REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR

DEPARTEMENT D'ÉLECTROTECHNIQUE

MEMOIRE de MAGISTER

Au sein de l'Ecole Doctorale

Option:

Réseaux électriques

Présenté par:

Mr. AMINALLAH MOHAMMED ABDERREZAK

Thème

Etude et analyse des harmoniques dans les liaisons de transport d'énergie à courant continu (CCHT)

Soutenue le 28 /06 / 2012

Membres du jury composé des messieurs:

F.Z.I.GHERBI	Professeure U.D.L. Sidi Bel Abbès	*Présidente*
S. HADJERI	Professeur U.D.L. Sidi Bel Abbès	*Encadreur*
A. TILMATINE	Professeur U.D.L. Sidi Bel Abbès	*Examinateur*
S.A. ZIDI	M.C.A. U.D.L. Sidi Bel Abbès	*Examinateur*
K. MEDLES	M.C.A. U.D.L. Sidi Bel Abbès	*Examinateur*

2011-2012

AVART PROPOS

REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer nos remerciements à Monsieur *SAMIR HADJERI* pour avoir accepté de nous encadrer, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail, pour nous avoir proposé un sujet si passionnant, pour avoir su nous guider dans notre travail, et pour nous avoir soutenu durant toute cette période.

Nous adressons nos chaleureux remerciements aux membres du jury de mon thèse :

- *Mme. GHERBI Fatima Zohra Imèn;*
- *Mr. TILMATINE Amar;*
- *Mr. ZIDI Sid Ahmed;*
- *Mr. MEDLES Karim.*

Nous tenons à les remercier tout particulièrement pour leur contribution à notre enseignement durant ces années de formation ; et pour nous avoir honoré en acceptant d'examiner notre travail.

Nous pensons également à tout le personnel : enseignants, étudiants et personnels administratifs.

Je tiens à remercier vivement tous ceux qui ont participé de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Pour terminer, je voudrais remercier tout particulièrement : *KEHAL BENAOUMEUR* pour les bons moments passés ensemble.

DEDICACES

Je dédie ce modeste thèse à :

- ***Mon père et à ma mère;***
- ***Mes frères;***
- ***Toute la famille;***
- ***Mes amis.***

Table des matières

Remerciement

Liste des figures

Notations

Introduction générale **01**

Chapitre I : Généralités sur les liaisons de transport à courant continu

I.1 Introduction 03

I.2 Historique 04

I.3 D'application de système CCHT 05

I.3.1 Transport sous-terrain et sous-marin 05

I.3.2 Transport sur de longues distances 05

I.3.3 Interconnexion asynchrone 06

I.3.4 Stabilité 06

I.4 Intérêts par rapport à une transmission CA 06

I.5 Comparaison entre système CA et CC 06

I.6 Types de systèmes de CCHT 07

I.6.1 Liaison monopolaire 07

I.6.2 Liaison bipolaire 08

I.6.3 Liaison homopolaire 08

I.7 Types de convertisseur 11

I.8 Les inconvénients du transport en CCHT 13

I.9 Conclusion 13

Chapitre II : Fonctionnement et modélisation les liaisons à courant continu

II.1 Introduction 14

II.2 Conception des stations de conversion 14

II.2.1 Schéma général 14

II.2.2 Unités de conversion 15

II.2.3 Valves à thyristors 16

II.2.4 Contrôle-commande des unités de conversion 17

II.2.5 Autres matériels 18

II.2.5.1 Transformateurs de conversion 18

II.2.5.2 Inductance de lissage 18

II.2.5.3 Filtres CA 18

II.2.5.4 Filtres CC 19

II.2.5.5 Bancs de capacités 19

II.2.5.6 Lignes aériennes 19

II.2.5.7 Câbles 19

II.2.5.8 Électrodes 20

II.2.5.9 Communication 20

II.3 Principe fondamental d'un système de transport à CC 20

II.4 Circuits de convertisseur 21

II.4.1 Analyse de montage en pont triphasé (double alternance) 22

II.4.2 Principe de fonctionnement en pont triphasé 24

II.4.2.1 Analyse sans empiètement 24

II.4.2.2 Analyse avec empiètement 32

II.5 Utilisation d'un convertisseur à deux ponts (12 impulsions) 42

II.5.1 Structure 42

II.5.2 Rôle de raccordement 42

II.6 Conclusion 43

Chapitre III : Contrôle des liaisons de transport à courant continu

III.1 Introduction 44

III.2 Principes de base de contrôle 44

III.3 Moyens de base de commande 45

III.3.1 Réglage rapide par les angles 46

III.3.2 Réglage lent par les régleurs en charge 48

III.4 Hiérarchie du système de contrôle 49

III.5 Conclusion 50

Chapitre IV : Méthodes de minimisation des perturbations harmoniques dans un système CCHT

IV.1 Introduction 51

IV.2 Définition 52

IV.3 Origine des distorsions 52

IV.3.1 Émission en tension 52

IV.3.2 Émission en courant 52

IV.4 Effet et caractéristique des perturbations harmoniques 53

IV.5 Sensibilité de la génération des harmoniques à divers facteurs 54

IV.5.1 Courant, angle de commande et de chevauchement de commutation 54

IV.5.2 Effet des asymétries sur les harmoniques 55

IV.5.3 Tolérances de paramètre d'équipement du convertisseur 55

IV.5.4 Changeurs de prises 55

IV.6 Harmoniques externes 56

IV.7 Harmoniques sur le côté alternatif 56

IV.7.1 Courants harmoniques dans les transformateurs de conversion 57

IV.7.2 Courants harmoniques dans les filtres côté alternatif 58

IV.8 Harmoniques sur le côté continu 58

IV.9 Solutions 60

IV.9.1 Filtrage passif 60

IV.9.1.1 Principe de fonctionnement 60

IV.9.1.2 Classification des filtres passifs 60

IV.9.2 Utilisation de redresseurs dodécaphasés 67

IV.10 Conclusion 68

Chapitre V : Résultats et analyses

V.1 Introduction 69
V.2 Description du système de transmission CCHT 70
V.3 Simulations et résultats 72
V.3.1 Démarrage et régime normal d'un système CCHT 72
V.3.2 Etudes les harmoniques des systèmes CA et CC 74
V.3.2.1 Harmoniques sur le côté alternatif 74
V.3.3.2 Harmoniques sur le côté continu 77
V.3.3 Réponse en fréquence des systèmes CA et CC 79
V.3.4 Minimisation des perturbations d'harmoniques 80
V.3.4.1 Les courants d'une ligne avant le filtrage 80
V.3.4.2 Les courants d'harmoniques d'une ligne 82
V.3.4.3 Courant ligne d'un convertisseur après le filtrage 84
V.4 Discussion des résultats 84
V.5 Conclusion 85
Conclusion générale **86**
Table des matières

Liste des figures

Figure I.1 :	Liaison CCHT monopolaire	**09**
Figure I.2 :	Liaison CCHT bipolaire	**10**
Figure I.3 :	Liaison CCHT homopolaire	**10**
Figure I.4 :	Types de convertisseur CSC et VSC	**12**
Figure 5 :	Schéma général de station de conversion à thyristors	**15**
Figure 6 :	Structure de quatre valves reliées en série	**16**
Figure 7 :	Constitution de principe d'un thyristor	**17**
Figure 8 :	Symbole d'un thyristor	**17**
Figure 9:	Diagramme schématique d'une ligne de transport à courant continu reliant deux réseaux triphasés	**21**
Figure 10 :	Montage en pont triphasé et double alternance	**22**
Figure 11 :	Circuit équivalent pour le convertisseur en pont triphasé	**24**
Figure 12 :	Formes d'onde des tensions et courants de montage de la figure 11	**26**
Figure 13:	Conséquence de commutation des valves sans retard d'allumage et sans l'angle d'amorçage	**27**
Figure 14:	Formes d'onde des tensions et des courants avec l'angle d'amorçage	**29**
Figure 15:	Variation de déphasage entre la tension et le courant de la phase a avec l'angle d'amorçage	**30**
Figure 16:	La forme d'onde du courant	**31**
Figure 17:	Période de la conduction de valve avec l'empiètement.	**33**
Figure 18:	Circuit équivalent de convertisseur pendant la commutation	**33**
Figure 19:	Formes d'onde de tension présentant le phénomène d'empiètement pendant la commutation de la valve 1 à la valve 3	**35**

Figure 20:	Circuit équivalent de pont redresseur	**37**
Figure 21:	Formes d'onde des tensions et les périodes de la conduction de valve	**39**
Figure 22:	Circuit équivalent de l'onduleur	**40**
Figure 23:	Forme d'onde continue de tension et de courant alternatif	**43**
Figure 24:	Diagramme schématique	**45**
Figure 25:	Liaison à courant continu point à point : principe fondamental de réglage	**47**
Figure 26:	Hiérarchie de différentes commandes de système CCHT	**50**
Figure 27:	filtre passif	**62**
Figure 28:	Les harmoniques de courant d'un convertisseur à 12 impulsions	**68**
Figure 29:	Système de transmission CCHT (12-impulsion) à deux extrémités 1000MW (500kV-2kA) 50/60 Hz	**71**
Figure 30:	Les graphes de la simulation d'une liaison CCHT à deux extrémités	**73**
Figure 31:	La variation du courant de 5ème, 7ème, 9ème,11ème harmonique en fonction de l'angle d'amorçage et de l'angle d'empiètement	**74**
Figure 32:	La variation du courant de 5ème harmonique en fonction de l'angle d'amorçage et de l'angle d'empiètement	**75**
Figure 33:	La variation du courant de 7ème harmonique en fonction de l'angle d'amorçage et de l'angle d'empiètement	**75**
Figure 34:	La variation du courant de 9ème harmonique en fonction de l'angle d'amorçage et de l'angle d'empiètement	**76**
Figure 35:	La variation du courant de 11ème harmonique en fonction de l'angle d'amorçage et de l'angle d'empiètement	**76**
Figure 36:	variation de la tension du 6ème harmonique en fonction de l'angle d'amorçage et de l'angle d'empiètement	**77**
Figure 37:	variation de la tension du 12ème harmonique en fonction de l'angle d'amorçage et de l'angle d'empiètement	**77**
Figure 38:	variation de la tension du 18ème harmonique en fonction de l'angle d'amorçage et de l'angle d'empiètement	**78**
Figure 39:	variation de la tension du 24ème harmonique en fonction de l'angle d'amorçage et de l'angle d'empiètement	**78**
Figure 40:	Réponse en fréquence des systèmes CA et CC	**79**
Figure 41:	Courant de phase pour le transformateur (connexion $Y-Y$), et son	**80**

spectre harmonique

Figure 42: Courant de phase pour le transformateur (connexion $Y - \Delta$), et son spectre harmonique **81**

Figure 43: Courant de phase (a) avant le filtrage, et son spectre harmonique **81**

Figure 44: Courant de 11ème d'harmonique et son spectre harmonique **82**

Figure 45: Courant de 13ème d'harmonique et son spectre harmonique **83**

Figure 46: Courant de 24ème d'harmonique et plus, et son spectre harmonique **83**

Figure 47: Courant de phase (a) après le filtrage, et son spectre harmonique **84**

Notations

Grandeurs Physiques		Unités
V_m	La tension maximale aux bornes d'un enroulement secondaire du transformateur	V
ω	La pulsation	rd/s
f	La fréquence de la tension du réseau	Hz
V_d	La tension redressée	V
V_{d0}	La tension continue à vide pour α=0°	V
e_{ac}	Valeur efficace de la tension alternative entre phases	V
I_d	Le courant redressé	A
V_{LN}	La valeur efficace de la tension phase-neutre	V
φ	L'angle de déphasage entre la tension et le courant fondamental.	Degré
δ	L'angle d'extinction	Degré
α	L'angle de retard (l'angle d'amorçage)	Degré
μ	L'angle de commutation	Degré
R_c	La résistance équivalente de commutation (la chute de tension due à la commutation)	Ω
X_c	La réactance de commutation	Ω
α_T	La valeur transitoire de l'angle d'amorçage	Degré
β	L'angle d'allumage de l'avance	Degré
γ	L'angle d'extinction	Degré
P_{CA}	La puissance active du côté alternatif	W
P_{CC}	La puissance active du côté continu	W
ΔIc	La marge de courant	%
$Icon$	Consigne de courant à l'extrémité onduleur	A

I_{cr}	Consigne de courant à l'extrémité redresseur	A
X_1	La valeur efficace du courant fondamental	A
X_n	Les valeurs efficaces des différentes harmoniques du courant	A
P	Nombre d'impulsions	Sans unité
N	L'ordre des harmoniques	Sans unité
Q	Coefficient de qualité de l'inductance série	Sans unité
Z	Impédance complexe du circuit	Ω
R	Résistance	Ω
$L\omega$	Réactance inductive	Ω
$C\omega$	Réactance capacitive	Ω
ω_r	Pulsation de résonance	Rad/s
F_r	La fréquence de résonance	Hz
Z_F	L'impédance du filtre	Ω
I_h	Le courant harmonique	A
Z_{hF}	Impédance harmonique d'ordre	Ω
Z_{hs}	Impédance harmonique du réseau (impédance de la source).	Ω
Y_{hF}	Admittance du filtre	S^{-1}
Y_{hs}	Admittance du réseau (source)	S^{-1}
G_F	La conductance du filtre	S
B_F	La susception du filtre	S

Grandeurs Géométriques

A	Surface (l'aire)	m^2
X	Direction de modélisation des composants	m

Abréviations

CC	Courant continu
CA	Courant alternatif
HT	Haute tension
CCHT	Courant continu haute tension
CAHT	Courant alternatif haute tension
VSC	Convertisseur source de tension
CSC	Convertisseur source du courant
SCR	Silicon controlled rectifier
SCFF	Self-Contained fluid filled cables (Câbles à isolation en huile fluide)
PPL	Câbles à isolation mixte papier-polypropylène
THD	Total Harmonic Distorsion (le facteur de distorsion)

Introduction générale

Introduction générale

Pour assurer une efficacité énergétique, le transport d'énergie à courant continu (CCHT) représente une application importante dans le processus d'exploitation d'énergie électrique.

Le transport en courant continu est principalement utilisé pour le transport d'énergie et pour l'interconnexion des réseaux électriques indépendants. Les lignes CCHT ne peuvent pas être mises en surcharge, ce qui accroît la fiabilité du réseau, et assure le soutien du réseau alternatif connecté. Ce sont essentiellement les fonctionnalités de contrôle des liaisons CCHT qui font l'intérêt de ces technologies.

L'énergie sous forme de tensions et de courants alternatifs à fréquence industrielle, est convertie dans les unités de conversion en énergie sous forme de tension et de courant redressé par des dispositifs statiques de conversion d'énergie appelés : convertisseurs statiques. Ces convertisseurs sont composés de semi-conducteurs de puissance. Ceux-ci sont considérés comme des charges non linéaires. En plus de la composante fondamentale (à 60 Hz en Amérique du Nord), cette forme d'onde présente un contenu harmonique, qui dans certain cas, peut être très important. Ces harmoniques se propagent de la charge vers le système (réseau) et engendrent des chutes de tension harmonique qui s'ajoutent à la composante fondamentale de la tension délivrée par le système. Ce qui résulte en une tension affectée d'un contenu harmonique et qui pourrait causer de sérieux problèmes de compatibilité électromagnétique.

Il existe quelques méthodes permettant de minimiser la pollution harmonique provoquée par ces convertisseurs. Parmi les plus populaires et les plus efficaces, on retrouve le filtrage et la structure d'enroulement de transformateur.

Ce mémoire, le premier s'intéressant à ce sujet à notre département, se veut une signification d'harmoniques dans les postes de conversions d'une ligne de transport CC peu abordée à nos universités. La recherche bibliographique dans ce sujet s'avère en effet peu aisée vu la nouveauté des recherches entreprises en la matière.

Le présent un mémoire de magister est organisé en deux parties :

La première section fait état des travaux bibliographiques et comporte quatre chapitres. Le premier chapitre porte un état de l'art du transport à courant continu actuellement en développement. Nous abordons également sommairement la comparaison entre le système CA et CC. Dans le deuxième chapitre nous nous intéressons exclusivement à la modélisation des liaisons à courant continu. Particulièrement, on y traite les ponts triphasés de Graëtz. La notion de système à courant continu est également décrite. Le troisième chapitre expose les deux types de contrôles utilisés en l'occurrence, le contrôle rapide et le contrôle lent. Le dernier chapitre de notre mémoire, nous rappelons ensuite quels sont les courants et tensions harmoniques produits par les convertisseurs (redresseur et onduleur) classiques (pont de Graëtz à thyristors) et présente ensuite les différentes solutions permettant de les minimiser.

La deuxième partie (chapitre cinq) présente une étude et analyse des harmoniques dans les liaisons CCHT, en utilisant l'outil *FFT Analysis* du SimPowerSystems pour obtenir le contenu harmonique des courants CA.

Chapitre I

Généralités sur les liaisons de transport à courant continu

Chapitre I

Généralités sur les liaisons de transport à courant continu

I.1 Introduction

La croissance économique et démographique impose de renforcer la sécurité, les capacités de transit et la flexibilité des réseaux de transport d'électricité.

Un réseau électrique fiable est un des piliers des économies développées et un levier essentiel pour les économies en développement [42].

Les réseaux à haute tension (HT) se heurtent alors aux exigences du « grand transport » et leurs gestionnaires cherchent les moyens de lever les obstacles entre les lieux de production éloignés et les centres de consommation.

La technologie CCHT (courant continu en haute tension), mise au point en 1954, est une solution économique et écologique pour le transfert massif d'électricité sur de longues distances avec des pertes en ligne minimales.

Le transport en CCHT est idéal pour les applications intégrées sur réseaux CA maillés. Parmi ses spécificités, citons la souplesse de réglage du flux de puissance et le maintien dynamique de la tension sur les réseaux CA environnants. Associés à des stratégies de conduite avancées, ces avantages peuvent nettement accroître l'« intelligence » et les performances du réseau en régimes établi et dynamique [43].

I.2 Historique

Une première installation a vue le jour en 1881 par MARCEL DEPIEZ entre 1881 et 1883 à l'exposition internationale de Munich [3]. Un peu plus tard, Les premières liaisons de transport en courant continu (ex : Moutiers-Lyon en 1906) ont été réalisées en utilisant des génératrices et moteurs à courant continu connectés en série pour la transformation énergie mécanique – énergie électrique.

Le courant alternatif a très vite pris l'avantage dans le développement des liaisons de transport grâce à l'invention du transformateur, tandis que les recherches se poursuivaient sur des moyens statiques de transformation courant alternatif – courant continu : thyratrons et valves à vapeur de mercure.

En 1939, une liaison continue de 1 MW est réalisée en Suisse par Brown Bovery utilisant des valves à vapeur de mercure. Vers 1940, AEG et Siemens réalisent une liaison de 30 MW avec la même technologie. Ces réalisations ne convainquent pas en raison de la tension directe supportée par ces valves qui reste trop faible pour une **utilisation expérimentale** pour une liaison de transport [1, 12].

En 1954, à une époque où la plupart des pays européens s'activaient à développer leurs infrastructures de distribution électrique pour répondre à une demande en forte hausse, un événement passait presque inaperçu sur les rives de la mer Baltique qui marquerait à jamais le transport de l'électricité sur de longues distances. En effet, quatre ans plus tôt, l'Agence suédoise de l'énergie commandait la première liaison de transport en courant continu à haute tension (CCHT) au monde, à construire entre la côte suédoise et l'île baltique de Gotland [23].

L'année 1954 voyait la mise en service de cette liaison CCHT.

En 1965, General Electric réalise en laboratoire un thyristor (interrupteur statique à fermeture commandable). Cette technologie évolue et en 1970, un convertisseur à thyristors est installé en série avec les convertisseurs de Gotland, en faisant la première **installation commerciale** utilisant cette technologie. Les valves à thyristors remplacent alors les valves à vapeur de mercure dans les nouvelles liaisons ou les rénovations de liaisons existantes [1, 23].

En 1997, la technologie des sources de tension, issue de celle des variateurs de vitesse pour moteurs, évolue vers des tensions plus élevées, la rendant utilisable pour des liaisons de transport. En 1999, la première liaison commerciale (50 MW) de ce type est réalisée par ABB à Gotland [13].

Actuellement, les nouvelles liaisons sont réalisées tant avec la technologie des thyristors qu'avec celle des sources de tension, souvent en fonction du niveau de puissance [3,13].

I.3 D'application de système CCHT

Lors de la conception d'une interconnexion entre deux ou plusieurs stations, il devient actuellement critique de faire un choix entre les utilisations d'une transmission de puissance CA ou CC. Dans les cas de système CCHT, nous pouvons dire que la décision a été prise sur des considérations techniques et économiques. En effet, les principales applications où nous retrouvons ces systèmes, peuvent être répertoriées de la manière suivante [1, 2, 4]:

I.3.1 Transport sous-terrain et sous-marin

La puissance réactive capacitive élevée des câbles CA exige des stations de compensation inductive et limite la longueur des câbles. En CC pas de limite sur La distance de transport par câble**.**

I.3.2 Transport sur de longues distances

Le transport à courant continu est souvent la solution la plus économique car le gain réalisé sur le coût des lignes et des installations de compensation de puissance réactive dépasse le coût des stations de conversion aux extrémités. Le CA tend à être plus économique que CC pour les distances moins que la distance du seuil de rentabilité, mais il devient plus coûteux pour des distances plus longues. Les distances du seuil de rentabilité peuvent varier entre 400 à 700 km dans les lignes aériennes selon le coût unitaire de ligne. Pour un système de câbles, cette distance de rentabilité est comprise entre 25 à 50 km.

I.3.3 Interconnexion asynchrone

Interconnexion entre les systèmes qui fonctionnent à différentes fréquences (ex: 50 Hz/ 60 Hz), ou entre les systèmes non-synchronisés (Interconnexion entre deux réseaux possédant des stratégies différentes de réglage de fréquence).

