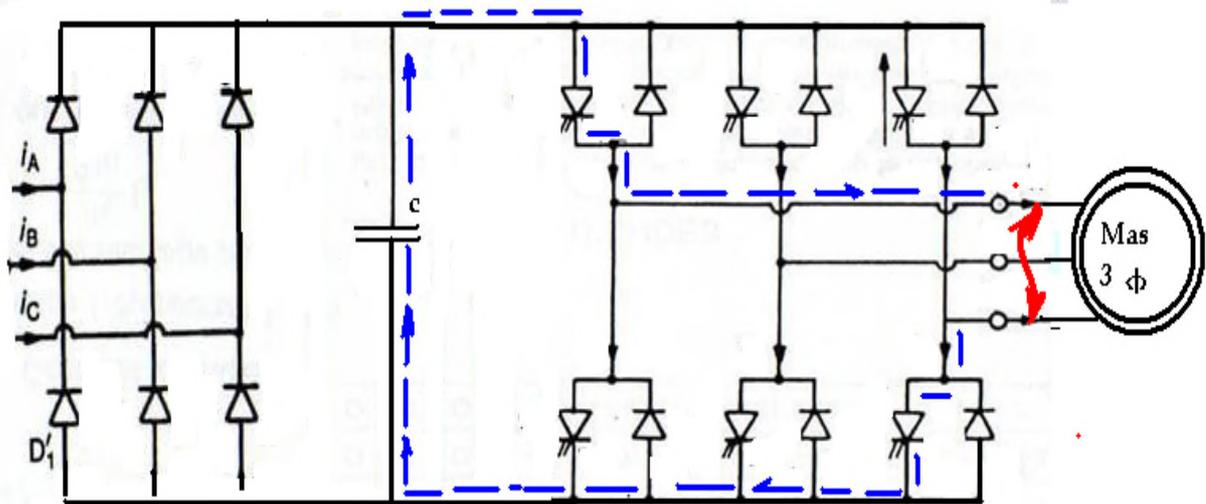


Fig V.4 :Court-circuit en aval du variateur

V.2.2.3. fonctions d'autoprotection des variateurs

Les variateurs disposent d'autres fonctions d'autoprotection contre :

- ✓ les surchauffes de leurs composants électroniques pouvant entraîner leur destruction. Un capteur placé sur le dissipateur thermique provoque l'arrêt du variateur, lorsque la température dépasse un certain seuil.
- ✓ les creux de tension du réseau : cette protection est nécessaire pour éviter tout dysfonctionnement des circuits de contrôle et du moteur, ainsi que toute surintensité dangereuse lorsque la tension réseau reprend sa valeur normale.
- ✓ les surtensions à fréquence industrielle du réseau : il s'agit d'éviter les destructions éventuelles de leurs composants.
- ✓ la coupure d'une phase (pour les variateurs triphasés) : car l'alimentation en monophasé qui se substitue à l'alimentation en triphasé provoque une augmentation du courant absorbé.

V.2.2.4. Action des protections intégrées

Elles provoquent toutes, en cas de défaut, le verrouillage du variateur et l'arrêt du moteur en « roue libre ». La coupure de l'alimentation est alors assurée par le contacteur de ligne dont l'ouverture est commandée par un relais intégré au variateur.

V.2.2.5. Protection des composantes

V.2.2.5.1. Protection des diodes [39]

- ✓ Protection contre les courts-circuits :

On doit installer des fusibles rapides contre ces défauts (les courts-circuits).

On choisit le fusible de telle sorte : $I^2 \cdot t_{\text{fusible}} < I^2 \cdot t_{\text{semi-conducteur}}$.

- ✓ Protection thermique :

L'échauffement d'un semi-conducteur est limité par un radiateur sur lequel il est monté.

V.2.2.5.2. Protection des thyristors

- ✓ Contre les surintensités :

Au début de l'amorçage du thyristor, seule une partie de la jonction est conductrice, et si la vitesse de croissance du courant principale est très importante, cela peut entraîner des densités de courants destructives.

Pour limiter ce phénomène, on utilise des petites inductances en série avec le thyristor.

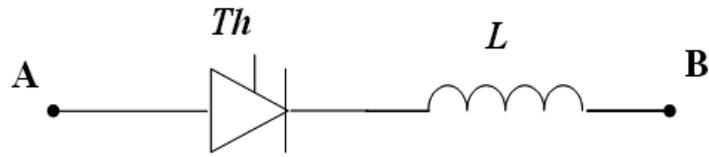


Fig. V.5: Protection contre les $\frac{di}{dt}$

✓ Contre les variations brusques de tensions :

Un amorçage intempestif du thyristor (sans signal de gâchette). Pour neutraliser ce phénomène, on utilise le circuit suivant.