I.3.4 Stabilité

La liaison CCHT peut stabiliser les réseaux alternatifs adjacents en difficultés par modulation de puissance.

I.4 Intérêts par rapport à un transport CA

Dans le but de montrer le quel des deux types de transport CA ou CC, est le plus pratique, certains recherches ont témoignées le recours à la technologie CCHT pour les raisons suivantes : [6, 30, 31]

- aucunes limites dans la distance transmise. C'est valide pour les deux lignes aériennes et câbles de sous-marin ; sous terre.
- commande rapide et précise du flux de puissance qui améliore la stabilité de système d'alimentation.
- la direction du flux de puissance peut être changée rapidement.
- Une liaison CCHT n'augmente pas la puissance de court-circuit au point de raccordement.
- Pour un niveau de puissance donné, le système de transport CCHT sollicite un corridor plus petit, des pylônes plus simples et moins chers et des coûts réduits des conducteurs et isolateurs par rapport au système CAHT.
- la puissance peut être transmise entre deux systèmes CA fonctionnant à différentes fréquences nominales ou à la même fréquence sans être synchronisée.

I.5 Comparaison entre système CA et CC

Le système de transport CCHT a des aspects positifs qui font le point faible du système CAHT. Ces derniers sont principalement dus au contrôle rapide de la puissance dans les lignes de commande à travers les convertisseurs CC. Voici la comparaison:

- L'économie primaire dans la transmission de CC est que seulement deux conducteurs par circuit sont nécessaires au lieu de trois requis pour le CA. En conséquence, les pylônes de transport CC portent moins de poids mort de

conducteur, et elles peuvent être plus petites, moins coûteuses pour fabriquer, et plus facile à ériger.

- Dans le cas d'un défaut sur une ligne sur une liaison à courant continu, les conducteurs restants seront toujours fonctionnels à travers le sol de retour (pour les deux liaisons bipolaire et homopolaire). Cela permet à la réparation des parties défectueuses, sans réduction considérable du niveau de service.
- Surtensions de manœuvre sur les cas de CC sont inférieures à ceux des lignes à courant alternatif. Dans les lignes aériennes, des tentatives sont faites pour limiter les valeurs pic à 1,7 fois dans le cas CC [3,4].
- La résistance d'un conducteur CA est communément être supérieure à sa résistance en continu, en raison de l'effet de peau.
- Une liaison de transport de courant continu attribue à la stabilisation des deux systèmes CA qu'elle les relies.
- Il y'à des aspects économiques les plus importants obtenus peut être apprécié si l'on observe que l'utilisation de la transmission CCHT, la vitesse motrice ne doit pas se limiter à correspondre à 50 ou 60 Hz, mais pourrait plutôt être choisi pour une meilleure économie.
- Les convertisseurs aux deux extrémités de la ligne d'étirage de la puissance réactive du système CA. Ce rapport indépendant sur la longueur de la ligne, en contraste avec CA, la consommation de puissance réactive varie presque linéairement avec la distance.
- Pour la même quantité d'énergie transmise, les pertes de ligne CC sont plus petites que des lignes de transport CA. Les pertes en ligne CA sont 33% plus grande que les pertes en ligne CC [3].

I.6 Types de systèmes de CCHT

Trois types de liaisons de CC sont considérés dans des applications de CCHT.

I.6.1 Liaison monopolaire

Les liaisons de CCHT monopolaire ont le retour de la terre ou le retour métallique.

- **La liaison de CCHT Monopolaire avec le retour de la terre :** se compose d'un ou plusieurs unités de convertisseur 6-impulsion en série ou en parallèle à chaque

extrémité, un conducteur simple et retour par la terre ou la mer, comme représenté sur la figure 1(a). [16]

- **La liaison de CCHT monopolaire avec le retour métallique :** L'utilisation d'un conducteur métallique est optionnelle et permet de limiter les courants dans les structures métalliques enfouies, comme représenté sur la figure 1(b). [15]

I.6.2 Liaison bipolaire

Un système bipolaire de CCHT se compose de deux pôles, dont chacun inclut un ou plusieurs des unités de convertisseur 12 impulsions, en série ou en parallèle. Il y a deux conducteurs, un avec la polarité positif et l'autre avec la polarité négative. [16]

Le système de Bipolaire est une combinaison de deux arrangements monopolaire avec le retour de la terre, comme représenté sur la figure 2. [15]

I.6.3 Liaison homopolaire

Ce type de liaison peut être utilisé si le retour à la terre est acceptable. Le processus d'isolation d'une ligne en cas de défaut, et de reconnexion est plus simple pour ce type de liaison que pour une liaison bipolaire (voir figure 3). [15]

- Chacune des configurations de système ci-dessus de CCHT habituellement a cascadé des groupes de plusieurs convertisseurs, chacun ayant un banc de transformateur et un groupe des valves. Les convertisseurs sont reliés en parallèle du côté à CA (transformateur) et en série sur de côté (valve) pour donner le niveau désiré de la tension du pôle.

- Les systèmes **dos à dos** de CCHT, peuvent être conçus pour l'opération monopolaire ou bipolaire avec un différent nombre de groupes de valve par pôle, selon le but de l'interconnexion et de la fiabilité désirée. Ce genre de liaisons relie deux réseaux alternatifs par une ligne dont la longueur n'excède guère une dizaine de mètres (le redresseur et l'onduleur sont situés dans la même station). Ces convertisseurs permettent un échange de puissance entre les deux réseaux, tout en permettant à chacun de fonctionner à sa propre fréquence et sa propre stratégie de contrôle, donc ce genre de liaison est utilisé généralement pour les interconnexions des réseaux internationaux et pour les interconnexions asynchrones.

- La plupart des liaisons **point à point** de CCHT sont des lignes bipolaires (et peuvent être même monopolaire utilisée seulement pendant les éventualités). Ils sont normalement conçus pour fournir l'indépendance maximale entre les pôles pour éviter des arrêts bipolaires. Lorsqu'il s'agit de transporter l'énergie électrique en CCHT (par lignes

ou par câbles), entre deux réseaux éloignés, les liaisons à deux extrémités sont généralement utilisées.

- Un système **multiterminal** de CCHT est formé quand on doit raccorder plus de deux nœuds sur le réseau à CA [30].

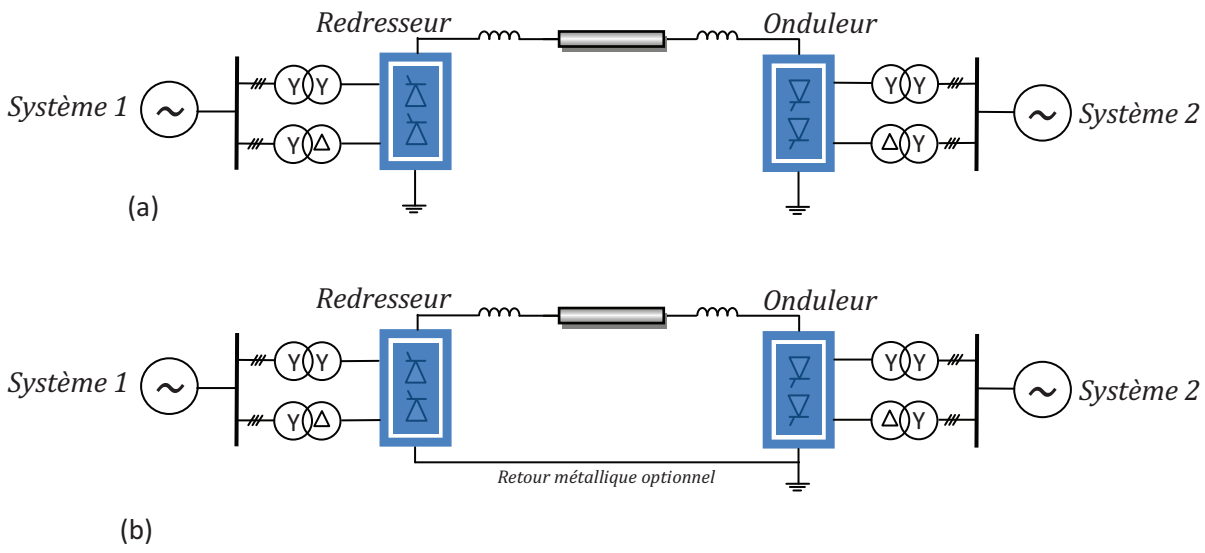


Figure I.1: Liaison CCHT monopolaire.

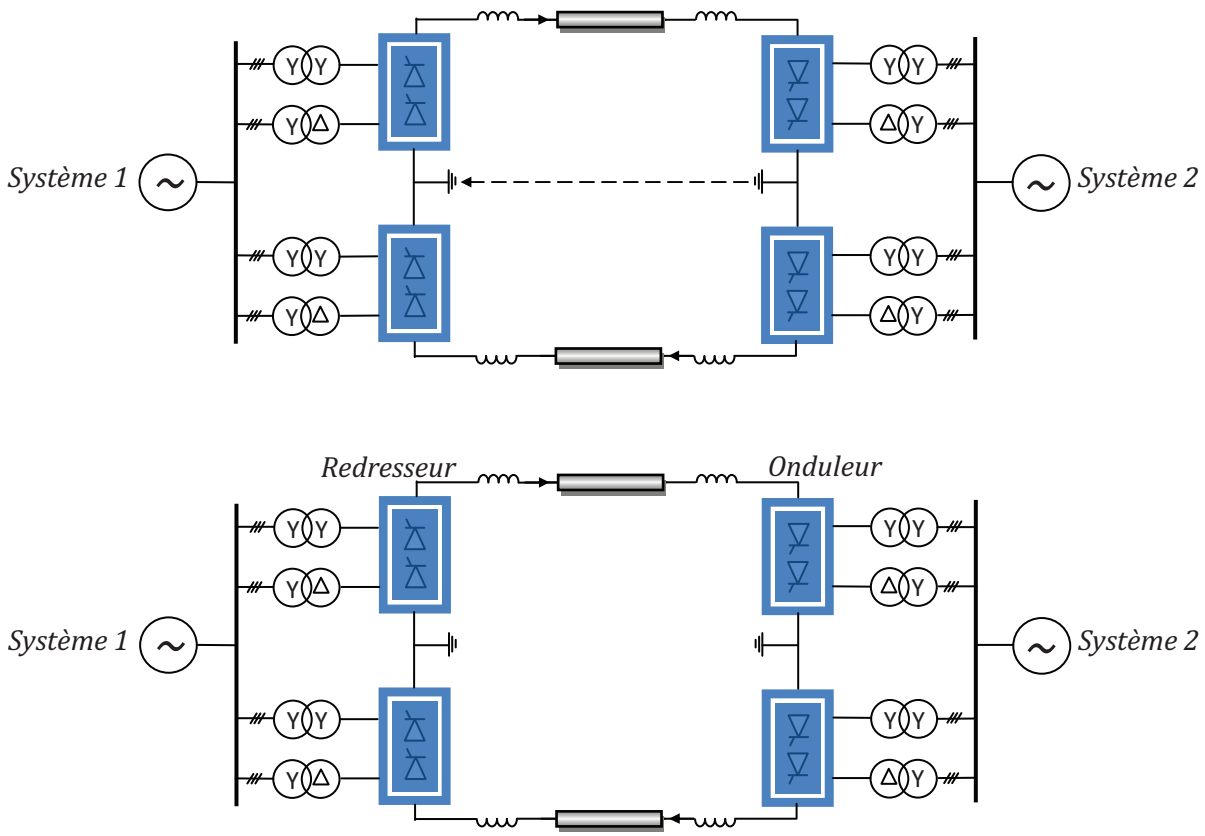


Figure I.2: Liaison CCHT bipolaire.

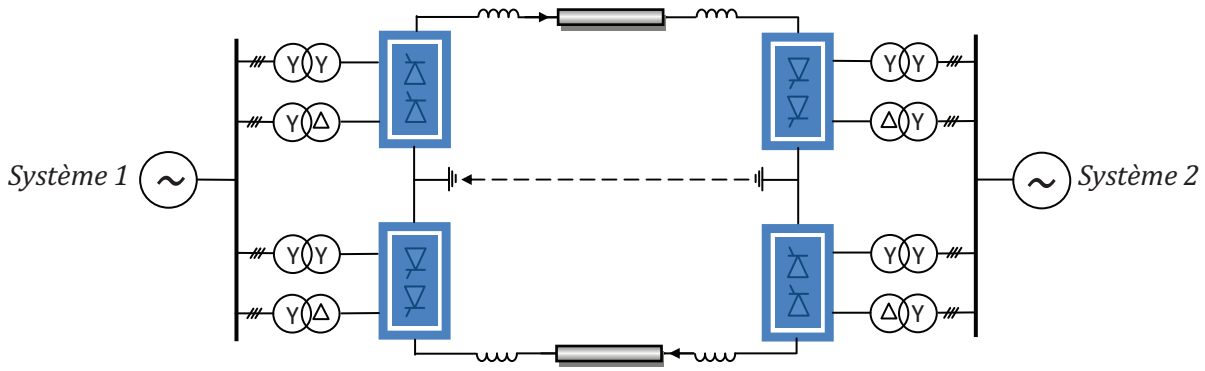


Figure I.3: Liaison CCHT homopolaire.

I.7 Types de convertisseur

Un système de CCHT exige un convertisseur électronique pour sa capacité de convertir l'énergie électrique de CA - CC ou vice versa. Il y a fondamentalement deux types de configuration de convertisseurs triphasés possibles à ce processus de conversion (la figure 4) [17]:

- Convertisseur de source du courant (CSC) ;
- Convertisseur de source de tension (VSC).

Jusqu'aux années 90, la configuration de CSC a été utilisée presque exclusivement. Des valves d'arc à mercure ont été mises en application dans le CSC comme dispositifs fondamentaux de commutation jusqu'aux années 70, quand elles ont été remplacées par les valves de thyristor.

Depuis les années 90, le type de VSC de convertisseurs ont également été disponible pour l'usage dans des systèmes de CCHT. Actuellement, l'obstacle principal pour un usage plus large de type de VSC est sa gamme de puissance limitée jusqu'aux deux ou trois cent MW

Le choix dont le type de convertisseur à choisir pour un projet particulier est basé sur des considérations économiques et techniques du système [29].

Une comparaison entre les caractéristiques des deux convertisseurs est donnée dans le tableau 1[17]:

	Types de convertisseur	
	CSC	***VSC***
Côté CA	-Agit comme une source de tension constante; -Requiert un condensateur pour le stockage de l'énergie ; -Requiert un grand filtre CA pour l'élimination des harmoniques ; -Requiert la compensation de la puissance réactive pour la correction du facteur de puissance.	- Agit comme source de courant constant; - Requiert une inductance pour le stockage de l'énergie ; - Besoin un petit filtre à CA pour l'élimination des harmoniques de rang élevé ; - L'alimentation d'énergie réactive n'est pas nécessaire puisque le convertisseur peut fonctionner dans n'importe quel quadrant.
Côté CC	- Agit comme source de courant constant; - Requiert une inductance pour le stockage de l'énergie; - Besoin un filtre; - Fournit une limitation essentielle des caractéristiques du courant de défaut.	- Agit comme une source de tension constante ; - Requiert un condensateur pour stockage de l'énergie ; - Ce condensateur utilise pout filtrage. - Problématique des défauts de la ligne CC lorsque le condensateur chargé se décharge dans le point de défaut.
commutation	- Commutation ou commutation forcé avec un condensateur série. - Commutation se produit à la fréquence de ligne (pulsation unique par cycle). - Pertes de commutation négligeables.	- Auto commutation. - La commutation se produit à une fréquence élevée (multiples pulsations par cycle). - Pertes de commutation considérables.
Gamme de puissance et de tension	-0 à 3150 MW par convertisseur -Jusqu'à 800 kV	- 0 à 1100 MVA par convertisseur - Jusqu'à 250 kV

Tableau 1: Comparaison entre les convertisseurs CCHT classiques et les liaisons VSC-CCHT.

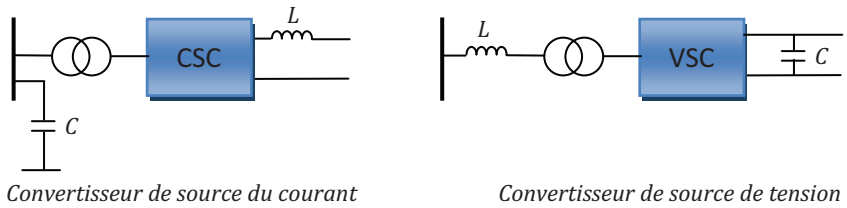


Figure I.4 : Types de convertisseur CSC et VSC.

I.8 Les inconvénients du transport en CCHT

Les plus grands inconvénients de la transmission de CC sont [17, 29] :

- Coût élevé de groupes convertisseurs ;
- Les transformateurs ne peuvent pas être utilisés pour changer des niveaux de tension ;
- Les harmoniques produits par les groupes convertisseurs doivent être filtrés en dehors ;
- Consommation de puissance réactive par les groupes convertisseurs ;
- Commandes complexes de transport de CC.

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord étudié le but et l'intérêt du système CCHT. Ensuite, nous avons présenté les types de CCHT et ses convertisseurs utilisés actuellement. Finalement les inconvénients du transport CCHT.

Au chapitre suivant, nous allons illustrer la conception des stations de conversion. Ensuite, le fonctionnement et modélisation des liaisons à courant continu.

Chapitre II

Fonctionnement et modélisation les liaisons de transport à courant continu

Chapitre II

Fonctionnement et modélisation des liaisons de transport à courant continu

II.1 Introduction

L'énergie sous forme de tensions et de courants alternatifs a fréquence industrielle, est convertie dans les unités de conversion en énergie sous forme de tension et de courant redressé.

Pour savoir la conversion du courant et la tension il faut indiquer les composantes principales de station de conversion et ça c'est l'intérêt de ce chapitre.

II.2 Conception des stations de conversion

II.2.1 Schéma général

La figure 5 présente le schéma général d'une station de conversion. Elle comporte :

— **Un poste à courant alternatif** : pour raccorder les unités de conversion au réseau alternatif. Le poste est organisé en jeux de barres et en travées ou cellules, de façon à pouvoir effectuer différentes combinaisons de connexions entre les lignes et les unités de conversion.

— **Les filtres d'harmoniques**, les bancs **de compensation de puissance réactive** et **les unités de conversion** sont raccordés au même jeu de barres.

— **Des réducteurs de mesure** (transformateurs de courant et transformateurs ou réducteurs de tension) délivrent des signaux nécessaires au comptage de l'énergie, aux protections et aux dispositifs de contrôle-commande.

— **Un poste à courant continu** complète le schéma. Il comporte un système de lissage du courant continu et de filtrage de la tension redressée, et tout l'appareillage nécessaire aux mesures de la tension et du courant ainsi qu'aux connexions des unités de conversion a la ligne à courant continu [12].

II.2.2 Unités de conversion

L'unité de conversion est la plupart de part importante d'un système de transport en CCHT, qui exécute la conversion du CA à CC. Elle est constituée d'un transformateur et d'un ou deux ponts de Graëtz reliés en série, ainsi que de son équipement de commande et de protection.

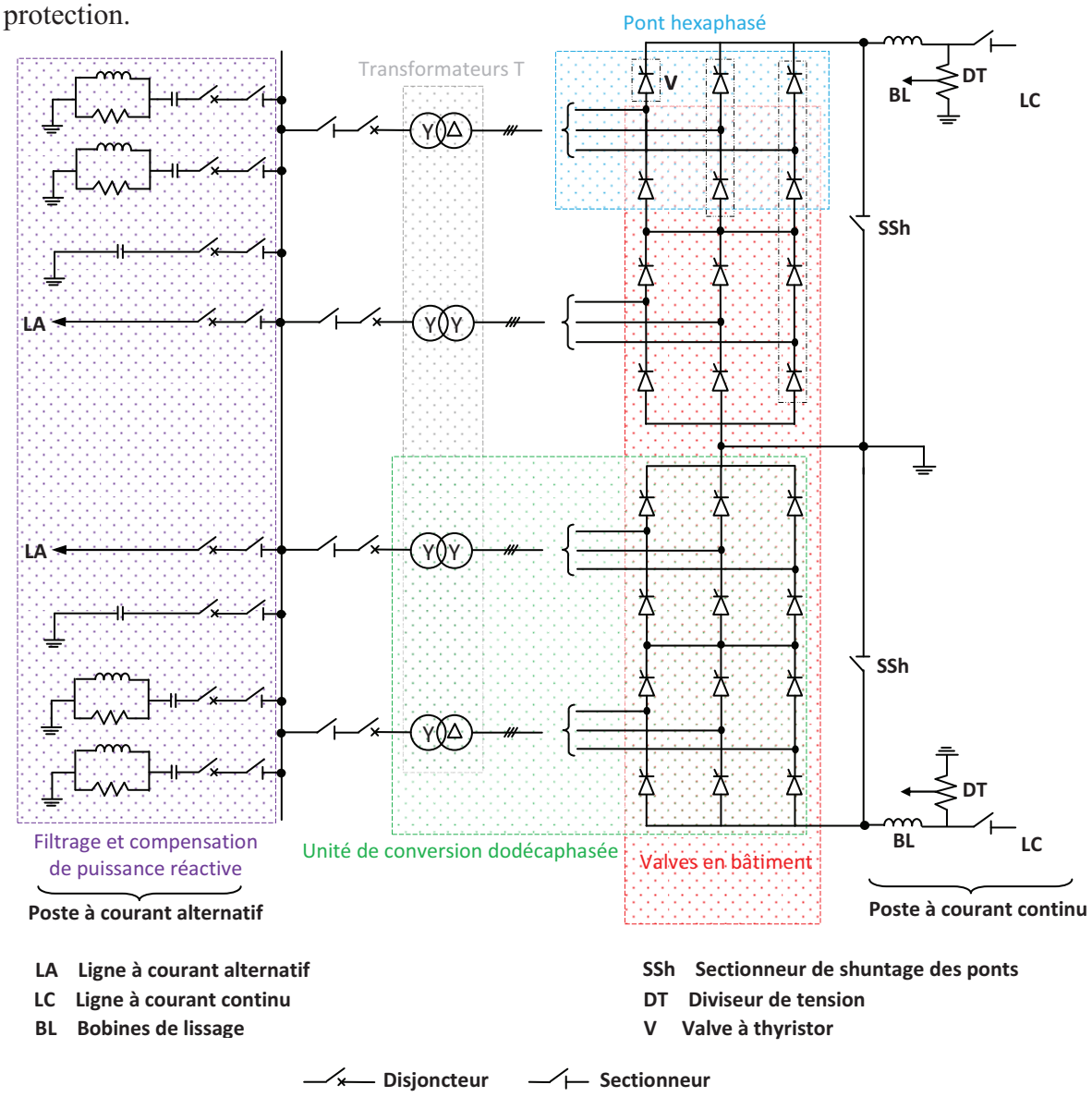


Figure 5 : schéma général d'une station de conversion à thyristors.