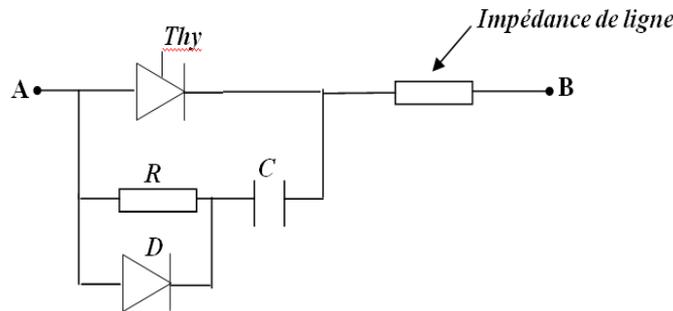


Fig V.6 : Protection contre les $\frac{dU}{dt}$

En cas de variation rapide de la tension entre *A* et *B*, le condensateur se charge à travers *D* et l'impédance de la ligne. Donc la tension V_{AK} évolue plus lentement (comme au bornes du condensateur), la résistance *R* intervient lors de l'amorçage commandé et limite le courant de décharge du condensateur dans le thyristor ($\frac{di}{dt}$). Ce circuit présente aussi l'avantage d'un amorçage plus facile du thyristor, la décharge du condensateur permet un établissement plus rapide du courant d'accrochage.

V.2.3. Les dispositifs différentiels résiduels (DDR) [2]

V.2.3.1. Principe

Le principe du DDR est illustré sur la (figure V.7) La détection de la somme algébrique des courants dans les conducteurs actifs (phases et neutre) est effectuée par un capteur constitué d'un tore qui entoure tous les conducteurs actifs. Un bobinage est réalisé au tour du tore de manière à détecter les variations de flux induites par le courant différentiel résiduel.

En cas de défaut d'isolement, cette somme n'est plus nulle et le courant de défaut induit dans le tore un flux qui génère un courant dans sa bobine.

Ce courant est redressé, filtré et amplifié. Si le signal obtenu est supérieur à un certain seuil, une temporisation est lancée (elle peut être nulle pour une réaction instantanée).

Si le défaut est toujours présent à la fin de la temporisation, l'ouverture d'un dispositif de commande est déclenchée.

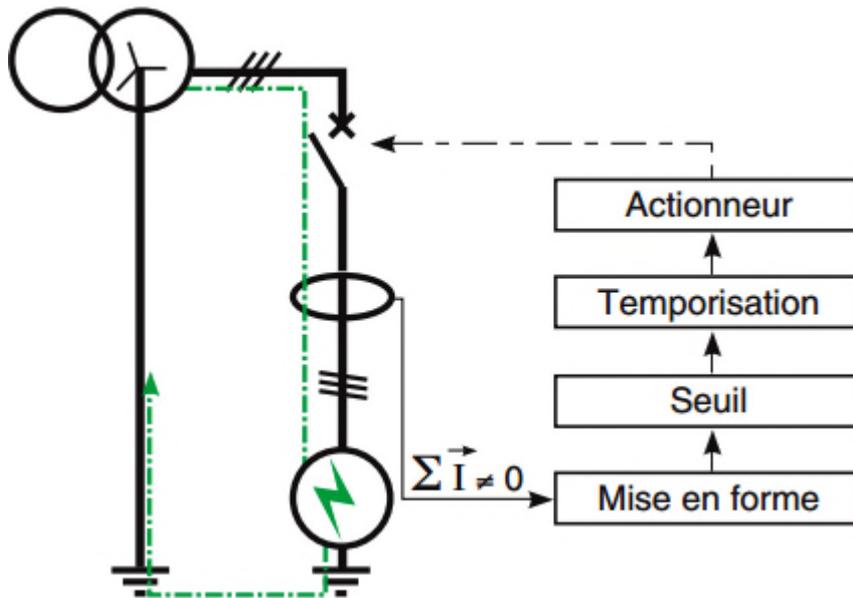


Fig V.7 :Principe du DDR

V.2.3.2. Emplacement de la DDR [38]

Le minimum obligatoire pour un régime TT est un dispositif de coupure différentiel (DDR) en tête de l'installation, si toutes les masses d'utilisation sont interconnectées et reliées par un même conducteur de protecteur de protection à la même prise de terre.

On ne dispose qu'un disjoncteur différentiel en tête de l'installation, s'expose à ce qu'un défaut sur le départ 3, par exemple, provoque le fonctionnement général. Les autres circuits (1,2 et 4) ne sont plus alimentés.

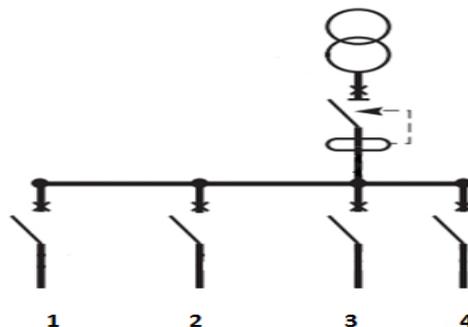


Fig V.8 :Emplacement des DDR

Pour améliorer la continuité de service, on doit disposer plusieurs DDR en appliquant les règles de la sélectivité horizontale ou verticale, et donc seul la partie en défaut qui sera coupée.

V.2.3.2.1. Sélectivité différentielle horizontale

Dans ce cas, on ne place pas le DDR en tête de l'installation. On dispose un différentiel sur chaque départ. Le disjoncteur général A et les différentiels B, C seront placés sur un même tableau.

Avec cette sélectivité, un défaut d'isolement dans le circuit 3 est éliminé par le différentiel, par contre le circuit 2 reste alimenté.

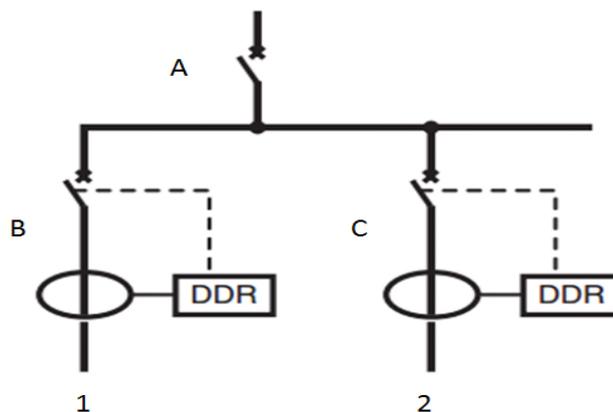


Fig V.9 :Sélectivité horizontale

V.2.3.2.2. Sélectivité différentielle verticale

Dans la sélectivité verticale, les DDR sont placés à différents niveaux de l'installation. En cas de défaut d'isolement, seul le DDR protégeant le départ correspondant fonctionne sous réserve que les règles de sélectivité verticale soient respectées.

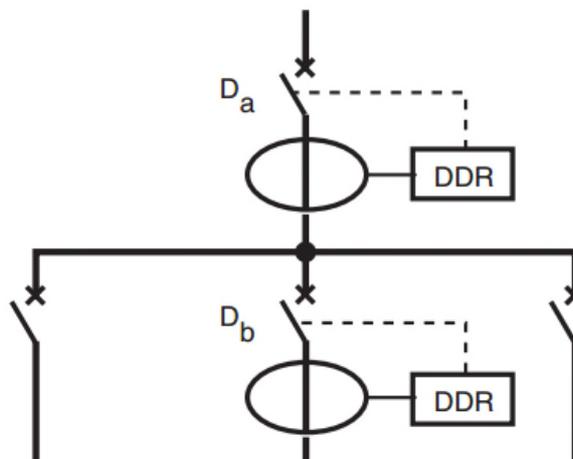


Fig V.10 :Sélectivité verticale

Règle :

✓ le courant nominal de fonctionnement $I\Delta n$ du DDR placé en amont doit être au moins égal au double de celui placé en aval.

✓ D'autre part, le rapport entre le temps limite de non déclenchement du DDR placé en amont et la temporisation du DDR placé en aval doit être au moins égale à 1,2.

La sélectivité verticale doit satisfaire simultanément à ces deux conditions et on emploiera pour protéger les circuits terminaux (par exemple ici D_b) que le D_a non retardés.

V.2.3.3. Applications [2]

V.2.3.3.1. Protection complémentaire contre les contacts directs

Un DDR a la possibilité de détecter de faibles courants de fuite, susceptibles de traverser le corps d'une personne.

V.2.3.3.2. Protection contre les contacts indirects

L'utilisation d'un DDR est la seule solution pour assurer la protection contre les contacts indirects en TT, car le courant de défaut dangereux est trop faible pour être détecté par les dispositifs de protections de surintensité.

C'est également une solution de simplicité en TN-S ou IT. Par exemple, lorsque le câble d'alimentation est de grande longueur, la faible valeur du courant de défaut rend difficile le réglage des protections de surintensité.

Dans ces conditions, le seuil de déclenchement du DDR sera ajusté à un seuil déterminé.