Un pont en valve de 12 impulsions peut être construit en reliant deux ponts de 6 impulsions. Les ponts sont alors raccordés séparément au système à CA par des transformateurs, un à la structure d'enroulement de Y-Y et l'autre à la structure d'enroulement de Y-Δ, suivant la figure 5 « couleur vert ».

II.2.3 Valves à thyristors

Les valves à thyristor peuvent être habillage dans différentes manières selon l'application et le fabricant. Cependant, la manière la plus commune d'arranger les valves de thyristor est dans un groupe de 12 impulsions avec trois valves quadruples (quadrivalve). Chaque valve à thyristor se compose d'une certaine quantité (≈ 50) de thyristors connectés en série pour atteindre les tensions élevées adaptées au transport de grande puissance (figure 6) [12, 36].

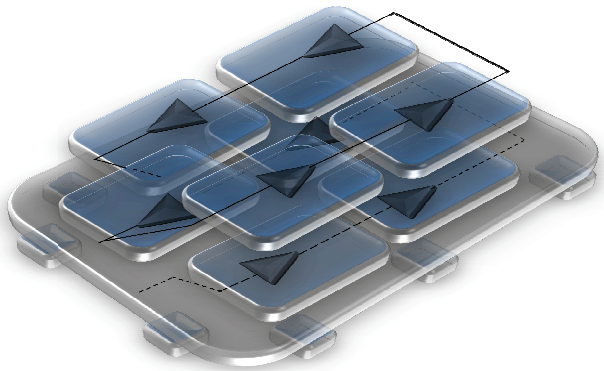


Figure 6 : Structure de quatre valves reliées en série.

II.2.3.1 Thyristor

Le thyristor est apparu en 1957. Le mot a été formé à partir de thyratron (triode à gaz qui jouait autrefois un rôle analogue) et de transistor. C'est un redresseur commandé au silicium comme l'indique son appellation anglo-saxonne *SCR (Silicon controlled rectifier)*. Ces composants ont un fonctionnement bistable. Ils possèdent un état passant ou conducteur (On-state) et un état bloqué (Off-state), et ils peuvent être unidirectionnels ou bidirectionnels [19].

— ***Constitution :*** Le thyristor est formé d'un matériau semi-conducteur sur lequel on a créé trois jonctions : il y a ainsi deux zones N et deux zones P (figure 7). Trois bornes sont accessibles : l'anode (A), la cathode (K) et la gâchette (G).

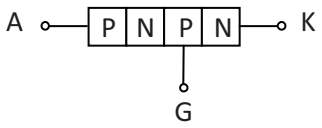


Figure 7 : constitution de principe d'un thyristor.

— ***Symbole :*** on représente le thyristor par son symbole normalisé (figure 8).

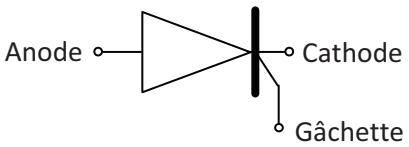


Figure 8 : Symbole d'un thyristor.

— ***Principe :*** Le thyristor se comporte comme une diode dont on commande la mise en conduction. Le symbole du thyristor ressemble d'ailleurs beaucoup à celui d'une diode. On y retrouve l'anode et la cathode, mais une troisième borne apparaît, la gâchette. C'est elle qui permet la commande du composant. Pour que le thyristor devienne passant, il faut non seulement le polariser en direct comme une diode, mais aussi lui appliquer un courant adéquat entrant dans la gâchette. Une fois le thyristor amorcé (c'est-à-dire devenu passant), il est inutile de maintenir la présence du courant de gâchette. C'est la raison pour laquelle, la plupart du temps, la commande se fait par une impulsion de courant. Cette dernière doit néanmoins respecter certaines conditions : minimum de hauteur, minimum de durée [20].

Le blocage se fait comme celui d'une diode, il n'est pas commandé par la gâchette.

II.2.4 Contrôle-commande des unités de conversion

La fonction essentielle du contrôle-commande est d'élaborer et de distribuer aux valves de l'unité de conversion une séquence d'impulsions, synchrones avec le réseau, mettant successivement ces valves en conduction. La séquence doit présenter la plus grande régularité possible afin de réduire au minimum un déséquilibre de fonctionnement,

qui conduit forcément à engendrer des harmoniques non caractéristiques. Un décalage rapide de cette séquence doit être possible afin d'augmenter ou de diminuer très vite la tension redressée. C'est cette dernière fonctionnalité qui donne aux unités de conversion la propriété d'une très grande contrôlabilité [12].

Pour élaborer la séquence d'impulsions, des asservissements sont nécessaires et permettent de régler la tension redressée pour maintenir une grandeur réglée égale, en régime permanent, à une valeur de consigne ou voisine de celle-ci en régime transitoire.

II.2.5 Autres matériels

II.2.5.1 Transformateurs de conversion

Les transformateurs de conversion assurent les fonctions suivantes :

- Alimenter les convertisseurs avec un terne de tensions en CA réglé en amplitude par le système de contrôle du poste CCHT ;
- Assurer une séparation électrique le réseau et les redresseurs (onduleurs) afin d'éviter que des tensions continues soient injectées dans le réseau.
- Réduire le bruit harmonique engendré par les convertisseurs (redresseurs et onduleurs) vers le réseau ;
- Limiter le courant de défaut dans les thyristors des convertisseurs en cas de court-circuit [16, 38].

II.2.5.2 Inductance de lissage

Ce dispositif, placé du côté CC du convertisseur, a la fonction de lisser la forme de courant continu dans toutes les configurations de charge transmise, de limiter les courants de court-circuit qui risquerait d'endommager les convertisseurs, de diminuer le bruit harmonique coté CC et de réduire les risques de résonance.

II.2.5.3 Filtres CA

Ces filtres ont pour fonction de réduire la perturbation harmonique dans le réseau en tension alternative en amont du poste de départ et en aval du poste d'arrivée. Les filtres CA sont constitués d'éléments passifs (condensateurs, inducteurs, parafoudres) dont le dimensionnement et les valeurs nominales sont calibrés en fonction des caractéristiques de la connexion [27, 38].

II.2.5.4 Filtres CC

Les filtres du côté CC permettent la réduction de certaines fréquences harmoniques sur les lignes à courant continu. Ils ne sont pas composés de composants passifs seulement (condensateurs, inducteurs, résistances) comme les filtres CA, mais aussi de dispositifs d'électronique de puissance qui injectent dans la ligne une fréquence harmonique en opposition de phase par rapport à celle des convertisseurs on réduisant l'amplitude.

II.2.5.5 Bancs de condensateurs

Les bancs de capacités assurent les fonctions suivantes :

- Fournissent la puissance réactive aux convertisseurs [38].

II.2.5.6 Lignes aériennes [31]

Le dimensionnement d'une ligne aérienne en CCHT relève les mêmes règles que celles utilisées pour une ligne en courant alternatif dont la tension crête entre phase et terre serait sensiblement égale à la tension continue nominale de la liaison.

II.2.5.7 Câbles

Les technologies de réalisation des câbles pour ce niveau d'application sont les suivantes [31]:

- **Câbles à isolation en huile fluide** (Self-Contained fluid filled cables – SCFF): sont des câbles dont le système d'isolation est composé de papier qui est imprégné d'un fluide synthétique à basse viscosité qui est maintenu constamment en pression dans un conduit pratiqué dans le centre du conducteur.
- **Câbles à isolation solide:** sont des câbles dont le système d'isolation est constitué de papier à haute densité imprégné d'un mélange dense. Contrairement à ce qui se passe pour les câbles à isolation en huile fluide, le mélange d'imprégnation ne circule pas dans le conducteur et dans le corps du câble mais reste pratiquement stable dans sa position d'origine. Ce type de câble a été récemment employé pour la réalisation de l'interconnexion sous-marine en courant continu.

- **Câbles à isolation mixte papier-polypropylène** (PPL): sont des câbles dont le système d'isolation est constitué de papier à haute densité imprégné d'un mélange visqueux, mais dont les couches de papier sont séparées par des films de polypropylène. L'utilisation de ce type de câble permet donc d'avoir des tronçons sensiblement plus longs et de porter en plate-forme de pose 25% de câble en plus par rapport à la technologie à isolation solide.

II.2.5.8 Électrodes [31]

Les électrodes sont utilisées pour :

- permettre le retour de courant et facilite le passage du courant du réseau CC à la terre et limitent les surtensions de terre ;
- Limitent l'élévation de température du sol et le gradient de tension ;
- Un conducteur de terre additionnel peut être utilisé pour limiter le courant de terre.

II.2.5.9 Communication

La communication est également nécessaire pour la transmission d'informations sur l'état général nécessaire par les opérateurs. La protection peut également exiger la communication entre les bornes de détection de certains défauts.

Il existe plusieurs moyens de transmission alternatifs disponibles pour le secteur des télécommunications: les fils direct via des lignes privées ou des réseaux téléphoniques, courant porteur en ligne, les systèmes à micro-ondes, et les fibres optiques. Le choix du moyen de télécommunication dépendra de la quantité d'informations à transmettre et la vitesse d'intervention nécessaire, degré de sécurité, et l'immunité au bruit [9].

II.3 Principe fondamental d'un système de transport à CC

Un système de transport à CC utilise une ligne à CC pour relier deux réseaux à CA. La Figure 9 montre les parties essentielles du système. Le convertisseur **1** est un redresseur en pont triphasé, convertissant la puissance alternative du réseau **1** en puissance continue.

Celle-ci est transportée sur une ligne composée de deux conducteurs et reconvertie en puissance alternative par le convertisseur **2**, fonctionnant en onduleur. Les deux réseaux peuvent fonctionner à des fréquences différentes, sans affecter le transfert de puissance.

Les tensions V_{d1} et V_{d2} apparaissant aux deux extrémités de la ligne diffèrent seulement par la faible chute de tension RI dans les conducteurs de ligne. On peut inverser la direction de la puissance en faisant varier les angles de retard à l'amorçage α et β de sorte que le convertisseur **1** fonctionne en onduleur et le convertisseur **2** en redresseur. Le changement des angles d'amorçage inverse la polarité des conducteurs, mais la direction du courant demeure la même. On se souviendra en effet que le sens des courants est imposé par les thyristors qui bloquent tout courant en sens inverse [4, 8, 35].

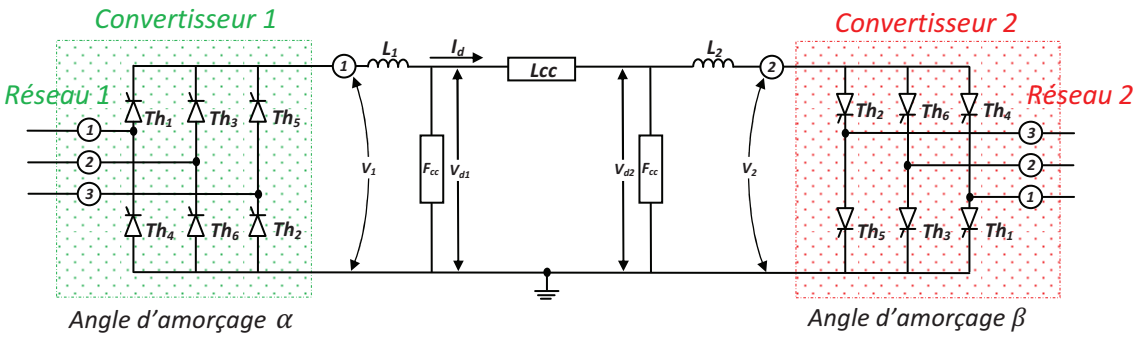


Figure 9: Diagramme schématique d'une ligne de transport à courant continu reliant deux réseaux triphasés.

II.4 Circuits de convertisseur

Le module de base d'un convertisseur de CCHT est le montage en pont triphasé (convertisseur triphasé contrôlé à thyristor) et double alternance. Ce circuit est également connu comme pont de Graëtz. Le convertisseur triphasé contrôlé en pont est un redresseur/onduleur utilisé très fréquemment en électronique de puissance [9, 35, 36].

Les convertisseurs triphasés contrôlés en pont possèdent 6 thyristors raccordés au secondaire d'un transformateur triphasé (Figure 10) c.-à-d. les enroulements de CA du transformateur sont habituellement étoile liée au neutre au sol; les enroulements de côté de valve sont raccordés en triangle ou étoile liés au neutre sans mise à la terre [9].

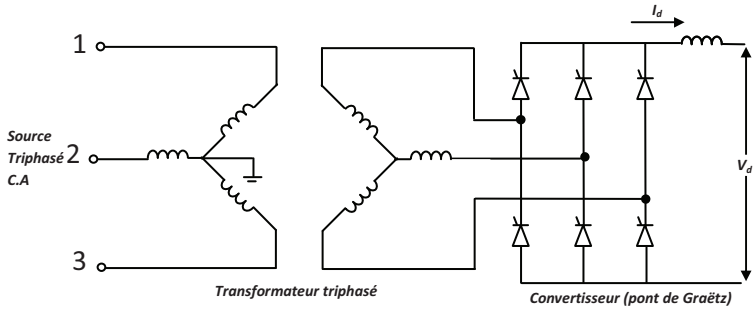


Figure 10 : Montage en pont triphasé et double alternance.

Comme on peut initier la conduction à tout moment approprié, les thyristors permettent de faire varier la tension continue lorsque le convertisseur fonctionne comme redresseur. De plus, en remplaçant la charge par une source à CC, le convertisseur peut aussi fonctionner comme onduleur.

II.4.1 Analyse de montage en pont triphasé (double alternance) [44]

Dans le cas général, une source triphasé des 3 enroulements, sièges des 3 tensions alternatives V_a , V_b, V_c sont encore couplés en étoile, mais on utilise 6 diodes (thyristor).

Le premier groupe, Th_1, Th_3, Th_5 forme un commutateur "plus positif" et réunit **P** a la plus positive des bornes 1, 2, 3. Le second groupe, Th_2, Th_4, Th_6 forme un commutateur "plus négatif" et relie **N** à la plus négative des bornes 1, 2, 3. Cet ensemble de 2 bras de thyristors est couramment appelé pont de diodes (amorçage nulle).

La tension redressée V_d, recueillie entre **P** et **N**, est égale, à chaque instant, à la plus grande différence entre les tensions d'entrée. Le montage effectue donc un double choix, d'où le sigle **PD** (parallèle double) utilisé.

Le secondaire du transformateur est couplé en étoile et connecté a deux groupes de diodes : un commutateur à cathode commune (Th_1, Th_3, Th_5) et un commutateur à anode commune (Th_2, Th_4, Th_6).

L'existence d'un courant continu dans la charge exige la conduction de deux diodes à tout instant, une de chaque commutateur.

La règle pour déterminer les diodes passantes est :

- Pour le commutateur à cathode commune, le thyristor dont l'anode est au potentiel le plus élevé conduit, d'où la dénomination « + positif » ;

- Pour le commutateur à anode commune, le thyristor dont la cathode est au potentiel négatif le plus faible conduit, d'où la dénomination « + négatif ».

Donc :

- Lorsque $V_a > V_c > V_b$, *Th_1 et Th_6 conduisent :* $V_d = V_a - V_b$;
- Lorsque $V_a > V_b > V_c$, *Th_1 et Th_2 conduisent :* $V_d = V_a - V_c$;
- Lorsque $V_b > V_a > V_c$, *Th_3 et Th_2 conduisent :* $V_d = V_b - V_c$;
- Etc…

Chaque thyristor conduit ainsi pendant un tiers de période (on dira que l'indice de commutation de ce montage est q = 3) tandis que la tension redressée se compose de six portions de sinusoïdal des par période T (on dira que l'indice de pulsation est p = 6) ; ces deux indices avaient des valeurs égales dans le cas des montages parallèles simples.

Pour l'étude du convertisseur, il faut d'abord satisfaire à trois conditions [1, 5, 6, 34]:

- Le courant de CC est constant (c.-à-d. la réactance de lissage est infini) ;
- Les valves sont les commutateurs idéaux (sans pertes, résistance nulle en état passante et infinie en état bloqué) ;
- Le système CA est infiniment fort (c.-à-d. les tensions alternatives triphasés sont équilibrés, symétriques et parfaitement sinusoïdaux).

Fondé sur les hypothèses ci-dessus, le convertisseur de pont de la figure 10 peut être représenté par le circuit équivalent représenté sur la figure 11.

Les tensions phase-neutre instantanées de source triphasée CA sont :

$$\begin{aligned} V_a &= V_m \cos(\omega t + 60°) \\ V_b &= V_m \cos(\omega t - 60°) \\ V_c &= V_m \cos(\omega t - 180°) \end{aligned} \tag{1}$$

Tel que :

V_m: La tension maximale aux bornes d'un enroulement secondaire du transformateur en [V].

ω: La pulsation ($\omega = 2\pi f$) en [rd/s].

f: La fréquence de la tension du réseau en [Hz].

Les tensions entre phases (les tensions composées) sont exprimées par :

$$\begin{aligned} V_{ac} &= V_a - V_c = \sqrt{3}V_m \cos(\omega t + 30°) \\ V_{bc} &= V_b - V_a = \sqrt{3}V_m \cos(\omega t - 90°) = \sqrt{3}V_m \sin(\omega t) \\ V_{cb} &= V_c - V_b = \sqrt{3}V_m \cos(\omega t + 150°) \end{aligned} \quad (2)$$

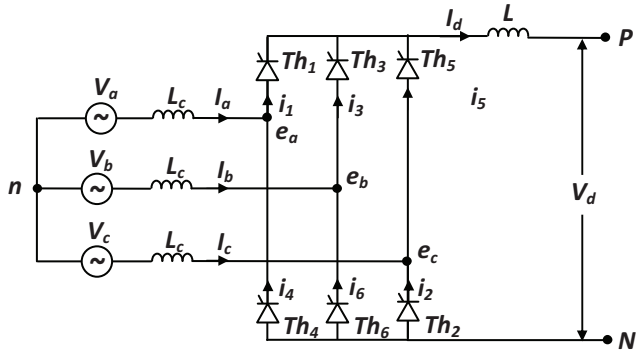


Figure 11 : circuit équivalent pour le convertisseur en pont triphasé.

II.4.2 Principe de fonctionnement en pont triphasé

II.4.2.1 Analyse sans empiètement

— **Sans l'angle d'allumage (amorçage nul)**

Sur la figure 12 (a), on a représente l'allure des tensions V_a, V_b, V_c et de la tension redressée V_d. Nous voyons :

La période entre -120°et 0°, la valve **1** conduit, puisque la tension V_a est plus grand que les tensions V_b, V_c. La période entre -60° et 60°, la valve **2** conduit puisque la tension V_c est plus négative que les tensions V_a, V_b au cours de cette période. Ceci est présenté sur le schéma 12 (b), qui identifie la période de la conduction de chaque valve, et l'importance de la durée du courant dans elle. Également, le courant continu est constante assumée, le courant dans chaque valve et inductance ***L*** en conduisant et en zéro ne conduisant pas.

Maintenant examinons la période où le poids de est entre 0° et 120°. Juste avant l'instant ωt =0°, les valves **1** et **2** conduisent. Juste après l'instant ωt=0°, la tension V_b plus positive que la tension V_a et la valve **3** allume (conduit) : la valve **1** a éteint parce que sa

cathode est maintenant à un potentiel plus élevé que son anode. Proches de 60°, valves **2** et **3** conduisent. A l'instant ωt=60°, la tension V_a est plus négative que la tension V_c, cause la valve **4** allume et la valve **2** a éteint.

A l'instant ωt=120°, V_c est plus positive que V_b, résulte l'allumage de la valve **5** et l'extinction de la valve **3**. De même, à l'instant ωt=180° conduction la commutation de la valve **4** à la valve **6** du commutateur à anode ; à ωt=240° conduction la commutation de la valve 5 A la valve 1 du commutateur à cathode. Ceci accomplit un cycle, et la conséquence continue [9, 32].

Le courant dans chaque phase de la source CA se compose de courants dans les deux valves reliées à cette phase. Par exemple, le courant dans la phase 'a', suivant les indications de la figure 12 (c), est égal à i_1-i_4.

a Tension continue moyenne (la tension redressée)

La tension redressée se compose de six portions de sinusoïdal par période T c.à.d. se compose de segment 60° des tensions entre phases [4]. Par conséquent, la tension continue moyenne peut être trouvée en intégrant les valeurs instantanées de n'importe quelle période 60° [6, 32].

Dénotant le ωt par le θ, et vu la période entre le ωt = - 60° et 0°, la tension continu moyenne sans le retard d'allumage est donnée par:

$$V_{d0} = \frac{3}{\pi}\int_{-60°}^{0} V_{ac} d\theta$$

Remplaçant la tension V_{ac} de l'équation (2), nous obtenons :

$$V_{d0} = \frac{3}{\pi}\int_{-60°}^{0} \sqrt{3}V_m \cos(\theta + 30°)\, d\theta$$

$$= \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m [\sin(\theta + 30°)]_{-60°}^{0}$$

$$= \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m 2\sin 30° = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m = 1.65 V_m \qquad (3A)$$

V_m: La valeur maximale de la tension phase-neutre.