V.2.3.3.3. Protection contre les risques d'incendie

La norme CEI 60364-4-42 reconnaît également l'efficacité des DDR pour assurer la protection contre les risques d'incendie, en imposant l'utilisation de tels dispositifs avec un seuil de déclenchement 300 mA ou 500 mA.

Le tableau suivant récapitule l'ensemble des obligations de DDR définies dans la norme NFC 15-100.

Application NF C 15-100	Mesures de protection		
	TT	TN	IT
Dispositions générales	DDR : $I_{\Delta n} \leq \frac{U_L}{R_A}$	Déclencheurs magnétothermiques	CPI 1 ^{er} défaut : signalisation 2 ^e défaut : déclenchement magnétothermique
Dispositions particulières : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Grandes longueurs de câbles 		3 solutions : <ul style="list-style-type: none"> - Augmenter section des câbles. - Magnétique bas - DDR 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Masses non interconnectées 		DDR	DDR
Locaux à risque d'incendie	DDR ≤ 300mA A	TN-S DDR ≤ 300mA	CPI ou DDR ≤ 300mA
Site classés avec risque d'explosion Arrêté du 29.07.98 : silos et stockage dégageant des poussières organiques inflammables	DDR avec préalarme		CPI ou DDR avec préalarme
Protections complémentaires contre les contacts directs : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Prises ≤ 32A ▪ Prises de tous calibre dans les locaux humides et installations temporaires. ▪ Salle d'eau 	DDR 30mA		

Tab V.1 : Obligations de protection par DDR (source NFC 15-100)

V.2.3.4. Perturbations électriques et conséquences sur les protections différentielles

V.2.3.4.1 Les harmoniques

De plus en plus de matériels électriques sont d'importants générateurs d'harmoniques qui entretiennent un niveau de perturbation non négligeable sur la composante courant.

A signaler notamment en milieu industriel : les convertisseurs statiques.

Les harmoniques générées sur le réseau remontent dans les câbles jusqu'aux tableaux de distribution et se retrouvent sur les départs protégés par différentiels.

D'une façon générale, en fonctionnement normal, les protections différentielles sont peu perturbées par les harmoniques de courant qui sont des perturbations de mode différentiel (la somme vectorielle des courants de phases et neutre est nulle).

Le DDR "si" comporte, de par son tore et son électronique, une meilleure tenue liée à un durcissement progressif sur les fréquences harmoniques.

Il permet donc de s'affranchir de ces perturbations. Il s'installe généralement en complément de solutions de filtrage sur un ou plusieurs rangs d'harmoniques.

Il est alors intéressant de réaliser ce filtrage au plus près de la source des perturbations afin d'éviter la remontée de ces signaux sur l'installation amont et de protéger le DDR. La mise en place d'un système filtre passif (rang 3 ou rang 5) + filtre actif (rangs 2 à 13) répond à ce besoin.

V.2.3.4.2. Les courants de fuite transitoires en haute fréquence

Le courant transitoire en haute fréquence est l'un des phénomènes les plus perturbants. Son origine est diverse :

- ✓ origine naturelle : le phénomène foudre sur les installations électrique
- ✓ origine industrielle : surtensions de manœuvres associées aux circuits capacitifs, étage d'entrées des variateurs de vitesse non munis de filtre CEM, alimentations à découpages.

V.3. Conclusion

Ce chapitre a pour objectif de mettre en évidence les principes de fonctionnement des protections différentielles et de proposer les principales solutions à mettre en œuvre pour assurer la sécurité des personnes tout en préservant la meilleure disponibilité de service. Une bonne stratégie est soutenue par une sélectivité bien établie.

Conclusion générale

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'actions curatives afin d'améliorer la qualité de l'énergie et particulièrement compenser la pollution harmonique, et ses influences sur le réseau électrique. Notre choix s'est porté sur le filtre actif comme dispositif de dépollution des harmoniques du courant issu d'une charge non linéaire, ces charges non linéaires à base de convertisseurs de puissances offrent de l'énergie sous plusieurs formes et sont de plus en plus utilisées dans l'industrie. On a étudié aussi l'influence des charges polluantes sur la protection industrielle.

Le premier chapitre a été consacré à la présentation de complexes CEVITAL et à l'étude de l'installation existante ; les moteurs asynchrones et variateurs de vitesse, nous avons détaillé la structure de conversion alternative-continue-alternative : redresseur pont de diodes, et onduleur.

À partir du deuxième chapitre de ce mémoire nous pouvons saisir l'importance de la problématique de la pollution harmonique, on a expliqué les perturbations harmoniques, leurs origines et leurs effets néfastes sur les matériels électriques.

Dans le troisième chapitre nous avons traité les différentes structures de filtres actifs les plus largement utilisés dans le monde industriel. De part ses avantages sur le filtre passif, le filtre actif constitue la voie par excellence pour, non seulement compenser les harmoniques, mais pour améliorer la qualité de l'énergie du réseau électrique.

À partir du quatrième chapitre on a fait une étude pratique plus approfondie sur les quatre topologies suivantes :

- ✓ Inductance de lissage
- ✓ Filtres passifs
- ✓ Filtre actif
- ✓ Filtres hybrides

Vers la fin on a présenté une étude technico-économique sur les quatre topologies et on a proposé le filtre actif comme meilleure solution).

Le cinquième chapitre consacré a expliqué le fonctionnement et leur applications de chaque élément de protections, aussi on a expliqué la protection intégrée aux variateurs on a basé sur les protections différentielles et leur sécurité a été proposée.

BIBLIOGRAPHIE



- [1] MOHAMED MUSTAFA ABDUSALAM, « Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales ». Thèse Doctorat Université Henri Poincaré, Nancy-I, 29/05/2008.
- [2] JACQUES SCHONEK, «Les protections différentielles en basse tension ». Cahier Technique Schneider Electric N° 114.
- [3] Documentation technique de CEVITAL.
- [4] FORNEL BERNARD, «Alimentation des machines asynchrones ». Technique de l'ingénieur D 3 620.
- [5] GAUCHERON E, «Les moteurs électriques ... pour mieux les piloter et les protéger ». Cahier Technique Schneider Electric N° 207.
- [6] PIERRE MAYE, «Moteurs électriques industriels ». Edition DUNOD, paris, 2005.
- [7] MERLIN.G, SOUARE.D, «Les techniques de commande du moteur asynchrone ».Le magazine Schneider de l'enseignement technologique et professionnel, 06/1998.
- [8] GUY SEGUIER, «Electronique de puissance : les fonctions de base et leurs principales applications », DUNOD, 7^{ième} Edition, Paris, 1999.
- [9] MAX MARTY et DANIEL DIXNEUF, «Principe d'électrotechnique : cours et exercices corrigés ». DUNOD, Paris, 2005.
- [10] «Réducteurs ». Catalogue SEW USOCOME, 06/1010.
- [11] «L'essentiel sur les variateurs de vitesse ».Danfoss Drive A/S, 1^{ière} Edition, 3^{ième} tirage, 1999.
- [12] SCHONEX.Jet NEBON.Y, «Protections BT et variateurs de vitesse (convertisseurs de fréquence) ». Cahier Technique Schneider Electric N° 204.
- [13] «Variateurs de vitesse Altivar 31 ». Schneider Electric, Catalogue,10/2003.
- [14] «Schéma Electrique NOVA ligne 4 CEVITAL ».Serac group, 04/02/2008.
- [15] «MOVIDRIVE MDX 60B/61B ».Catalogue SEW USOCOME, 06/2007.
- [16] SEYED-HAMID SHAHALAMI, «Filtrage hybride des perturbations harmoniques produites par des systèmes d'entraînement asynchrone à vitesse variable». Thèse Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 06/10/2001.

- [17] CHALAH SAMIRA, «Analyse stochastique de la résultante de l'injection de courants harmoniques dans un réseau électrique ». Mémoire de magister Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 17/05/2012.
- [18] ABDELMALEK BOULAHIA, «Etude des convertisseurs statiques destinés à la qualité de l'énergie électrique ». Mémoire magister Université de Constantine, 28/04/2009.
- [19] T.DEFLANDRE et MAURAS.P, «les harmoniques sur les réseaux électriques ».Edition Eyrolles 61Bd saint, Paris 5^e, 1998.
- [20] BEAULIEU.S, «Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmonique en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique ». Mémoire maîtrise en ingénierie Université du Québec à Chicoutimi, 05/2007.
- [21] MAXIME MOREAU, «Modélisation haute fréquence des convertisseurs d'énergie. Application à l'étude des émissions conduites vers le réseau ». Thèse Doctorat, Ecole Centrale de Lille, 07/12/2009.
- [22] «Guide de conception des réseaux électriques industriels », Cahier Technique Schneider Electric T&D 6 883 427/A.
- [24] SCHONEK.J, «Les singularités de l'harmonique 3 », Cahier Technique Schneider Electric N°202.
- [24] ANGELO BAGGINI et JAN DESMET, «Dimensionnement du conducteur de neutre dans les installations riches en harmoniques ». Guide Power Quality.
- [25] COLLOMBET.C,M.LUPIN.J et SCHONEK.J,«Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement ». Cahier Technique Schneider Electric N°152.
- [26] BETTEGA.E et FIORINA.J-N,«Harmoniques : convertisseurs propres et compensateurs actifs ». Cahier Technique Schneider Electric N°183.
- [27] BENCHIKH BACHIR, « Pollution harmonique, effets et remèdes ». Mémoire ingénieur Université Bejaia, 2006.
- [28] «Validation de techniques de commande d'un filtre actif parallèle ». Thèse Maitrise en Génie Electrique, Université du Québec, 17/09/2007.
- [29] DAVID CHAPMAN, «Harmoniques causes et effets ». Guide Power Quality.
- [30] RECHKA.S, «Etude de méthode de filtrage des harmoniques dans les réseaux électriques de distribution ». Mémoire de maître es science appliquées en génie électrique Université du Québec à Trois- Rivières, 04/2002.
- [31] CHAOUI.A, «Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires ». Thèse Doctorat, Université de Sétif, 05/10/2010.