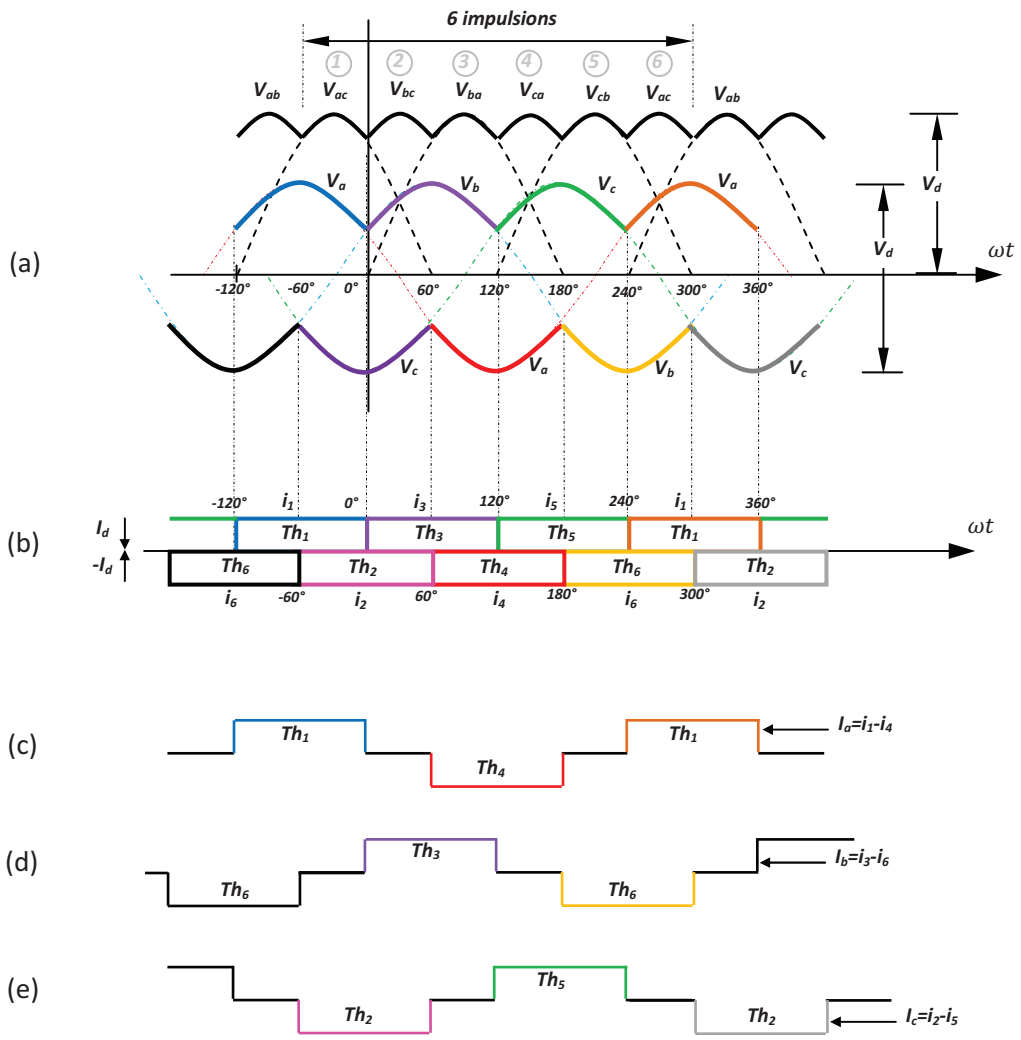


Figure 12 : Formes d'onde des tensions et courants de montage de la figure 11.

(a) Tensions de la source phase-neutre et entre phases.

(b) Courants et périodes de la conduction des valves.

(c) Courant de phase I_a.

(d) Courant de phase I_b.

(e) Courant de phase I_c.

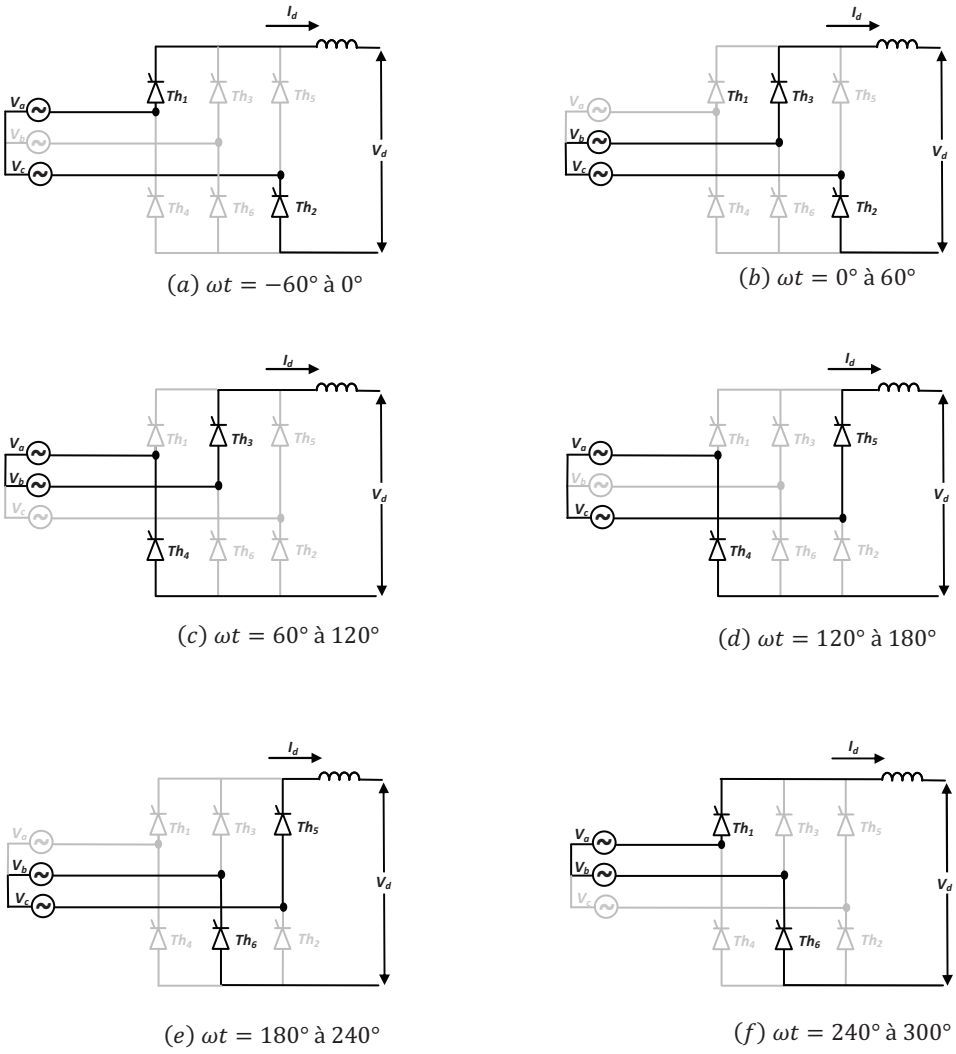


Figure 13: Conséquence de commutation des valves sans retard d'allumage et sans l'angle d'amorçage.

Les tensions phase-neutre (V_{LN}) et tensions entre phases (V_{LL}), l'expression pour V_{d0} devient :

$$V_{d0} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_{LN} = 2.34 V_{LN} \qquad (3B)$$

$$= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} = 1.35 V_{LL} \qquad (3C)$$

V_{d0}: La tension continue sans charge idéale.

— **Avec l'angle d'allumage**

La commande de gâchette utilisée pour retarder l'allumage des valves. Le « angle d'amorçage » est dénoté par α; il correspond à retard de temps de α/ω secondes.

Avec le retard, la valve **3** allume quand $\omega t = \alpha$ (au lieu de $\omega t = 0$), valve **4** quand $\omega t = \alpha + 60°$, valve **5** quand $\omega t = \alpha + 120°$, et ainsi de suite. Ceci est représenté sur la figure 14.

L'angle d'amorçage est limité avec 180°. Si α dépasse 180°, les rater de valve pour allumer. Par exemple, considérer l'allumage de la valve **3.** Avec $\alpha = 0$ (la valve **3** allume A $\omega t = 0$. L'allumage peut être retardé jusqu'à $\omega t = 180°$, Au delà de ceci, la tension V_d n'est plus grande que la tension V_a, et par conséquent la valve **3** n'allumera pas [6, 9, 18].

a Tension continue moyenne

En référence de la figure 10, quand l'angle de retard est égal à α, la tension continue moyenne V_d, est donné par expression suivante :

$$\begin{aligned} V_d &= \frac{3}{\pi}\int_{-(60°+\alpha)}^{\alpha} e_{ac}\, d\theta = \frac{3}{\pi}\int_{-(60°+\alpha)}^{\alpha} \sqrt{3}\, V_m \cos(\theta + 30°)\, d\theta \\ &= V_{d0}\int_{-60°}^{\alpha} \cos(\theta + 30°)\, d\theta = V_{d0}\sin(\theta + 30°)\,|_{\alpha-60°}^{\alpha} \\ &= V_{d0}[\sin(\alpha + 30°) - \sin(\alpha - 30°)] \\ &= V_{d0}(2\sin 30°)\cos\alpha = V_{d0}\cos\alpha \end{aligned} \tag{4}$$

Avec :

V_d: Tension continue moyenne, ou tension redressée;

V_{d0}: Tension redressé pour α = 0 ;

e_{ac}: Valeur efficace de la tension alternative entre phases.

V_m: Valeur maximale de la tension alternative entre phases.

L'équation (II.4) révèle que V_d diminue à mesure que α augmente.

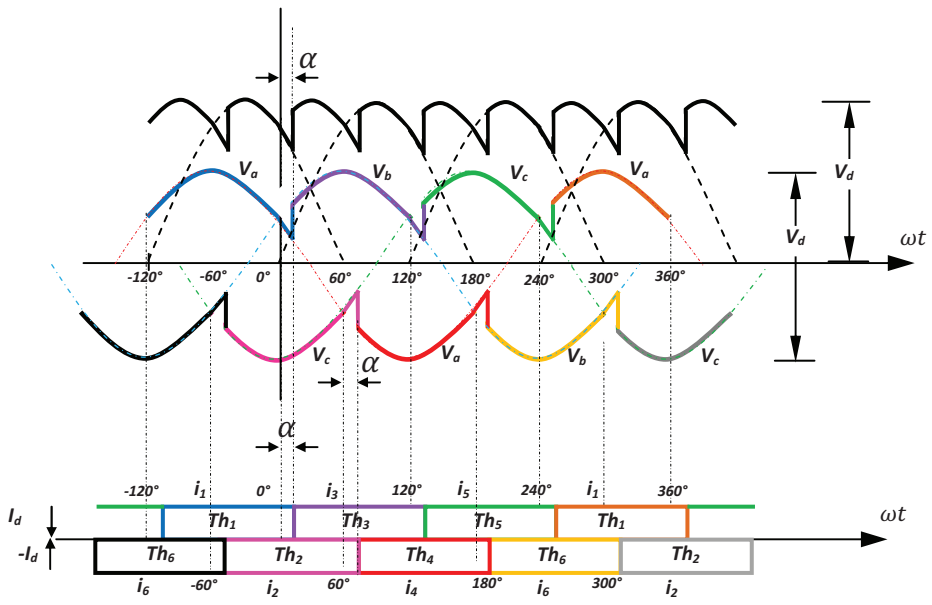
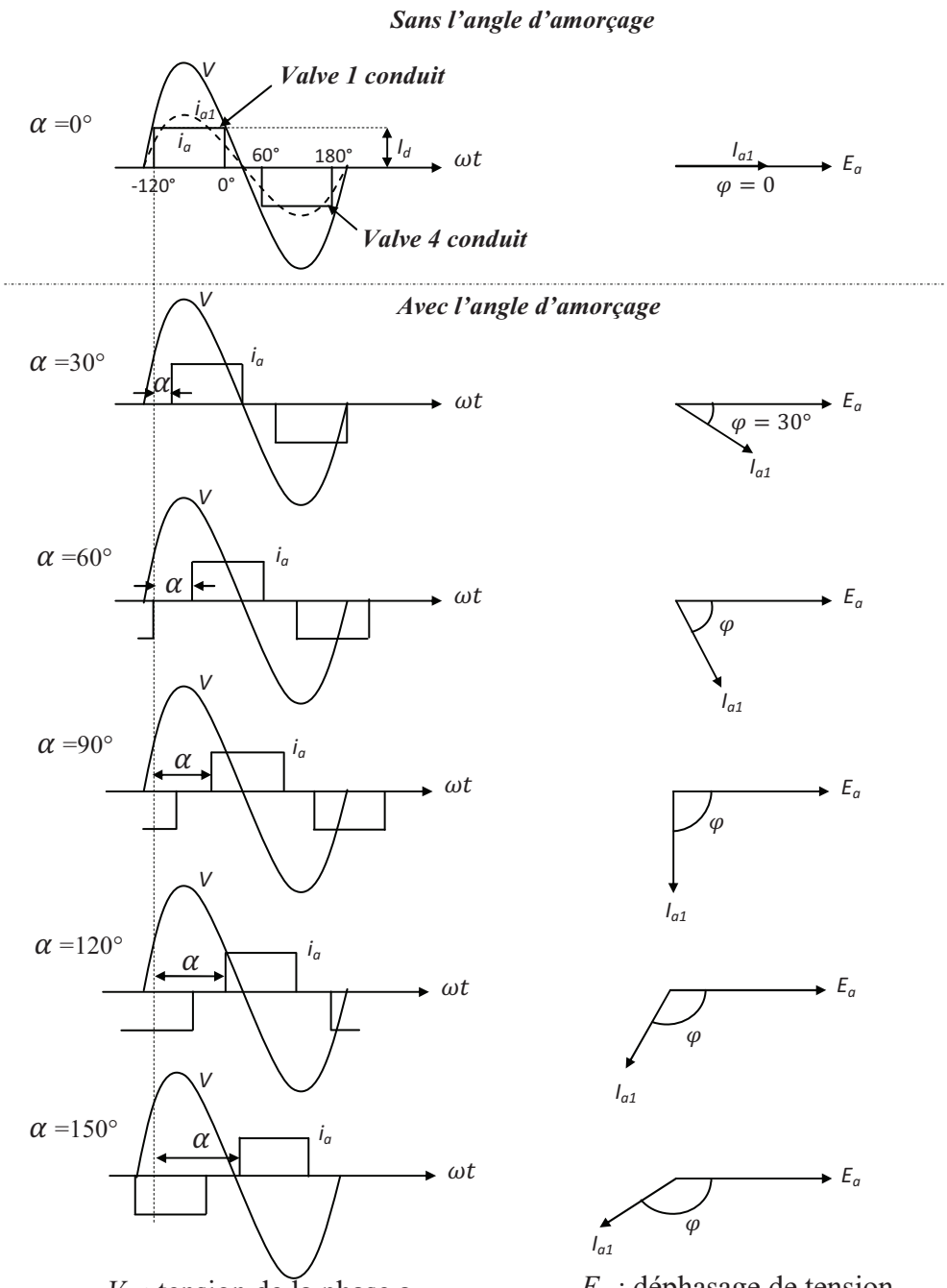


Figure 14: Formes d'onde des tensions et des courants avec l'angle d'amorçage.

b Relations entre le courant CA et le courant CC

Les courants dans les valves **1** à **6** respectifs circulent chacun durant 120º ou de 2π/3 rad. De plus, leur amplitude est constante et égale au courant I_d[4].

A mesure que l'angle α de retard d'allumage est augmenté, le déplacement de déphasage entre la tension alternative et le courant alternatif dans une phase peut être crée également le changement. La forme d'onde du courant (forme rectangulaire) est illustrée sur le schéma 16, se compose des segments liés aux courants dans des valves **1** et **4**.



V_a : tension de la phase a.
i_a : courant de la phase a.
E_a : déphasage de tension.
I_{a1} : déphasage du courant fondamental.

Figure 15: Variation de déphasage entre la tension et le courant de la phase a avec l'angle d'amorçage.

Le courant alternatif fondamental peut être déterminé par l'analyse de Fourier de la forme d'onde, représentée sur la figure 16.

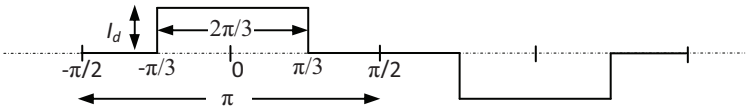


Figure 16: la forme d'onde du courant.

La valeur maximale du courant alternative de ligne s'écrit :

$$I_{Lm} = \frac{2}{\pi}\int_{-\pi/3}^{\pi/3} I_d\, cosxdx = \frac{2}{\pi} I_d sinx|_{-60°}^{60°}$$
$$= \frac{2}{\pi} I_d[\sin(30°) - \sin(-60°)]$$
$$= \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d = 1.11 I_d \qquad (5A)$$

La valeur efficace du courant alternatif fondamental s'écrit:

$$I_{L1} = \frac{I_{Lm}}{\sqrt{2}} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi\sqrt{2}} I_d$$
$$= \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d = 0.78 I_d \qquad (5B)$$

En négligeant les pertes dans les convertisseurs, la puissance active du côté alternatif est égale à la puissance active du côté continu, donc on peut écrire:

$$3V_{LN} I_{L1} cos\varphi = V_d I_d = (V_{d0} cos\alpha) I_d$$

V_{LN}: La valeur efficace de la tension phase-neutre.

φ: L'angle de déphasage entre la tension et le courant fondamental.

Remplaçant V_{d0} de l'équation (3B) et I_{L1} de l'équation (5B), nous trouvons :

$$(3V_{LN}\frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d) cos\varphi = (\frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_{LN} I_d) cos\alpha$$

Donc, le facteur de puissance de l'onde fondamentale est :

$$cos\varphi = cos\alpha \qquad (6)$$

Le terme $\boldsymbol{cos\varphi}$ désigné par quelques auteurs sous le nom «vecteur du facteur de puissance » ou du « facteur de déplacement » [2, 18].

Le convertisseur fonctionne comme un dispositif qui convertit le courant alternatif en courant continu (ou continu en alternatif), donc le rapport du courant reste fixe mais le rapport de tension varie avec le retard d'allumage qui provoquer par la commande de gâchette.

II.4.2.2 Analyse avec empiètement

En raison de l'inductance L_C de la source CA (voir la figure 11), les courants de phase ne peuvent pas changer immédiatement. Par conséquent, le transfert du courant à partir d'une phase à l'autre a besoin d'un temps fini, appelé le temps de commutation ou temps d'empiètement. L'angle d'empiètement ou de commutation est désigné par le signe μ.

Dans l'opération normale, l'angle d'empiètement est moins de 60° ; les valeurs typiques à plaine charge entre la gamme de 15° à 25°. Avec $0° < \mu < 60°$, pendant la commutation trois valves conduisent simultanément. Cependant, entre les commutations conduite de deux valves seulement [9].

Une nouvelle commutation commence à chaque 60° et reste pendant une période angulaire de μ. Par conséquent, la commutation de deux valves sans le retard d'allumage (c.-à-d., α =0) est 60°-μ.

Si $60° < \mu < 120°$, un mode de fonctionnement anormal se produit la conduite d'alternativement trois ou quatre valves [6], ici nous considérera seulement l'opération normale quand le μ est moins de 60°.

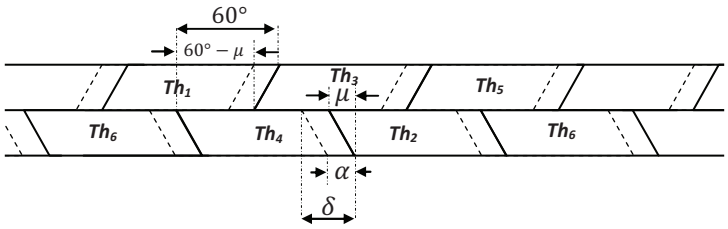
Analysons le phénomène d'empiètement en considérant la commutation de la valve **1** à la valve **3**. La figure 17 montre les périodes de la conduction de valve, quand le retard d'allumage est inclus. La commutation commence quand $\omega t = \alpha$ (angle de retard) et extrémités quand $\omega t = \alpha + \mu = \delta$.

Au début de la commutation $(\omega t = \alpha)$ ⟶ $i_1 = I_d \; et \; i_3 = 0$

A la fin de la commutation $(\omega t = \alpha + \mu = \delta)$ ⟶ $i_1 = 0 \; et \; i_3 = I_d$

Avec :

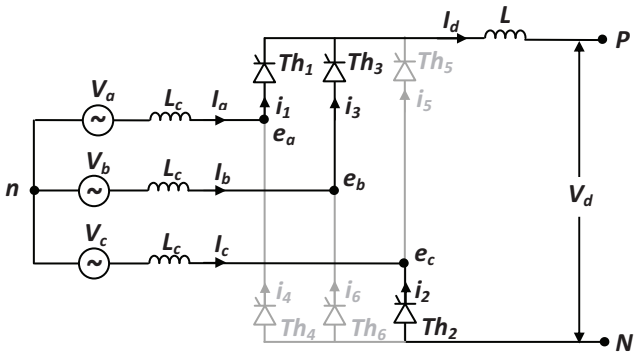
δ: est l'angle d'extinction (égale à la somme de l'angle de retard α et angle de commutation μ).



La figure 17 : période de la conduction de valve avec l'empiètement.

La figure 18 montre le circuit équivalent de convertisseur pendant la commutation, les valves **1**, **2** et **3** conduisent. Donc, la tension de commutation de la valve **1** à la valve **3** est donnée par expression suivante [33]:

$$V_b - V_a = L_c \frac{di_3}{dt} - L_c \frac{di_1}{dt} \tag{7}$$



Le schéma 18 : circuit équivalent de convertisseur pendant la commutation.