- [32] ABDESLAM.D, «Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension». Thèse Doctorat Université e de Haute-Alsace, 08/12/ 2009.
- [33] BELHAOUCHET.N, «Fonctionnement à fréquence de commutation constante des convertisseurs de puissance en utilisant des techniques de commande avancées Application : Amélioration de la qualité de l'énergie». Thèse Doctorat Université Ferhat Abbas Sétif, 06/07/2011.
- [34] MOHAMAD ALAA EDDIN ALALI, «Contribution à l'étude des compensateurs actif des réseaux électriques basse tension». Thèse Doctorat Université Louis Pasteur – Strasbourg, 12/09/2002.
- [35] FOCH.H, FOREST.F, MEYNARD.T, «Onduleurs de tension : Structures. Principes. Applications» Techniques de l'ingénieur, traité Génie électrique D 3 176.
- [36] M.G.GAY et M.Y.PELLICIER, «HARMOCEM : TP ». Institut Schneider formation MDG9AD152, 05-99.
- [37] AUBER.R et REMOND.C, «Installation basse tension, choix et mise en œuvre des matériels », Technique de L'ingénieur D 4 820.
- [38] DENIS AVONS-BARIOT, THIERRY CRETON, BERNARD DESHIERE, LOUP GIRIER, SERGE GUILLAUDIN et BERNARD LACROIX, «La protection différentielle dans les installations électriques basse tension » Cahier Technique Schneider Electric. Juin 2001.
- [39] BENHASSINE.A et CHARIK.K, «Substitution d'un moteur triphasé à collecteur par un ensemble moteur asynchrone à cage-variateur de vitesse type ALTIVAR ». Mémoire ingénieur Université Boumerdes, 2007.

ANNEXE-1-

Départ-moteur pour variateur avec radiateur

Variateur de vitesse Référence	Puissance normalisée des moteurs 4 pôles 50/60 Hz (1)		Disjoncteur (2)		ICC ligne présumé maxi. kA	Contacteur (3) Référence de base à compléter par le repère de la tension (4)
	kW	HP	Référence	Calibre A		
Tension d'alimentation monophasée : 200...240 V						
ATV 31H018M2	0,18	0,25	GV2 L08	4	1	LC1 K0610
ATV 31H037M2	0,37	0,5	GV2 L10	6,3	1	LC1 K0610
ATV 31H055M2	0,55	0,75	GV2 L14	10	1	LC1 K0610
ATV 31H075M2	0,75	1	GV2 L14	10	1	LC1 K0610
ATV 31HU11M2	1,1	1,5	GV2 L16	14	1	LC1 K0610
ATV 31HU15M2	1,5	2	GV2 L20	18	1	LC1 K0610
ATV 31HU22M2	2,2	3	GV2 L22	25	1	LC1 D09
Tension d'alimentation triphasée : 200...240 V						
ATV 31H018M3X	0,18	0,25	GV2 L07	2,5	5	LC1 K0610
ATV 31H037M3X	0,37	0,5	GV2 L08	4	5	LC1 K0610
ATV 31H055M3X	0,55	0,75	GV2 L10	6,3	5	LC1 K0610
ATV 31H075M3X	0,75	1	GV2 L14	10	5	LC1 K0610
ATV 31HU11M3X	1,1	1,5	GV2 L14	10	5	LC1 K0610
ATV 31HU15M3X	1,5	2	GV2 L16	14	5	LC1 K0610
ATV 31HU22M3X	2,2	3	GV2 L20	18	5	LC1 K0610
ATV 31HU30M3X	3	–	GV2 L22	25	5	LC1 D09
ATV 31HU40M3X	4	5	GV2 L22	25	5	LC1 D09
ATV 31HU55M3X	5,5	7,5	NS80HMA	50	22	LC1 D32
ATV 31HU75M3X	7,5	10	NS80HMA	50	22	LC1 D32
ATV 31HD11M3X	11	15	NS80HMA	80	22	LC1 D40
ATV 31HD15M3X	15	20	NS100HMA	100	22	LC1 D40
Tension d'alimentation triphasée : 380...500 V						
ATV 31H037N4	0,37	0,5	GV2 L07	2,5	5	LC1 K0610
ATV 31H055N4	0,55	0,75	GV2 L08	4	5	LC1 K0610
ATV 31H075N4	0,75	1	GV2 L08	4	5	LC1 K0610
ATV 31HU11N4	1,1	1,5	GV2 L10	6,3	5	LC1 K0610
ATV 31HU15N4	1,5	2	GV2 L14	10	5	LC1 K0610
ATV 31HU22N4	2,2	3	GV2 L14	10	5	LC1 K0610
ATV 31HU30N4	3	–	GV2 L16	14	5	LC1 K0610
ATV 31HU40N4	4	5	GV2 L16	14	5	LC1 K0610
ATV 31HU55N4	5,5	7,5	GV2 L22	25	22	LC1 D09
ATV 31HU75N4	7,5	10	GV2 L32	32	22	LC1 D18
ATV 31HD11N4	11	15	NS80HMA	50	22	LC1 D32
ATV 31HD15N4	15	20	NS80HMA	50	22	LC1 D32