La tension $V_b - V_a$ s'appelle «la tension de commutation». De l'équation (2), elle est égale A $\sqrt{3}V_m \sin\omega t$. Donc on peut écrire :

$$\sqrt{3}V_m \sin\omega t = L_c \frac{di_3}{dt} - L_c \frac{di_1}{dt}$$

La somme de i_1 et i_3 pendant la commutation est égale au courant continu I_d, donc :

$$i_1 + i_3 = I_d \Rightarrow \frac{di_1}{dt} + \frac{di_3}{dt} = \frac{dI_d}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{di_1}{dt} = -\frac{di_3}{dt}$$

Donc,

$$V_b - V_a = \sqrt{3}\mathrm{V_m}\sin\omega t = 2L_c\frac{di_3}{dt} \qquad (7A)$$

Ou,

$$\frac{di_3}{dt} = \frac{\sqrt{3}\mathrm{V_m}}{2L_c}\sin\omega t \qquad (7B)$$

On prenant une intégrale définie (concerne le temps t), la limite inférieure est commencement de la commutation ($\omega t = \alpha$ ou $t = {}^{\alpha}/_{\omega}$) et la limite supérieure du courant, donc :

$$\int_0^{i_3} di_3 = \frac{\sqrt{3}\mathrm{V_m}}{2L_c}\int_{\alpha/\omega}^{t} \sin\omega t\, dt$$

Le résultat de l'intégration est :

$$i_3 = \frac{\sqrt{3}V_m}{2\omega L_c}(cos\,\alpha - cos\,\omega t) \qquad (8)$$

A la fin de la commutation, ($\omega t = \alpha + \mu = \delta$) et $i_1 = 0\ et\ i_3 = I_d$.
En remplaçant les valeurs de $\omega t = \alpha + \mu\ et\ i_3 = I_d$ dans la relation (8), on obtient :

$$I_d = \frac{\sqrt{3}\mathrm{V_m}}{2\omega L_c}(\cos\alpha - \cos(\alpha + \mu)) \qquad (9)$$

a Chute de tension redressée [9, 33]

Pendant la commutation,

$$e_a = e_b = V_b - \frac{V_b - V_a}{2}$$

$$e_a = e_b = \frac{e_a + e_b}{2}$$

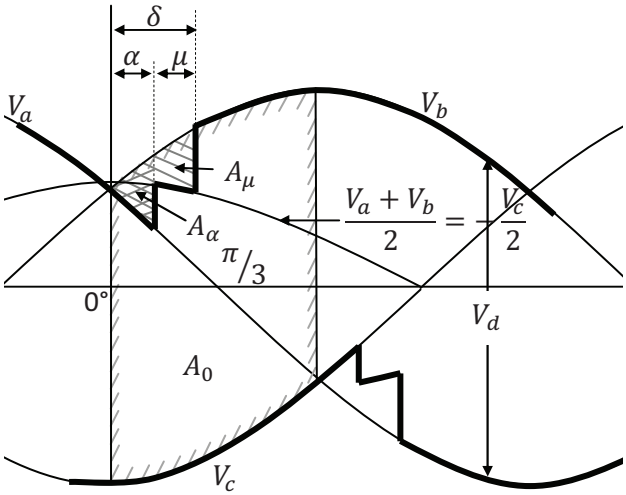


Figure 19: formes d'onde de tension présentant le phénomène d'empiètement pendant la commutation de la valve **1** à la valve **3**.

A cause de l'empiètement, la tension de la borne **P** (voir la figure 18) juste après de $\omega t = \alpha$ reprend $(V_a + V_b)/2$, au lieu de V_b. En conséquence, le phénomène d'empiètement est mesuré par soustraction l'aire A_μ de l'aire A_0, une fois chaque 60° (π/3 rad) comme le montre la figure 19.

$$A_\mu = \int_\alpha^\delta \left(V_b - \frac{V_a + V_b}{2}\right) d\theta = \int_\alpha^\delta \left(\frac{V_b - V_a}{2}\right) d\theta$$

$$A_\mu = \frac{\sqrt{3}V_m}{2} \int_\alpha^\delta sin\theta \, d\theta = \frac{\sqrt{3}V_m}{2} (cos\alpha - cos\delta)$$

La chute de tension moyenne correspondante (due à l'empiètement) est donnée par :

$$\Delta V_d = \frac{A_\mu}{\pi/3} = \frac{3}{\pi} \frac{\sqrt{3}V_m}{2} (cos\alpha - cos\delta)$$

$$\Delta V_d = \frac{V_{d0}}{2} (cos\alpha - cos\delta) \qquad (10)$$

Donc :

$$\frac{\sqrt{3}V_m}{2} (cos\alpha - cos\delta) = I_d \omega L_c$$

On remplace dans l'équation (10) donne :

$$\Delta V_d = \frac{3}{\pi} I_d \omega L_c \tag{11}$$

Avec l'empiètement de commutation et le retard d'allumage, la réduction de la tension continue est représentée par des aires A_α et A_μ; la tension continue est donnée par :

$$\begin{aligned} V_d &= V_{d0} cos\alpha - \Delta V_d \\ &= V_{d0} cos\alpha - R_c I_d \end{aligned} \tag{12}$$

Où :

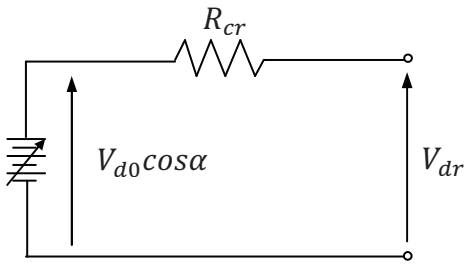
$$R_c = \frac{3}{\pi}\ \omega L_c = \frac{3}{\pi} X_c$$

R_c: S'appelle la résistance équivalente de commutation (la chute de tension due à la commutation). Cependant, elle ne représente pas une vraie résistance et ne consomme aucune puissance.

X_c : La réactance de commutation.

— **Opération de redresseur**

Le circuit équivalent du pont redresseur basé sur l'analyse ci-dessus est donné sur le schéma 20. La tension et le courant continu dans le circuit équivalent sont les valeurs moyennes. La tension interne est une fonction de l'angle d'allumage α. μ l'angle d'empiètement n'apparaît pas explicitement dans le circuit équivalent ; le phénomène d'empiètement est représenté par R_{cr}. Les formes d'onde de tension et les périodes de la commutation de valve pour le mode de fonctionnement de redresseur, sont présentés dans la figure 21(a).



$$R_{cr} = \frac{3}{\pi} X_{cr}$$

$$V_{d0} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m$$

La figure 20 : circuit équivalent de pont redresseur.

Pour la description de l'opération de redresseur, nous utilisons les angles suivants [6, 9] :

α : L'angle d'allumage (angle d'amorçage).

μ : L'angle d'empiètement.

δ : L'angle d'extinction, égal $(\alpha + \mu)$.

— **Opération d'onduleur**

L'équation $V_d = V_{d0}\cos\alpha$ (sans empiètement) indique que la tension V_d devient négative lorsque l'angle d'amorçage est retardé de plus de 90º.

Avec l'empiètement: $V_d = V_{d0}\cos\alpha - \Delta V_d$

On remplace ΔV_d par l'équation (10), on obtient :

$$V_d = V_{d0}\cos\alpha - \frac{V_{d0}}{2}(cos\alpha - cos\delta)$$

$$V_d = \frac{V_{d0}}{2}(cos\alpha + cos\delta) \qquad (13)$$

La valeur transitoire de l'angle d'amorçage α_T dans le côté onduleur est montrée par :

$$cos\alpha_T + cos\delta_T = 0$$

Or :

$$\alpha_T = \pi - \delta_T = \pi - (\alpha_T + \mu)$$

$$\alpha_T = \frac{\pi - \mu}{2} \qquad (14)$$

L'effet de l'empiètement réduit α_T *entre* 90° et 90°- $\mu/2$.

Puisque les thyristors conduisent dans une direction seulement, le courant dans un convertisseur ne peut pas être renversée. L'inversion de puissance peut seulement être obtenue par l'inversion de la tension continue V_d.

Pour l'inversion soit possible, les valeurs élevées d'inductance doivent être considérable et l'angle d'amorçage $\alpha \geq 90°$, puisque la tension V_d change la polarité à cet angle. Le retard théorique maximal admissible pour l'angle $\alpha = 180°$.

La figure 21(b) présente les formes d'onde de tension et les périodes de la conduction de valve pour le mode de fonctionnement d'onduleur. Pour la commutation réussie, le changement de la valve éteint à la valve allume doit être complet avant que la tension de commutation devienne négative. Par exemple, la commutation de la valve **1** à la valve **3** est possible seulement quand la tension V_b est plus positif que la tension V_a; le changement du courant de la valve **1** à la valve **3** doit être complet avant que la tension V_a devienne plus positif que la tension V_b avec la suffisamment de marge pour tenir compte du dé-ionisation de valve.

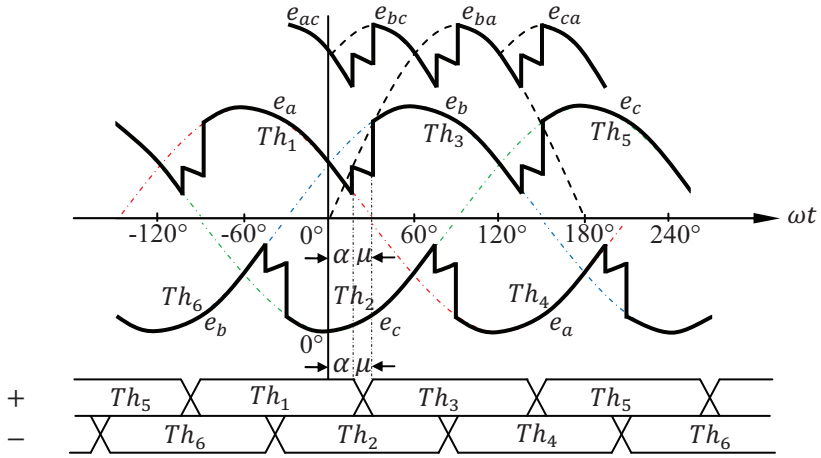
Les relations entre α, β, δ et γ sont données par les expressions suivantes :

$\beta = \pi - \alpha$: Angle d'allumage de l'avance.

$\gamma = \pi - \delta$: Angle d'extinction.

μ : Angle d'empiètement, égal $(\delta - \alpha = \beta - \gamma)$.

(a) Mode redresseur :



(b) Mode onduleur :

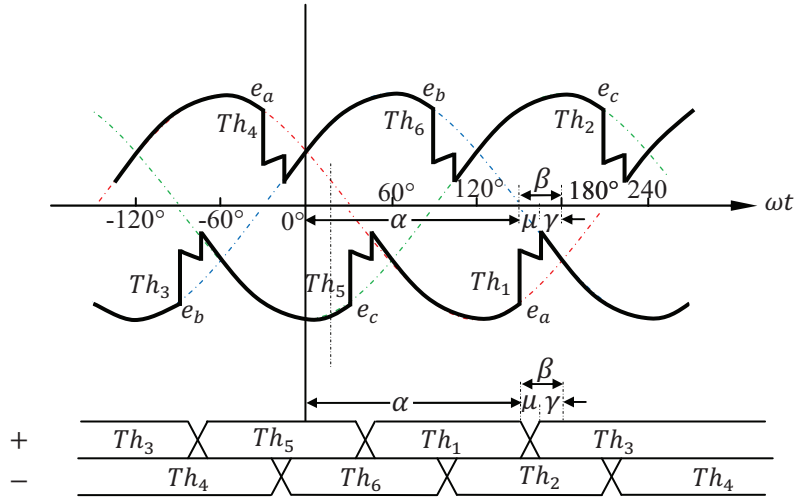


Figure 21: Formes d'onde des tensions et les périodes de la conduction de valve.

Dans la pratique, on peut définir une période de retard d'allumage α pour le redresseur. Mais, dans le côté d'onduleur nous définissons $\beta = \pi - \alpha$ comme l'angle d'allumage ou l'angle de l'avance. De même l'angle d'extinction est également défini par $\gamma = \pi - \delta$. La définition de l'angle μ de commutation est variable. Ainsi $\beta = \gamma + \mu$.

On substitue les données suivantes $\cos\alpha = -\cos\beta$ et $\cos\delta = -\cos\gamma$, dans les équations (9) et (13) pour écrire en termes de γ et β :

$$I_d = \frac{\sqrt{3}V_m}{2\omega L_c}(\cos\gamma - \cos\beta) \tag{15}$$

$$\mathrm{V_d} = -\frac{V_{d0}}{2}(\cos\beta + \cos\gamma) \tag{16}$$

Ou :

$$\mathrm{V_d} = -[\mathrm{V_{d0}}\cos\beta + R_c I_d] \tag{17A}$$

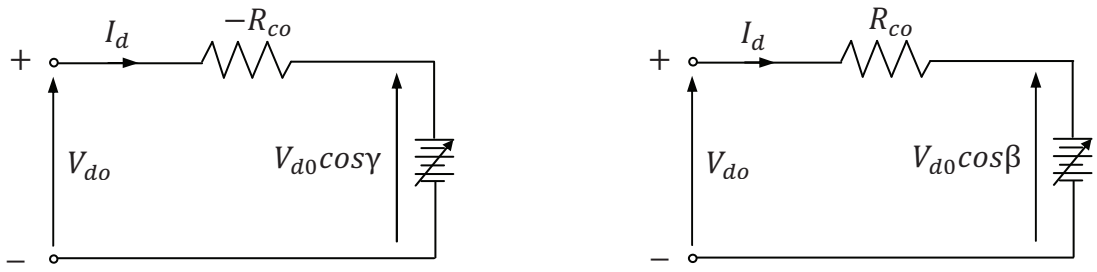
Ou :

$$\mathrm{V_d} = -[\mathrm{V_{d0}}\cos\gamma - R_c I_d] \tag{17B}$$

Avec :

$$R_c = \frac{3}{\pi}X_c \text{ et } V_{d0} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi}V_m$$

La figure 22, présente le circuit équivalent de l'onduleur.



(a) En terme γ. (b) En terme β.

La figure 22: circuit équivalent de l'onduleur.

e Relation entre le CA et les quantités de CC

De l'équation (13), la tension continue moyenne V_d est donnée par:

$$V_d = V_{d0} cos\alpha - \Delta V_d = \frac{V_{d0}}{2}(cos\alpha + cos\delta) \qquad (18A)$$

En remplaçant V_{d0} de l'équation (3B), l'expression pour V_d devient :

$$V_d = \frac{3\sqrt{6}}{\pi}\frac{cos\alpha + cos\delta}{2}V_{LN} \qquad (18B)$$

En négligeant les pertes dans les convertisseurs, la puissance active du côté alternatif est égale à la puissance active du côté continu, donc on peut écrire:

$$P_{C.A} = P_{C.C}$$

Ou :

$$3V_{LN}I_{L1}cos\varphi = V_d I_d$$

De l'équation (18B), on peut écrire:

$$3V_{LN}I_{L1}cos\varphi = \frac{3\sqrt{6}}{\pi}\frac{cos\alpha + cos\delta}{2}V_{LN}I_d$$

Donc:

$$I_{L1}cos\varphi = \left(\frac{\sqrt{6}}{\pi}I_d\right)\left(\frac{cos\alpha + cos\delta}{2}\right) \qquad (19)$$

f Expressions approximatives

De l'équation (19) avec $\mu = 0$, on trouve :

$$I_{L1} \approx \frac{\sqrt{6}}{\pi}I_d \qquad (20)$$

L'expression du facteur de puissance devienne :

$$cos\theta \approx \frac{cos\beta + cos\gamma}{2} \qquad (21)$$

L'approximation de l'équation (18A) :

$$V_d \approx V_{d0}cos\varphi \qquad (22A)$$

Donc :

$$cos\varphi \approx \frac{\mathrm{V_d}}{\mathrm{V_{d0}}} \qquad (22B)$$

On divise l'équation (11) par V_{d0} on trouve :

$$cos\varphi \approx cos\alpha - \frac{R_c I_d}{V_{d0}} \qquad (23)$$

En remplaçant V_{d0} de l'équation (3A) dans l'équation (22A), nous obtenons :

$$V_d \approx \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_{LN} cos\varphi \qquad (24)$$

II.5 Utilisation d'un convertisseur à deux ponts (12 impulsions)

II.5.1 Structure

Deux ponts ou plus sont reliés en série pour obtenir la tension continue qui demander. Les ponts sont raccordés en série du côté CC et en parallèle du côté CA un transformateur est raccordé entre la source CA et le convertisseur en pont de Graëtz.

Dans la pratique, un pont de 12 impulsions peut être construit en reliant deux ponts de 6 impulsions [33]. Deux transformateurs, un d'une structure d'enroulement Y-Y et l'autre d'une structure d'enroulement Y-Δ, suivant la figure 5.

II.5.2 Rôle de raccordement

Le but d'utilisation des transformateurs pour délivrer des tensions triphasées est d'assurer au deux ponts reliés en série un décalage de 30° entre elle [21]. Les convertisseurs doivent fournir des courants continus identiques afin que les courants alternatifs qu'ils prélèvent sur les secondaires des transformateurs aient les mêmes valeurs [26].

La figure 23 montre la forme des ondes pour les deux ponts de la côté alternatif, ajoutent de produire une forme d'onde qui est plus sinusoïdale que les ondes courants pour chacun des 6 impulsions du pont. Ceci réduit le coût de filtres harmoniques de manière significative.

En outre, avec un arrangement de pont de 12 impulsions, l'ondulation de tension CC est réduite; on élimine les sixièmes et dix-huitième harmoniques (Un pont à 6

impulsions engendre des harmoniques de l'ordre de 6K plus ou moins 1. Tandis qu'un pont à 12 impulsions engendre des harmoniques de l'ordre de 12K plus ou moins 1, K est un entier) [15].

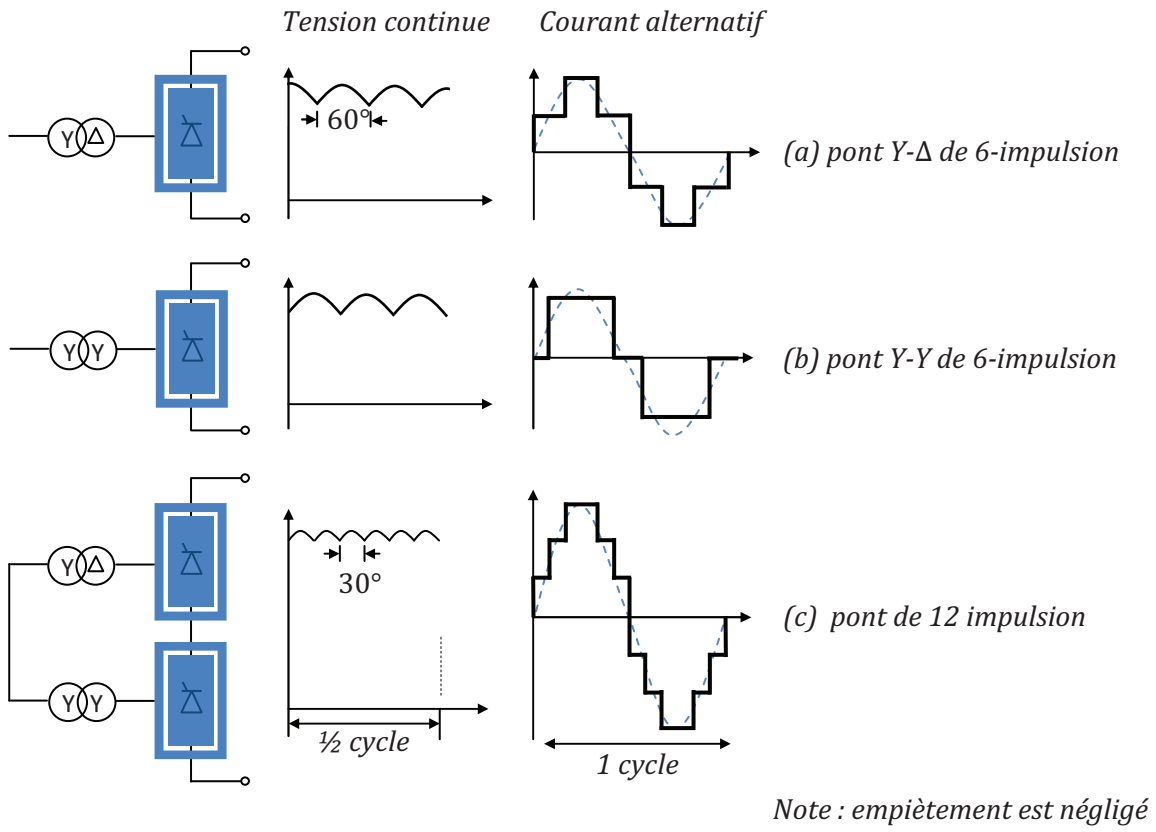


Figure 23: forme d'onde continue de tension et de courant alternatif.

II.6 Conclusion

On a décrit brièvement dans le présent le fonctionnement des liaisons à courant continu à thyristors. Certes le principe de fonctionnement de la technologie CCHT est essentiel, mais en peut ne pas aboutir sans comprendre comment garder et surveiller la stabilité de ce bon fonctionnement. Dans le chapitre qui suivra on propose le principe de base de la commande des liaisons CCHT et le réglage du transit de la puissance, et les différentes hiérarchies du système de contrôle.