(1) Les valeurs exprimées en HP sont conformes au NEC (National Electrical Code).

(2) NS80HMA : produit commercialisé sous la marque Merlin Gerin.

(3) Composition des contacteurs

LC1-K06 : 3 pôles + 1 contact auxiliaire "F"

LC1-D09/D32/D40 : 3 pôles + 1 contact auxiliaire "F"

(4) Tensions du circuit de commande usuelles.

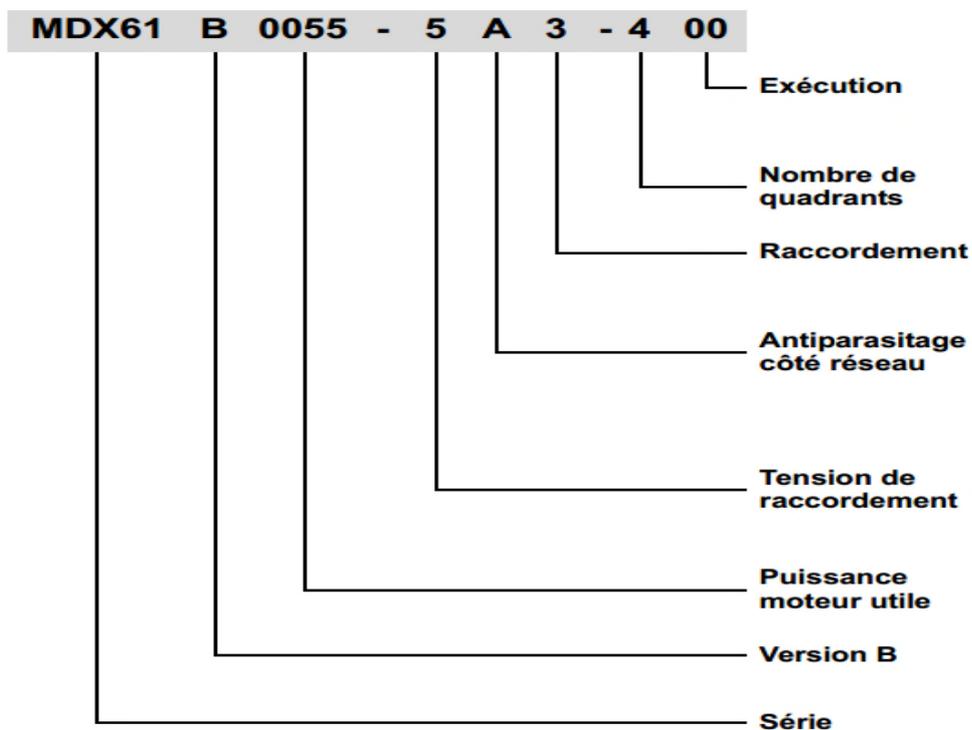
Circuit de commande en courant alternatif

	Volts ~	24	48	110	220	230	240
LC1-D	50 Hz	B5	E5	F5	M5	P5	U5
	60 Hz	B6	E6	F6	M6	–	U6
	50/60 Hz	B7	E7	F7	M7	P7	U7
	Volts ~	24	48	110	220/230	230	230/240
LC1-K	50/60 Hz	B7	E7	F7	M7	P7	U7

Autres tensions entre 24 et 660 V, ou circuit de commande en courant continu, consulter notre agence régionale.