Chapitre III

Contrôle des liaisons de transport à courant continu

Chapitre III

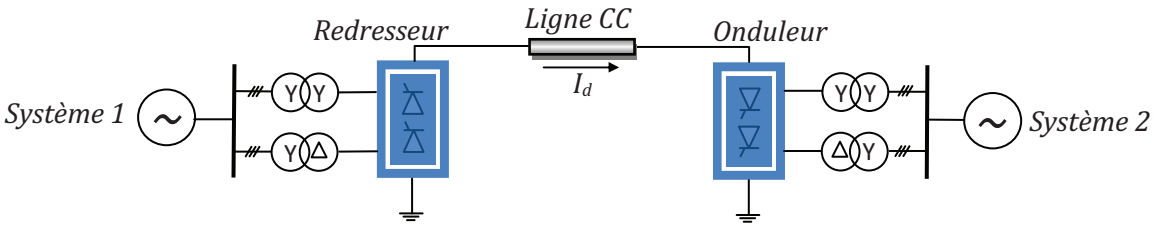
Contrôle des liaisons de transport à courant continu

III.1 Introduction

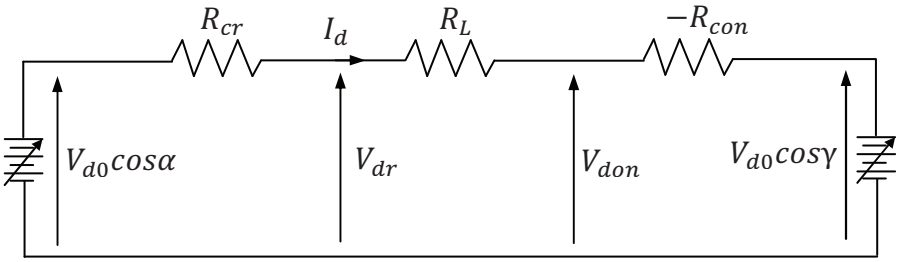
Un système de transport CCHT est facilement contrôlable. Son utilisation efficace dépend d'une utilisation appropriée de cette contrôlabilité pour assurer les performances requises du système d'alimentation. Avec l'objectif d'assurer un fonctionnement efficace et stable et en maximisant la flexibilité du contrôle de puissance sans pour autant compromettre la sécurité des équipements, différents niveaux de contrôle sont utilisés de manière hiérarchique. Dans cette partie, nous allons décrire les principes de fonctionnement de ces contrôles, leur mise en œuvre et leur performance dans des conditions normales et anormales du système [9].

III.2 Principes de base de contrôle

La figure 24 représente une liaison CCHT monopolaire ou un pôle d'une liaison bipolaire et le circuit équivalent correspondant [32, 38].



(a) liaison CCHT monopolaire.



(b) circuit équivalent.

Figure 24: Diagramme schématique.

L'écoulement du courant continu du redresseur et de l'onduleur est :

$$I_d = \frac{V_{d0r}\ cos\alpha - V_{d0on}\ cos\gamma}{R_{cr} + R_L - R_{con}} \tag{25}$$

La puissance aux bornes du redresseur est :

$$P_{dr} = V_{dr} I_d \tag{26}$$

et à la borne de l'onduleur est :

$$P_{don} = V_{don} I_d = P_{dr} - R_L I_d^2 \tag{27}$$

III.3 Moyens de base de commande

La tension continue à un point quelconque sur la ligne et le courant (ou puissance) peut être commandée en contrôlant les tensions internes ($V_{dor}\ cos\alpha$) et *($V_{dor}\ cos\gamma$).* Ceci est accompli par la commande de gâchette des les angles d'allumage de leurs valve ou la commande de la tension CA par des changeurs de prises du transformateur.

La commande des valves (commande rapide : 1 à 10 ms), et des changeurs de prises du transformateur (commande lente : 5 à 6 s par étape), sont utilisés de manière complémentaire [32].

La commande des valves sont utilisées initialement pour une action rapide, suivie par des changeurs de prises pour rétablir les quantités de convertisseur (α pour le redresseur et le γ pour l'onduleur) à leur gamme normale.

L'inversion de puissance est obtenue par inversion de la polarité des tensions continues à ses deux extrémités.

III.3.1 Réglage rapide par les angles

Un convertisseur doit réguler plusieurs de ses paramètres (maintenir les angles α et γ supérieurs à des seuils donnés : tension et courant continus dans des plages données) avec une seule variable de commande (α ou γ), aussi il faut choisir lequel des paramètres sera régulé.

La façon de procéder classique est de faire fonctionner plusieurs régulations en même temps, d'associer à chacune un coefficient de pondération et de choisir celle qui est la plus importante pour le système. Ces régulations fonctionnent dans un seul sens en général: la régulation d'angle α minimum ne fonctionne que si l'angle est inférieur à sa valeur minimale, elle est inhibée dans le cas contraire.

Le choix des coefficients de pondération permet de classer les régulations entre celles qui sont importantes et celles qui sont vitales pour le convertisseur. Un système de vote (par choix de la régulation présentant l'erreur pondérée maximale) permet de placer le convertisseur dans le mode approprié pour son bon fonctionnement.

Le convertisseur peut fonctionner dans les modes suivants, dont pas tous sont implémentés dans le contrôle-commande:

— réglage en fonctionnement redresseur de l'angle d'amorçage minimal α_{min} (A.A.M): l'amorçage de valves constituées de plusieurs thyristors en série nécessite une tension minimale à leurs bornes, il est donc primordial de s'assurer que l'angle d'amorçage n'est pas trop faible ;

— réglage en fonctionnement onduleur de l'angle d'extinction minimal γ_{min} (A.E.M): si l'angle de garde est trop faible, la moindre variation de tension entraînera un défaut de commutation, donc l'arrêt de la liaison ; il est donc primordial de s'assurer que l'angle de garde n'est pas trop faible ;

— réglage de la tension continue V_d par l'un des convertisseurs ;

— réglage du courant continu I_d par l'autre convertisseur ;

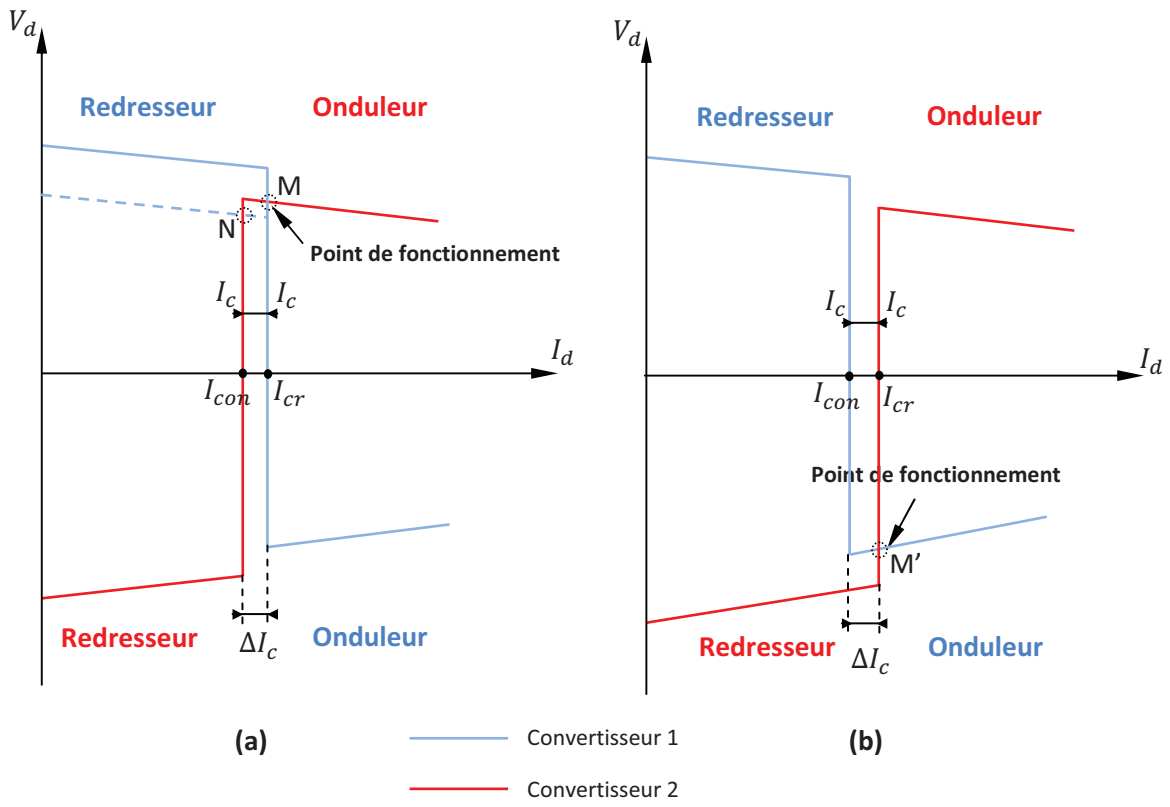
— réglage de la tension continue V_d par le convertisseur qui régule le courant, au cas où la tension dépasserait de beaucoup la tension nominale ; cette régulation ne se déclenche qu'en cas de problème (tension > 110 % de sa valeur nominale, par exemple) ;

— réglage du courant continu I_d par le convertisseur qui régule la tension, au cas où le courant tomberait sous 90 % de sa valeur de consigne; cette régulation ne se déclenche qu'en cas de court-circuit et permet d'en limiter les conséquences.

C'est en général le convertisseur fonctionnant en onduleur qui régule la tension continue. La consigne de courant de l'onduleur, qui n'est sollicitée que lors de défauts, est déduite en retranchant la marge de courant de la consigne de courant du redresseur :

$$I_{con} = I_{cr} - \Delta I_c \tag{28}$$

La marge de courant ΔI_c est une valeur fixe souvent prise égale à 10 % de la valeur nominale.



I_d: Courant continu
I_{con}: Consigne de courant à l'extrémité onduleur
I_{cr}: Consigne de courant à l'extrémité redresseur
V_d: Tension continue
ΔI_c: Marge de courant

Figure 25: Liaison à courant continu point à point : principe fondamental de réglage.

- **Au point M :** Le redresseur contrôle le courant CC, l'onduleur contrôle la tension en mode (A.E.M).
- **Au point N :** (chute de tension considérable) le redresseur contrôle la tension en mode (A.A.M) et l'onduleur contrôle le courant CC.
- **Au point M' :** Pour inverser le sens de la puissance, il suffit de déplacer la caractéristique du convertisseur 1 légèrement vers la gauche (en inversant le sens de la marge de courant). La figure 25(b). montre alors que le point de fonctionnement change ; la tension V_d devient négative, alors que le courant I_d reste toujours positif.

Ce type de réglage nécessite un canal de communication entre les deux stations car la consigne de courant de l'onduleur est calculée en fonction de celle du redresseur [11,32].

Les différents modes de fonctionnement sont représentés par des droites dans le plan (V_d;I_d) de la figure 25.

III.3.2 Réglage lent par les régleurs en charge

Le contrôle des angles d'amorçage et de garde permet de faire fonctionner les convertisseurs de la liaison sur des points particuliers de leurs caractéristiques $V_d = f(I_d)$ (figure 25(a)), mais ceci se fait au prix d'une plage de variation très grande de ces angles. Le fonctionnement à grand angle d'un convertisseur induit des effets indésirables (échauffement des snubbers, consommation de puissance réactive) qu'il faut limiter. C'est pourquoi un autre réglage coexiste avec celui des angles ; c'est le **contrôle des tensions alternatives en entrée de convertisseur [11]**.

Les transformateurs de convertisseurs sont munis de régleurs en charge dont le but est d'adapter la tension alternative secondaire (celle qui est en entrée de convertisseur) au point de fonctionnement de consigne de façon à ramener les angles α et γ dans une plage donnée.

Ainsi, les convertisseurs ne fonctionnent à grands angles que pendant les changements brusques de consigne, le temps que les régleurs ramènent les angles dans les plages nominales.

Le facteur de puissance est étudié dans le chapitre II, et données par les formules suivantes [4]:

Pour fonctionnement redresseur :

$$\cos\theta \approx 0.5\ [\cos\alpha + \cos(\alpha + \mu)] \qquad (29)$$

Pour fonctionnement onduleur :

$$\cos\theta \approx 0.5\ [\cos\gamma + \cos(\gamma + \mu)] \qquad (30)$$

Il faut toujours maintenir assez grande la valeur du facteur de puissance pour les raisons suivantes [11] :

- Eviter une consommation excessive de la puissance réactive par les convertisseurs.
- Rendre la puissance délivrée par les convertisseurs aussi élevée que possible.
- Abaisser les pertes et les contraintes sur les valves.

III.4 Hiérarchie du système de contrôle [4, 9]

La hiérarchie de contrôle varie d'un système continu à l'autre, mais les concepts généraux sont communs. Figure 26 illustre la hiérarchie des contrôles d'un système CCHT typique bipolaire. Le système de contrôle est divisé en trois niveaux: commande du pont ou l'unité du convertisseur, contrôle du pôle, et la commande principale.

Niveau 01 : commande du pont ou l'unité du convertisseur établit les instants d'allumages et analyse les limites pour les angles d'amorçages α_{min} et γ_{min}. Le contrôle du convertisseur, est la réponse rapide dans la hiérarchie de contrôle.

Niveau 02 : Le contrôle de pôle coordonne le contrôle des ponts dans un pôle. La conversion des commandes en cours le courant de consigne en un angle d'allumage qui doit être contrôlez la commande des changeurs de prises, et des séquences certaine protection est assurée par le contrôle pôle. Cela comprend la coordination de la mise en service, le déblocage, et l'équilibrage des commandes du pont.

Niveau 03 : Le contrôle principal détermine la valeur du courant de consigne et coordonne des signaux de commande à tous les pôles. Il interprète les demandes plus larges pour contrôler le système CCHT en fournissant une interface entre les contrôles pole et le

contrôle global du système. Cela comprend la planification des flux de puissance déterminée par le centre de contrôle et de stabilisation du système alternatif.

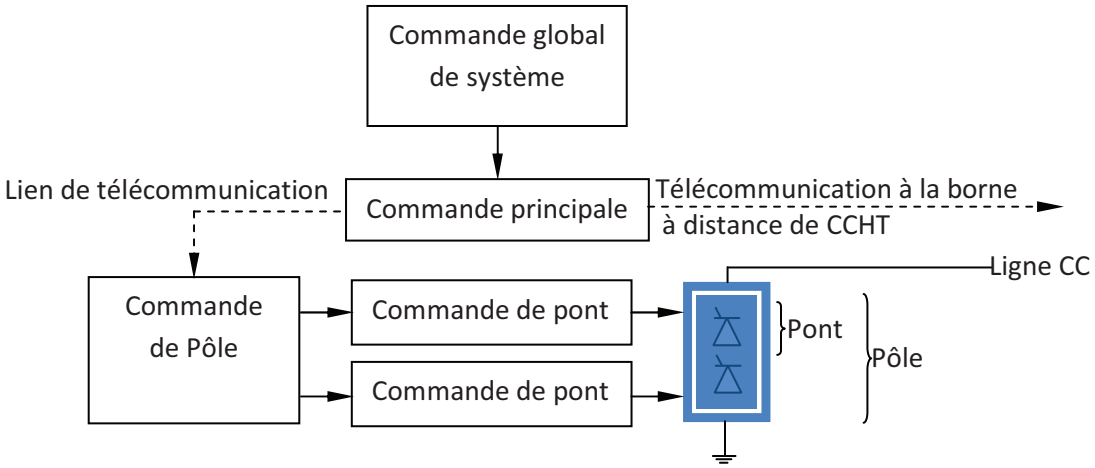


Figure 26: Hiérarchie de différentes commandes de système CCHT.

III.5 Conclusion

Lorsqu'une liaison CCHT interconnecte deux réseaux asynchrones et qu'une interruption brusque de production dans un des réseaux entraîne un niveau de fréquence et/ou de tension anormal, la liaison peut automatiquement adapter sa puissance transitée pour soutenir le réseau perturbé. Le transit de puissance est limité pour ne pas mettre en péril l'intégrité du réseau amont.

Le chapitre suivant, sera consacré sur un phénomène qui peut être un cause dangereux pour le matériel des liaisons et menaçant la stabilité de tout le système électrique, phénomène qui créées par les poste de conversion (les convertisseurs) s'appel **des harmoniques**, cette partie abordera, leurs causes, leurs effets ainsi que leurs remèdes.

Chapitre IV

Méthodes de minimisation des perturbations harmoniques dans un système CCHT

Chapitre IV

Méthodes de minimisation des perturbations harmoniques dans un système CCHT

IV.1 Introduction

Le système CCHT, contenant en général des éléments d'électronique de puissance (les convertisseurs sont vus comme étant des charges non linéaires qui injectent des courants harmoniques sur le réseau électrique) pour se raccorder au réseau, 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. Les courants non sinusoïdaux absorbés par la charge non linéaire la plus répandue : le convertisseur à thyristors. [3]

Des harmoniques sont associés à la déformation équilibrée de forme d'onde des courants et des tensions.

Les harmoniques sont des composants qui composent une forme d'onde où chaque composant a une fréquence qui est un multiple intégral de la fréquence fondamentale. L'harmonique de limite est normalement appliqué aux composants de forme d'onde qui ont des fréquences autres que la fréquence fondamentale. Pour un système 50 hertz ou 60Hz la fréquence fondamentale est 50HZ ou 60Hz. Une forme d'onde qui contient tous les composants autres que la fréquence fondamentale est non-sinusoïdale et considérée être tordue.

Dans ce chapitre, nous allons présenter des généralités sur les harmoniques dans le système CCHT, Sensibilité de la génération des harmoniques à divers facteurs.

Ensuite, nous présentons les solutions classiquement mises en œuvre pour dépolluer les réseaux électriques.

IV.2 Définition

L'analyse de Fourier permet de quantifier la distorsion harmonique d'un signal. Un signal périodique (de tension ou de courant) de forme quelconque et de fréquence f_0 se décompose en une somme de signaux sinusoïdaux dont chacun a une fréquence dite harmonique qui est un multiple entier de la fréquence fondamentale f_0.

Ce multiple est appelé **rang harmonique**. L'amplitude d'une composante harmonique est généralement exprimée en pourcentage de la grandeur fondamentale correspondante c'est le **taux d'harmoniques**.

IV.3 Origine des distorsions

Les appareils électroniques sont les principaux responsables de la pollution harmonique, mais les autres charges du réseau peuvent également y contribuer.

IV.3.1 Émission en tension

Les réacteurs et les transformateurs saturés sont des **sources de tensions harmoniques**. Les niveaux harmoniques produits par ces sources restent toujours inférieurs au pour-cent.

IV.3.2 Émission en courant

Les charges non linéaires se comportent comme des **sources de courants harmoniques**, en ce sens que les courants émis ne dépendent pas de l'impédance du réseau. Chaque source d'harmoniques est caractérisée par le **spectre** du courant qu'elle absorbe.

Les redresseurs triphasés à 6 thyristors (ponts de Graëtz) produisent des courants harmoniques de rangs $n = 6k \pm 1$ (k en entier).

Les ponts à 12 thyristors produisent les rangs de la forme $n = 12k \pm 1$ (k entier).

Les courants harmoniques émis par les convertisseurs à filtrage capacitif sont généralement beaucoup plus intenses.

IV.4 Effet et caractéristique des perturbations harmoniques [43]

La présence d'harmoniques de courant ou de tension conduit à des effets néfastes sur le réseau de distribution, comme par exemple:

— L'échauffement des conducteurs, des câbles, des condensateurs et des machines dû aux pertes cuivre et fer supplémentaires.

— L'interférence avec les réseaux de télécommunication, causée par le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et les réseaux de télécommunication qui peut induire dans ces derniers des bruits importants.

— Le dysfonctionnement de certains équipements électriques comme les dispositifs de commande et de régulation. En présence d'harmoniques, le courant et la tension peuvent changer plusieurs fois de signe au cours d'une demi-période. Par conséquent, les équipements sensibles au passage par zéro de ces grandeurs électriques sont perturbés.

— Les phénomènes de résonance. Les fréquences de résonance des circuits formés par les inductances du transformateur et les capacitances des câbles sont normalement assez élevées, mais celles peuvent coïncider avec la fréquence d'un harmonique. Dans ce cas, il y aura une amplification importante qui peut détruire les équipements raccordés au réseau.

— La dégradation de la précision des appareils de mesure.

—Des perturbations induites sur les lignes de communication, rayonnement électromagnétique notamment.

Différents critères sont définis pour caractériser ces perturbations. Le THD et le facteur de puissance sont les plus employés pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de puissance réactive. Le THD représente le rapport de la valeur efficace des harmoniques à la valeur efficace du fondamental. Il est défini par la relation :

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{X_n^2}{X_1^2}} \tag{31}$$

Avec X soit un courant, soit une tension. X_1 la valeur efficace du courant fondamental et X_n les valeurs efficaces des différentes harmoniques du courant.

IV.5 Sensibilité de la génération des harmoniques à divers facteurs

IV.5.1 Courant, angle de commande et d'empiètement

L'amplitude **des harmoniques caractéristiques** produites par le convertisseur dépendent principalement du courant CC, l'angle de commande et l'angle d'empiétement. Ces dépendances sont non linéaires et cycliques, mais sont bien définis. Le chevauchement de commutation est lui-même une fonction de courant, la tension et l'angle de contrôle, ainsi que la réactance de la commutation, et ainsi la relation peut être exprimée de différentes manières.

La commutation des convertisseurs statiques génèrent les harmoniques caractéristiques de tensions et de courant sur les côtés CC et CA respectivement. Les commandes de ces harmoniques sont liées au nombre d'impulsions de la configuration de convertisseur, défini comme le nombre de non-simultanée des commutations par cycle de la fréquence fondamentale [26].

Un convertisseur de nombre d'impulsions p génère idéalement les harmoniques de tension caractéristique de pk sur le côté CC et des harmoniques du courant de $pk \pm 1$ sur le côté CA (où k est un entier quelconque).