ANNEXE-2-

Exemple de codification :



00= standard

4=4 Ω (avec frein-hacheur)

3= triphasé

B=niveau d'antiparasitage B

A=niveau d'antiparasitage A

0= pas d'antiparasitage

5=AC 380... 500 V

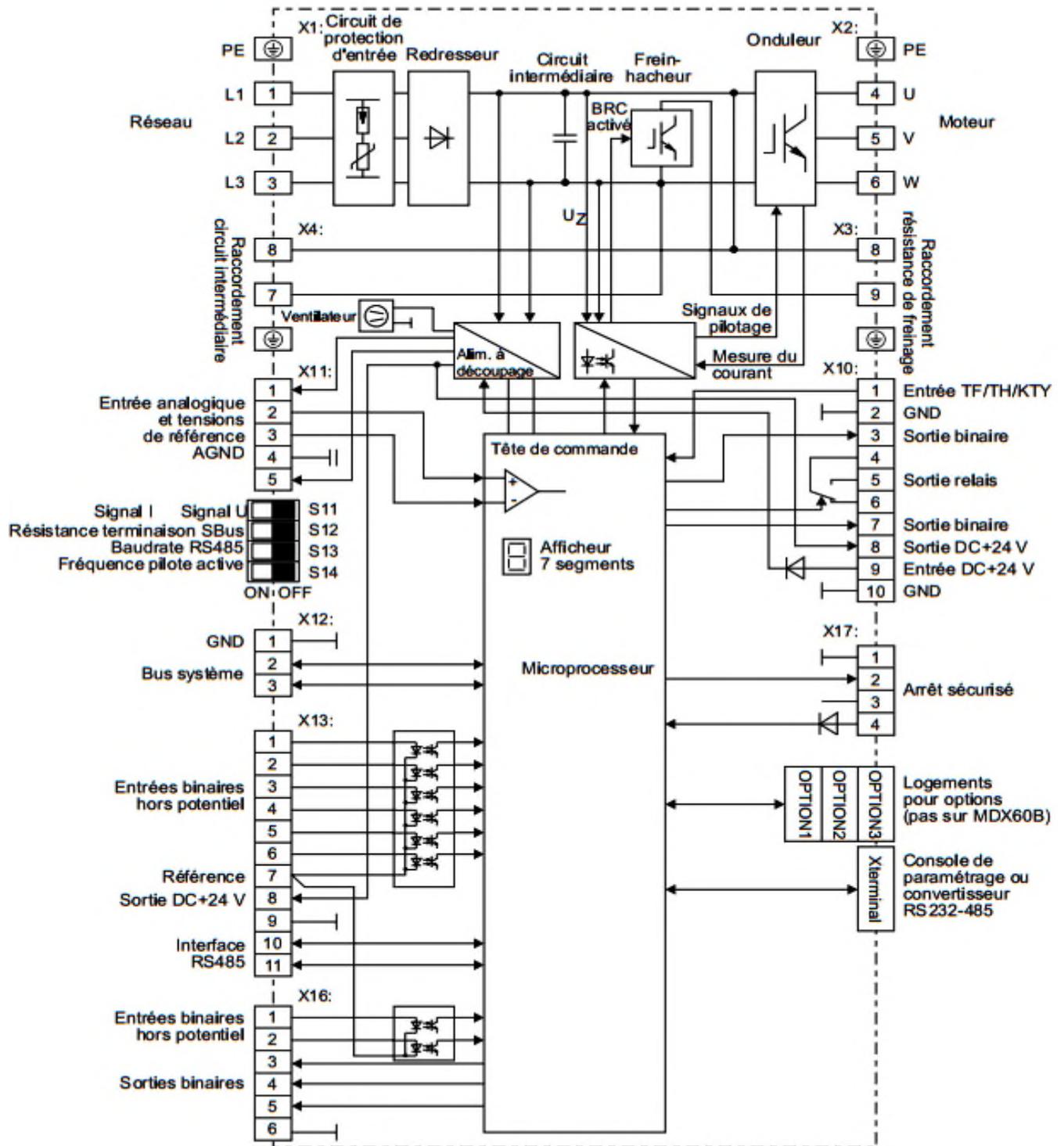
2=AC 200...240 V

0055=5,5 KW

60=aucune option possible

61= option possible

ANNEXE-3-



Le schéma synoptique ci-dessus montre la structure et le principe de fonctionnement des variateurs MOVIDRIVE MDX 61B.

Sommaire

Liste des figures

Notations et Abréviations

liste des tableaux

Introduction générale

Chapitre I

Chapitre II

Chapitre III

Chapitre IV

Chapitre V

Conclusion générale

Bibliographie

Annexes