La dérivation des harmoniques caractéristiques est basée sur les hypothèses suivantes:

- Les tensions d'alimentation sont déplacés exactement par un tiers d'un cycle dans le temps les uns des autres et se composent uniquement de la fréquence fondamentale.
- Le courant continu est parfaitement constant. Ceci ne peut être réalisé que si la réactance a une inductance de lissage CC infini.
- Les vannes (changeurs de prise) commencent à conduire à des intervalles de temps égaux.
- Les impédances de commutation sont les mêmes dans les trois phases (c'est à dire tous les angles de chevauchement sont les mêmes).

L'amplitude **des harmoniques non-caractéristique** est également affectée par ces paramètres, ainsi que par les effets asymétries discuté ci-dessous.

IV.5.2 Effet des asymétries sur les harmoniques

Les asymétries qui provoquent les harmoniques non-caractéristiques influent sur l'amplitude des harmoniques caractéristiques pour n'importe quelle condition de fonctionnement donnée, mais l'effet est d'une amplitude relativement faible. En utilisant les mêmes méthodes que celles utilisées pour le calcul des harmoniques non-caractéristiques, on peut calculer les valeurs des asymétries des harmoniques caractéristiques. Ces valeurs de calcul peuvent finalement mener à un léger surdimensionnement dans la conception des filtres.

IV.5.3 Tolérances de paramètre d'équipement du convertisseur

Les spécifications techniques exigent au constructeur d'inclure, dans le calcul des harmoniques non-caractéristique de courant, toutes les variations possibles des paramètres de l'équipement du convertisseur, tels que la réactance de commutation, les ratios d'enroulement du transformateur, et la variation de l'angle d'allumage.

Il n'est pas possible d'améliorée la précision d'angle d'allumage ou du ratio d'enroulement du transformateur, dans ce cas-ci le concepteur de filtre doit simplement utiliser des valeurs réelles. Le déséquilibre de la réactance de commutation est dû à la tolérance de fabrication de l'impédance de fuite du transformateur, qui est une valeur maîtrisable dans une certaine mesure [26].

IV.5.4 Changeurs de prises

Le réglage des changeurs de prises du transformateur affectent la tension de convertisseur, le courant et l'angle de contrôle, et donc la génération des harmoniques. Dans un groupe de valve de 6 impulsions, les prises du transformateur normalement résultent des tensions identiques pour les trois phases, donc on ne considère aucune différence entre les phases lors du calcul de la génération des harmoniques.

Entre les connections du transformateur étoile-étoile et étoile-triangle pour les groupes de valve à 6 impulsions, les changeurs de prises sont normalement synchronisés. Il n'ya donc pas d'impact sur la génération des harmoniques.

IV.6 Harmoniques externes

La conception des filtres doit tenir compte des autres sources d'harmoniques au sein et à l'extérieur de la station. Les spécifications techniques devraient exiger le coût et la performance du filtre CA.

En dehors de la station, d'autres sources d'harmoniques telles que d'autres convertisseurs de CCHT, les charges de type du redresseur, l'arc électrique, transformateurs de puissance, l'effet couronne des lignes de CA, l'équipement des consommateurs etc. peuvent résulter une présence d'harmonique significative.

IV.7 Harmoniques sur le côté alternatif [6, 10, 18, 26, 46]

Les convertisseurs génèrent des harmoniques. En ce qui concerne un réseau alternatif, les convertisseurs dans un système CCHT réagit comme des sources de courants harmoniques.

Quand la commutation de réactance est annulée, le signal idéal actuel pour une connexion de transformateur étoile-étoile, de la figure 16, est défini comme suit:

$$\begin{aligned} i &= I_d \qquad pour -\frac{\pi}{3} < \omega t < \frac{\pi}{3} \\ i &= 0 \qquad pour -\frac{2\pi}{3} < \omega t < -\frac{\pi}{3}\ et\ \frac{\pi}{3} < \omega t < \frac{2\pi}{3} \\ i &= -I_d \qquad pour -\pi < \omega t < -\frac{2\pi}{3}\ et\ \frac{2\pi}{3} < \omega t < \pi \end{aligned} \tag{32}$$

La série de Fourier de cette onde du courant est :

$$i_{Y-Y} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d [\cos(\omega t) - \frac{1}{5}\cos(5\omega t) + \frac{1}{7}\cos(7\omega t) - \frac{1}{11}\cos(11\omega t) + \cdots] \tag{33}$$

Tandis que, le courant dans la configuration de transformateur étoile-triangle à CA par série de Fourier est :

$$i_{Y-\Delta} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d [\cos(\omega t) + \frac{1}{5}\cos(5\omega t) + \frac{1}{7}\cos(7\omega t) + \frac{1}{11}\cos(11\omega t) + \cdots] \tag{34}$$

D'après les équations (33) et (34), le courant CA dans les deux configurations de transformateur contient des harmoniques impairs seulement et tous harmoniques d'ondulation-n sont également absents. Les harmoniques à CA sont de l'ordre de :

$$6n \pm 1, \qquad n = 1,2,3, \ldots$$

Dans la configuration de 12impulsions le courant à CA est l'addition de (33) et (34). Donc courant résulté à CA est :

$$i_{12-impulsions} = i_{Y-Y} + i_{Y-\Delta}$$

$$i_{12-impulsions} = \frac{4\sqrt{3}}{\pi} I_d \left[\cos(\omega t) + \frac{1}{11}\cos(11\omega t) + \frac{1}{13}\cos(13\omega t) + \cdots\right] \quad (35)$$

Donc les harmoniques à CA soient dans ce cas-ci dans l'ordre de:

$$12n \pm 1, \qquad n = 1,2,3, \ldots$$

Donc l'amplitude de l'harmonique *n* est donnée par :

$$I_n = \frac{\sqrt{6}}{n\pi} I_d \quad (36)$$

et celle du principe fondamentale

$$I_1 = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \quad (37)$$

IV.7.1 Courants harmoniques dans les transformateurs de conversion

La valeur efficace des courants harmoniques caractéristiques à six impulsions dans chaque borne côté valve du transformateur de conversion est :

$$I_n = \frac{\sqrt{6} \times I_d \times F_1}{\pi \times n} \quad (37A)$$

Où

n est le rang d'harmonique caractéristique, $n = 6k \pm 1$, k étant un nombre entier positif compris dans la gamme $1 \leq k \leq 8$.

$$F_1 = \frac{\sqrt{(k_1^2 + k_2^2 - 2k_1k_2\cos(2\alpha + \mu)}}{cos\alpha - \cos(\alpha + \mu)}$$

$$k_1 = \frac{\sin\left(\frac{\mu \times (n-1)}{2}\right)}{(n-1)}$$

$$k_2 = \frac{\sin\left(\frac{\mu \times (n+1)}{2}\right)}{(n+1)}$$

IV.7.2 Courants harmoniques dans les filtres côté alternatif

La valeur efficace des courants harmoniques caractéristiques à 12 impulsions sur le côté réseau du transformateur de conversion est :

$$I_n = \frac{2\sqrt{6} \times I_d \times F_1}{\pi \times n} \times \frac{U_V}{U_L} \qquad (37B)$$

Où

n est le rang d'harmonique caractéristique, $n = 12k \pm 1$, k étant un nombre entier positif compris dans la gamme $1 \leq k \leq 4$.

$\frac{U_V}{U_L}$ est le rapport de tension du transformateur de conversion, tension côté valve par tension côté réseau (y compris la position de prise réelle).

$$F_1 = \frac{\sqrt{(k_1^2 + k_2^2 - 2k_1k_2\cos(2\alpha + \mu)}}{cos\alpha - \cos(\alpha + \mu)}$$

$$k_1 = \frac{\sin\left(\frac{\mu \times (n-1)}{2}\right)}{(n-1)}$$

$$k_1 = \frac{\sin\left(\frac{\mu \times (n+1)}{2}\right)}{(n+1)}$$

IV.8 Harmoniques sur le côté continu [6, 10, 18, 26, 46]

Les convertisseurs dans un système CCHT réagissent comme des sources d'harmoniques de tensions. Pour la configuration pont triphasé (par exemple $p = 6$) l'ordre des harmoniques est $n = 6k$. L'intervalle de répétition est π / 3 et il contient trois fonctions différentes qui sont exprimés en fonction de temps comme suit :

$$V_d = \sqrt{2}\,V_c \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \qquad pour\ 0 < \omega t < \alpha$$

$$V_d = \sqrt{2}\,V_c \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) + \frac{1}{2}V_c \sin(\omega t) = \frac{\sqrt{6}}{2}V_c \cos(\omega t) \quad pour\ \alpha < \omega t < \alpha + \mu \quad (38)$$

$$V_d = \sqrt{2}\,V_c \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) \qquad pour\ \alpha + \mu < \omega t < \frac{\pi}{3}$$

La valeur efficace des tensions harmoniques provenant d'un pont à **12 impulsions** est :

$$U_n = \frac{2\sqrt{6} \times U_{V0} \times F_2}{n \times \pi} \quad (39)$$

Où

n est le rang d'harmonique caractéristique, $n = 12k$, k étant un nombre entier positif compris dans la gamme $1 \leq k \leq 4$.

$$F_2 = \frac{\sqrt{(k_3^2 + k_4^2 - 2k_3k_4\cos\,(2\alpha + \mu)}}{2}$$

$$k_3 = \frac{\cos\left(\frac{\mu \times (n+1)}{2}\right)}{(n+1)}$$

$$k_4 = \frac{\cos\left(\frac{\mu \times (n-1)}{2}\right)}{(n-1)}$$

Si plus d'un convertisseur à 12 impulsions est connecté en série sur le côté continu, la tension harmonique est égale à U_n multiplié par le nombre de convertisseurs à 12 impulsions connectés en série.

IV.9 Solutions

Dans le système classique CCHT, la solution la plus couramment adoptée pour protéger une installation ou un réseau des perturbations harmoniques est la mise en œuvre d'un filtre et utilisé de redresseurs dodécaphasés.

On distingue d'une part les filtres comportant uniquement des éléments passifs (inductances, condensateurs, etc.) et d'autre part les redresseurs dodécaphasés [21].

IV.9.1 Filtrage passif

IV.9.1.1 Principe de fonctionnement

Le principe du filtrage passif est de modifier localement l'impédance du réseau afin de faire dévier les courants harmoniques et, du même coup, éliminer les tensions harmoniques résultantes. Ces filtres sont composés d'éléments capacitifs et inductifs qui sont disposés de manière à obtenir une résonance série sur une fréquence déterminée [40].

IV.9.1.2 Classification des filtres passifs

II est possible de classifier les filtres passifs selon leur emplacement sur le réseau, leur mode de connexion, leur degré d'amortissement de même que leur fréquence de résonance.

Les filtres passifs peuvent se diviser en deux familles, soit les filtres parallèles et les filtres séries. Selon le type choisi, les harmoniques peuvent être littéralement bloqués par une impédance série élevée entre le convertisseur et le réseau, déviés par une faible impédance en parallèle ou une combinaison des deux [41].

a Filtre passif parallèle

Le filtre parallèle est utilisé exclusivement du côté alternatif pour deux raisons :

- II porte uniquement le courant harmonique et est lié à la terre.
- A la fréquence fondamentale, il possède l'avantage de fournir de la puissance réactive.

Pour une efficacité équivalente au filtre série, le filtre parallèle est beaucoup moins cher. Le filtre parallèle est surtout utilisé dans le cas des charges génératrices de courants harmoniques alors que le filtre série l'est pour les charges génératrices de tensions harmoniques [39].

— **Filtres résonants**

A l'inverse d'une self antiharmonique, le principe d'un filtre résonant est d'abaisser localement l'impédance du réseau de manière à **court-circuiter les courants harmoniques**. De ce fait, il diminue également les tensions harmoniques. Le

comportement d'un filtre résonant est semblable à celui d'un ensemble self antiharmonique plus condensateur de compensation (figure 27. a) [42].

La performance d'un filtre résonnant est caractérisée par la tension harmonique entre ses bornes V_{Fh}. Cette tension ce calcule à partir du courant harmonique I_{dh} traversant l'impédance du réseau Z_s en parallèle avec l'impédance Z_F du filtre, calculées à une fréquence h fois celle du fondamental [41]:

$$V_{Fh} = \frac{Z_F \times h \times Z_s}{Z_F + h \times Z_s} I_{dh} \tag{40}$$

Or au voisinage de l'accord, le module de Z_s s'écrit :

$$Z_s = \frac{1}{C\omega h}\sqrt{\frac{1}{Q^2} + 4\delta} \tag{41}$$

Avec :

$Q = \frac{L\omega_1 h}{r}$: Coefficient de qualité de l'inductance série.

$\delta = \frac{\Delta\omega}{\omega_1}$: Précision d'accord.

Comme: $Z_F \ll hZ_s$, on obtient:

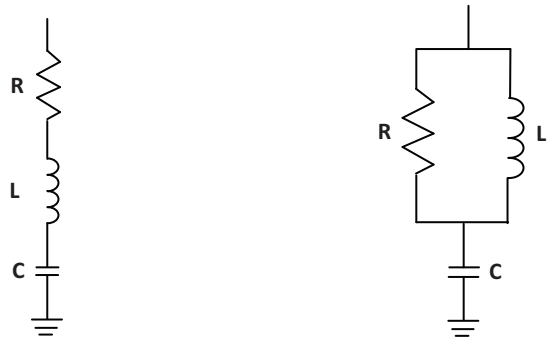
$$Z_{Fh} = Z_F I_{dh} \tag{42}$$

Le filtre sera plus performent avec Q grand et δ Faible. Il faut noter qu'il existe toujours une anti-résonce pour un range h_a inférieur à celui de l'accorde due à l'inductance L_s du réseau.

$$h_a = \sqrt{\frac{1}{(L_s + L)C\omega_1^2}} \tag{43}$$

— **Filtres amortis**

Un filtre amorti se compose d'une capacité en série avec un ensemble constitué de la mise en parallèle d'une inductance et d'une résistance, appelé **résistance d'amortissement** (figure 27. b). Il est utilisé lorsque les performances demandées au système de filtrage ne sont pas trop élevées. Il permet de filtrer simultanément les plus hautes fréquences du spectre, et non une fréquence particulière. C'est un filtre passe-haut d'ordre 2. Il existe également des filtres amortis d'ordre 3 qui comportent deux éléments capacitifs par phase au lieu d'un [42].



a) Filtre résonant b) Filtre amorti

Figure 27: filtre passif

a Calcule des filtres passifs [26, 45]

Un circuit accorde RLC à une impédance :

$$Z = R + j\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right) \tag{44}$$

Z : Impédance complexe du circuit.

R : Résistance

$L\omega$: Réactance inductive

$C\omega$: Réactance capacitive

A sa fréquence de résonance son impédance se réduit à une petite valeur soit R[26, 45].

Car : la fréquence indicative devient égale à la réactance, et on peut écrire.

$$L\omega = \frac{1}{C\omega_r} \tag{45}$$

Où

ω_r est la fréquence de résonance, elle est égale a :

$$\omega_r = 2\pi F_r$$

ω_r est la pulsation de résonance.

F_r est la fréquence de résonance, elle est égale a :

$$F_r = \frac{\omega_r}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

La réactance indicative ou capacitive qui correspond à cette fréquence est :

$$X_r = L\omega_r = \frac{1}{C\omega_r} \tag{46}$$

D'où : $LC\omega_r^2 = 1$

$$\omega_r = \sqrt{\frac{1}{LC}} \tag{47}$$

Dans le cas d'un filtre résonance, le facteur de qualité est défini comme étant le :

$$Q = \frac{X_r}{\omega_r} \tag{48}$$

Par conséquent, la capacité et l'indic tance respective du filtre en fonction de Q sont :

$$L = \frac{X_0}{\omega_r} = \frac{RQ}{\omega_r} \tag{49}$$

$$C = \frac{1}{X_0\omega_r} = \frac{1}{RQ\omega_r} \tag{50}$$

En pratique un filtre résonant n'est pas exactement accorde sur une fréquence harmonique a cause de :

- la variation dans la fréquence fondamentale (50Hz). Ce qui fait varier proportionnellement les fréquences harmoniques.
- Des variations dans la valeur de capacité L et de la valeur de l'inductance C due aux vieillissements et l'échauffement de ces éléments.
- Le désaccord initial cause par les tempérances de fabrication de L et C.

Les performances d'un filtre sont, largement détermines a partir de son facture de qualité Q et sa déviation relative de la fréquence δ défini par l'équation suivant :

$$\omega = \omega_r(1 \pm \delta)$$

Une variation de 2% dans la valeur de L et C (due aux tolérances de fabrication), provoque le même désaccord qu'une variation de 1% de la fréquence du système.

La déviation relative de fréquence δ peut être exprimé en fonction des variations de L et C.

$$\delta = \frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{\Delta F}{F} + \frac{1}{2}\left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta C}{C}\right) \tag{51}$$

$\frac{\Delta\omega}{\omega}$: Représente la variation relative de la pulsation.

L'impédance du filtre peut être exprimée en fonction du facteur de qualité et de laïcisation relative de la fréquence.

$$Z_F = R\left[1 + j\delta Q\left(\frac{2+\delta}{1+\delta}\right)\right] \tag{52}$$

Pour les petites déviation de fréquence ou δ est $\ll 1$ on peut écrire :

$$Z_F \cong R[1 + j2\delta Q] \tag{53}$$

Cette équation montre que l'impédance du filtre à sa fréquence de résonance peut être diminue, en fonction diminuant la valeur de R.

b Minimisation de la tension harmonique (Vh)

La tension harmonique est donnée par:

$$V_h = Z_{eq} I_h \tag{54}$$

Z_{eq} : L'impédance équivalente du filtre et delà source.

I_h : Le courant harmonique.

Cela veut dire que pour diminuer la tentions harmonique, il ne faut pas diminuer seulement l'impédance du filtre; mais il faut diminuer l'impédance équivalente du filtre et de la source.

$$V_h = \frac{Z_{hF} Z_{hs}}{(Z_{hF} + Z_{hs}) I_h} = \frac{I_h}{(Y_{hF} + Y_{hs})} \tag{55}$$

Z_{hF} : Impédance harmonique d'ordre h.

Z_{hs} : Impédance harmonique du réseau (impédance de la source).

Y_{hF} : Admittance du filtre

Y_{hs} : Admittance du réseau (source)

L'admittance du filtre peut être écrite sous la forme :

$$Y_F = \frac{1}{Z_F} = G_F + jB_F \tag{56}$$

G_F : la condictance du filtre.

B_F : la susception du filtre.

De l'équation (I.56) on peut écrire :

L'admittance approximative du filtre, en fonction du facteur de qualité et du coefficient de déviation de fréquence est donnée par l'expression suivante :

$$Y_F = \frac{1}{R[1 + j2\delta Q]} = \frac{Q^2 j2\delta}{X_0(1 + 4\delta^2 Q^2)} \tag{57}$$

$$|Y_F| = \frac{1}{R\sqrt{1 + j2\delta Q}} = \frac{Q}{X_0(1 + 4\delta^2 Q^2)} \tag{58}$$

La conductance, et la susceptances du filtre en fiction du facteur de qualité et le coefficient de déviation relative de fréquence sont données respectivement par les deux formules suivantes :

$$G_F = \frac{1}{R(1+4\delta^2Q^2)} = \frac{Q}{X_r(1+4\delta^2Q^2)} \tag{59}$$

$$B_F = \frac{2\delta Q}{R(1+4\delta^2Q^2)} = \frac{2\delta Q}{X_F(1+4\delta^2Q^2)} \tag{60}$$

En réalité il y plusieurs variables qui entre dans la conception du filtre passifs. Les variables qui ne sont pas sous le contrôle du concepteur, et qui sont le coefficient de déviation maximale delà fréquence δ et l'impédance de la source Z_s sont choisis de telle façon qu'ils donnent une valeur de la tentions harmonique élevée [41].

Pour un réseau purement inductif nous pouvons écrire:

La tentions harmonique en fonction des conductances et des susceptances être écrite:

$$V_h = \frac{I_h}{\sqrt{(G_{hF}+G_{hs})^2+(B_{hF}+B_{hs})^2}} \tag{61}$$

En cas de résonance nous pouvons mettre $G_{hF} = 0$, $B_{hF} + B_{hs} = 0$,et on aura l'expression simplifiée :

$$V_h = \frac{I_h}{G_{hs}} \tag{62}$$

En remplaçant G_{hF} par sa valeur dans l'expression (I.59) et pour une valeur de $\delta_m = \delta$ on peut écrire:

$$V_h = X_r(Q^{-1} + 4\delta^2 Q)I_h \tag{63}$$

La tentions harmonique est minimale pour une valeur optimale du facteur de qualité en fonction du coefficient de déviation maximale de fréquence.

$$Q = Q_r = \frac{1}{2\delta_m} \tag{64}$$

Ce qui donne :

$$V_h = 4\delta_m X_r I_h \tag{65}$$

c Réseau avec une impédance a l'angle limite

Supposons que l'impédance de réseau a un angle limite entre$\pm\varphi_m$, où $0 < \pm\varphi_m < 90$, Il est montre que la tension harmonique la plus élevée correspond a une valeur de l'angle $\varphi = \varphi_m$ et a un singe oppose par rapport a δ c'est de la qu'il faut trouver la valeur qui minimise $|Y_F|$ et maximise la valeur de V_h d'après l'équation (I.48) l'impédance harmonique du filtre peut être écrite sous la forme [41]:

$$Z_{hF} = X_F(Q^{-1} + 2j\delta_m) \tag{66}$$

Les formule pour une valeur optimale du facteur de qualité correspondants a Y_{hF}, Y_{hs} peuvent être détermines par construction tigonometrique en déterminant au début le diamètre du cercle de valeur $\frac{1}{2\delta_m X_r}$ et l'angle φ_m.

$$Y_{hF} = \frac{\cos\left(\frac{\varphi_m}{2}\right)}{2\delta_m X_r} \tag{67}$$

$$|Y_{hs}| = |Y_{hF}| sin\left(\frac{\varphi_m}{2}\right) = cos\left(\frac{\varphi_m}{2}\right) sin\left(\frac{\varphi_m}{2\frac{1}{2\delta_m X_r}}\right) \tag{68}$$

La valeur optimale du facteur $tg\left(\frac{\varphi_m}{2}\right) = \frac{X_r}{R} = \frac{2\delta_m X_r}{\frac{X_r}{Q}} = 2\delta_m Q$

La qualité est :

$$Q_0 = \frac{\cos(\varphi_m) + 1}{2\delta_m \sin(\varphi_m)} \tag{69}$$

$$V_h = \frac{4\delta_m X_r}{\cos(\varphi_m) + 1} I_h \tag{70}$$

Notons que quels filtres passifs ne sont pas seulement connus pour obtenir une tension harmonique minimale; mais, le choix du facteur de qualité élevé est nécessaire pour réduire les portes de puissance.

IV.9.2 Utilisation de redresseurs dodécaphasés [18, 22]

Cette solution permet, par combinaison des courants, d'éliminer au primaire les harmoniques de rang les plus bas tels que 5 et 7 (souvent les plus gênants car de plus fortes amplitudes), même dans le plus haut parce qu'il ya deux impulsions de courant de même taille et de la polarité opposée par cycle. Depuis la largeur d'impulsion de courant est d'un tiers d'un cycle, troisième et toutes les harmoniques triple-n sont également absents. Les harmoniques restants sont de l'ordre de $6n \pm 1$, où n est un nombre entier positif. Dans un pont à 12 impulsions, il ya deux ponts de 6 impulsions avec deux transformateurs, l'une avec $Y - Y$ et l'autre avec $Y - \Delta$ connexion, et permet de ne générer que les harmoniques de rang $12k \pm 1$. Les harmoniques de valeurs impaires de $\boldsymbol{n}$ s'annulent, de la figure 28 est défini comme suit:

Le courant dans la configuration de transformateur étoile-étoile à CA par série de Fourier est :

$$i_{Y-Y} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d[\cos(\omega t) - \frac{1}{5}\cos(5\omega t) + \frac{1}{7}\cos(7\omega t) - \frac{1}{11}\cos(11\omega t) + \cdots]$$

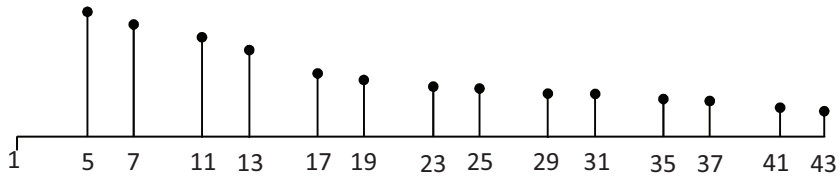
Le courant de connexion du transformateur étoile-triangle est

$$i_{Y-\Delta} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d[\cos(\omega t) + \frac{1}{5}\cos(5\omega t) + \frac{1}{7}\cos(7\omega t) + \frac{1}{11}\cos(11\omega t) + \cdots]$$

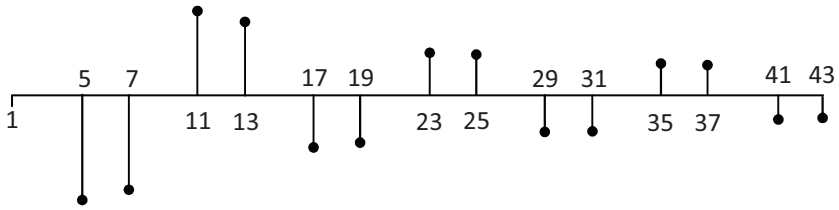
Dans la configuration de 12 impulsions le courant à CA est l'addition de (33) et (34). Donc courant résulte à CA est :

$$i_{12-impulsions} = i_{Y-Y} + i_{Y-\Delta}$$

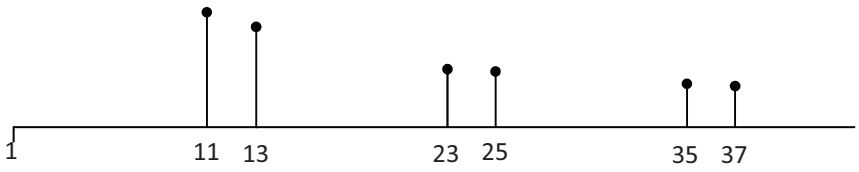
$$i_{12-impulsions} = \frac{4\sqrt{3}}{\pi} I_d[\cos(\omega t) + \frac{1}{11}\cos(11\omega t) + \frac{1}{13}\cos(13\omega t) + \frac{1}{23}\cos(23\omega t) \ldots]$$



Harmoniques CA de transformateur $Y - Y$



Harmoniques CA de transformateur $Y - \Delta$



Harmoniques de groupe 12 impulsions

Figure 28: Les harmoniques de courant d'un convertisseur à 12- impulsions.

IV.10 Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté la distorsion harmonique et les différentes sources de perturbation affectant la forme d'onde des tensions du réseau électrique ainsi que leurs effets néfastes sur les équipements électriques qui y sont connectés. Ces effets sont à l'origine d'échauffements et de dégradations du fonctionnement de ces équipements.

Ensuite, pour diminuer les effets de ces perturbations harmoniques, différentes solutions de dépollution ont été présentées. Les filtres comportant uniquement des éléments passifs (inductances, condensateurs, etc.) et d'autre part les redresseurs dodécaphasés.

Chapitre V

Résultats et analyses

Chapitre V

Résultats et analyses

V.1 Introduction

Pour acquérir les résultats de nos simulations et les analysées, il est nécessaire d'utiliser un logiciel qui nous permet d'aboutir à des fins analytiquement acceptable, ce logiciel est nommé MATLAB.

MATLAB dont le nom provient de MATrix LABoratory est un langage de calcul scientifique basé sur le type de variable matricielle outre sa haute capacité de calcul numérique appliqué à différents domaines scientifiques tels le traitement de signal, l'automatique, etc.

Ce qui nous intéresse, plus particulièrement, dans ce travail est une partie précise de ce logiciel appelée « Simulink ».

Simulink outil additionnel à MATLAB, est conçu pour résoudre numériquement les équations différentielles, linéaires ou non, qui régissent le comportement des systèmes physiques dynamiques représentés par leurs modèles mathématiques, ces systèmes peuvent être analogiques, discrets ou hybrides.

Les principaux intérêts résident dans la possibilité de travailler directement sur le schéma bloc à la place des équations mathématiques des systèmes. Cette façon de procéder, très visuelle, est parfaitement adaptée aux habitudes de travail.

Simulink permet de paramétrer tous les blocs et de les organiser sous forme hiérarchisée. L'expérimentateur peut, de ce fait passer de la description de son système par grandes fonctions, a l'étude de plus en plus détaillée de chacune d'entre elles.

Dans cette étude, on travaille avec un système CCHT à deux extrémités, utilisant des unités de conversions triphasées à 12 impulsions à base de valves à thyristors. Toutes les simulations sont réalisées avec Sim Power Systems de Simulink [47].

Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et les effets des harmoniques dans les réseaux électriques. Dans ce chapitre on se focalise sur la simulation et l'étude des harmoniques, leur minimisation et pourquoi pas leur suppression.

Donc, l'intérêt de notre travail est de réduire le taux de distorsion. Les courants harmoniques étant responsables de la distorsion de tension lorsqu'ils traversent l'impédance de source, c'est en diminuant leur amplitude que l'allure de la tension est améliorée. La solution plus fréquemment mise en œuvre est le filtrage passif. Ce filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau [6].

V.2 Description du système CCHT [47]

La figure 29 donne une vue d'ensemble du système de transport à CC. Il comprend un réseau triphasé, une ligne aérienne qui relie le convertisseur 1 et convertisseur 2.

Une liaison CCHT de 1000 MW (500 kV, 2 kA) est utilisée pour transmettre la puissance d'un système de 500 kV, 5000 MVA, 60Hz à un système de 345 kV, 10000 MVA, 50 Hz.

Le redresseur et l'onduleur sont convertisseurs à 12 impulsions utilisant deux blocs Pont Universel connectés en série. Les convertisseurs sont interconnectés par une ligne de 300 km et 0,5 H réactance de lissage. Les transformateurs de convertisseur (Y à la terre /Y/Δ) sont modélisées avec transformateur triphasé (Trois enroulements). Les changeurs de prise de transformateur ne sont pas simulés.

Du point de vue à CA, un convertisseur de CCHT agit comme une source des courants harmoniques. Du point de vue de CC, c'est une source des tensions harmoniques.

L'ordre n de ces harmoniques caractéristique est lié au nombre ***p*** d'impulsion de la configuration du convertisseur: $n = kp \pm 1$ pour le courant alternatif et $n = kp$ pour la tension continu, ***k*** étant un entier quelconque. Dans l'exemple, $p = 12$, alors que les harmoniques injectés sur le côté CA sont 11, 13, 23, 25, et sur le côté CC sont 12, 24 …

Les filtres CA sont utilisés pour empêcher **les courants harmoniques impairs** de se propager sur le système CA. Les filtres sont regroupés en deux sous-systèmes. Ces filtres apparaissent aussi comme les grands condensateurs à la fréquence fondamentale, offrant ainsi une compensation de puissance réactive pour la consommation de redresseur due au l'angle d'amorçage α. Pour α = 30°, la demande de puissance réactive du convertisseur est d'environ 60% de la puissance transmise à pleine charge. Regardez le contenu (bloc) des filtres CA, le facteur de qualité des filtres accordés aux 11ème et 13ème harmoniques est plus grand Q =100 et très faible pour le filtre amorti Q =3 (utilisé généralement pour éliminer les harmoniques des ordres supérieur, 24ème et plus). La puissance réactive supplémentaire est également fournie par des batteries de condensateurs.

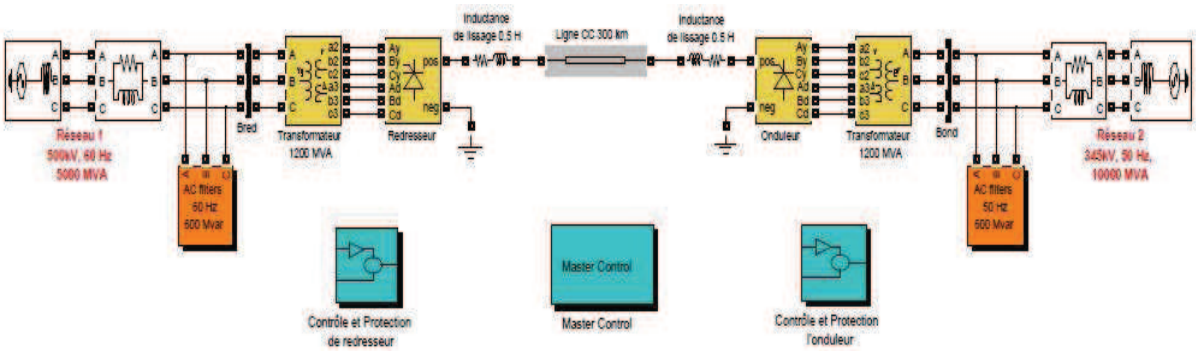


Figure 29 : Système de transport CCHT (12 impulsions) à deux extrémités 1000MW (500kV-2kA) 50/60 Hz.

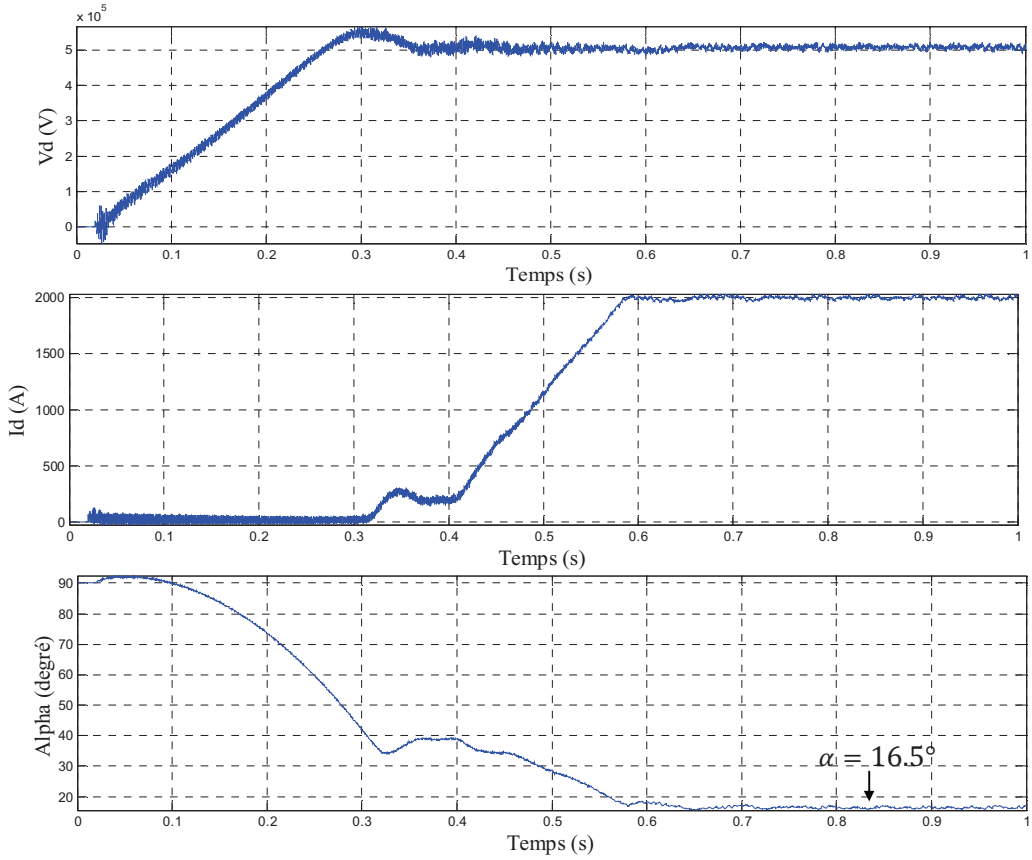
V.3 Simulations et résultats

Avant de simuler les harmoniques, on va voir le fonctionnement de système CCHT représenté par les courbes ci-dessous :

V.3.1 Démarrage et régime normal d'un système CCHT

Les résultats de cette simulation sont montrés dans la figure 30. A la fin de cette séquence de départ (t = 0,58 s), le système atteint l'état stationnaire. Le courant continu commence à augmenter à l'instant t = 0.32 s, c'est l'instant où les convertisseurs sont débloqués, et la tension CC atteint l'état stationnaire, la valeur du courant continu est de 2 kA et celle de la tension continu, est 500 kV. Ainsi que, les angles d'amorçage α sont de 16,5° et 143° respectivement pour le redresseur et l'onduleur.

- **Simulation côté redresseur :**



- **Simulation côté onduleur :**

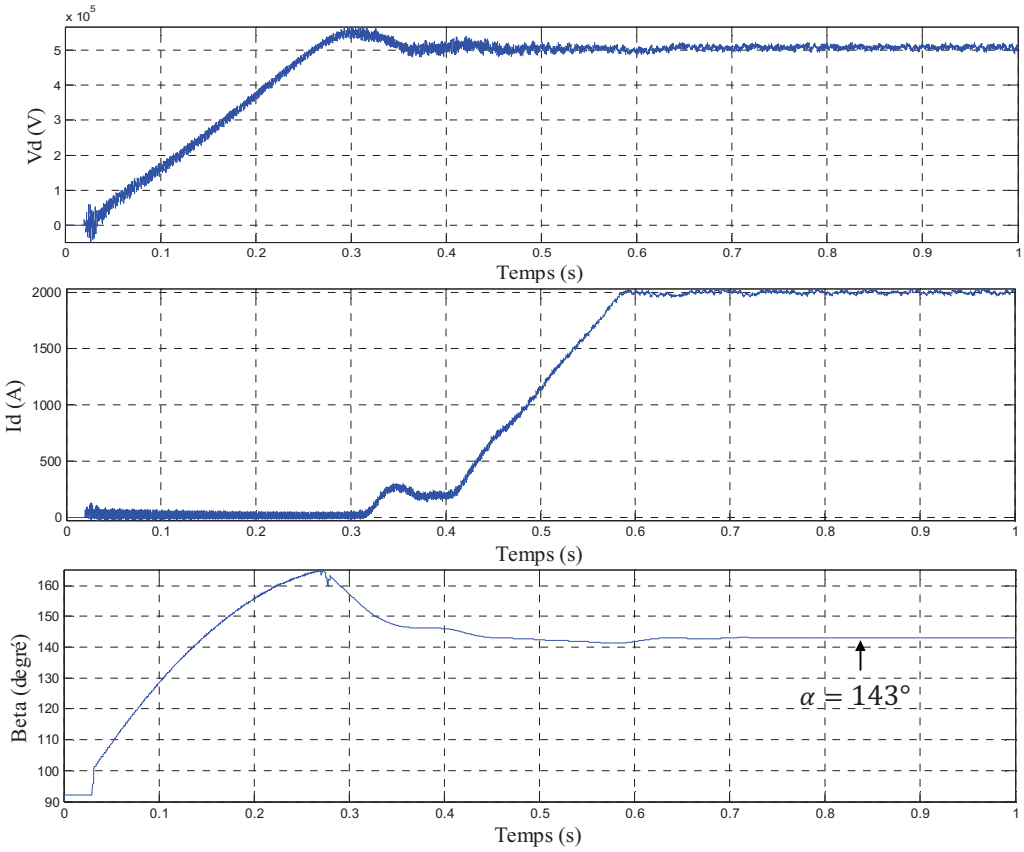


Figure 30 : Les graphes de la simulation la liaison CCHT à deux extrémités.

V.3.2 Etudes des harmoniques des systèmes CA et CC

D'après se qu'on a vu sur les facteurs qui influent sur l'amplitude d'harmoniques, on a trouvé que l'angle d'empiètement est une fonction de courant, de tension, de l'angle d'amorçage et de la réactance de commutation. Dans ce titre on va prouver que le taux d'harmonique du courant et de la tension sera en fonction de l'angle d'amorçage et l'angle d'empiètement.

V.3.2.1 Harmoniques sur le côté alternatif

Les convertisseurs dans un système CCHT réagissent comme des sources de courants harmoniques. Ces courbes ci-dessous donnent respectivement le taux d'harmonique du courant, en fonction de l'angle d'amorçage α et l'angle d'empiètement μ.

On remarque que les taux d'harmoniques décroissent avec l'augmentation de μ. De même, pour un **même** μ et lorsque α est supérieur à **10°,** la variation du taux d'harmonique est négligeable.

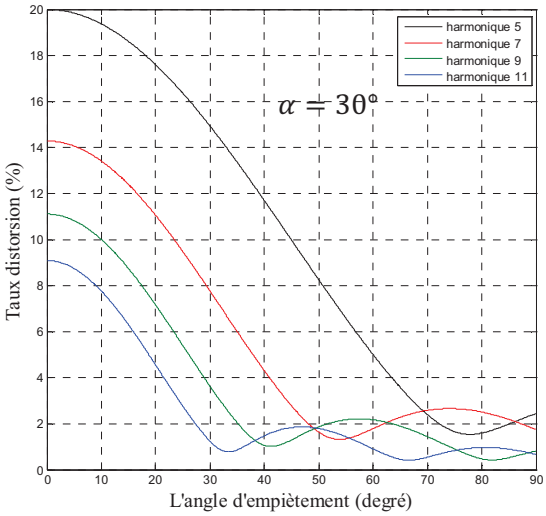


Figure 31: La variation du courant de 5ème, 7ème, 9ème et 11ème harmonique en fonction de l'angle d'amorçage et de l'angle d'empiètement.

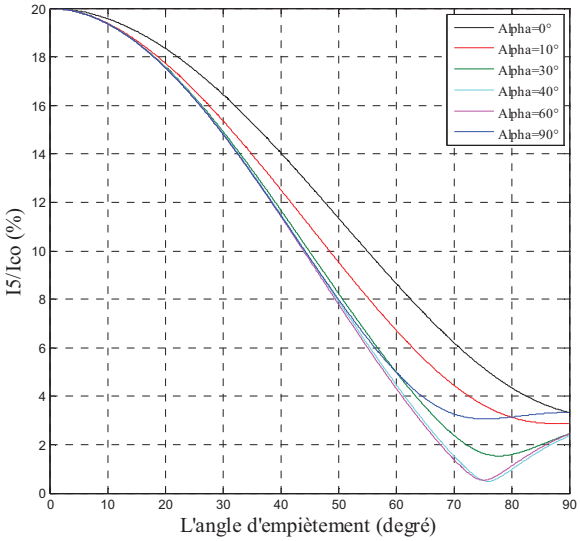


Figure 32: La variation du courant de 5ème harmonique en fonction de l'angle d'amorçage et de l'angle d'empiètement.

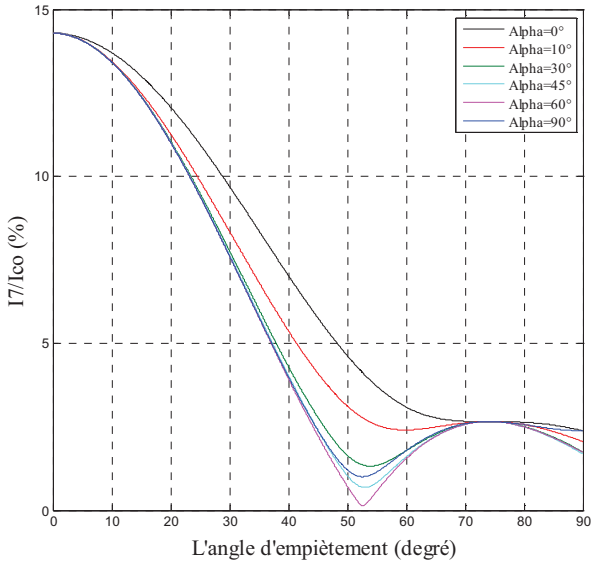


Figure 33: La variation du courant de 7ème harmonique en fonction de l'angle d'amorçage et de l'angle d'empiètement.

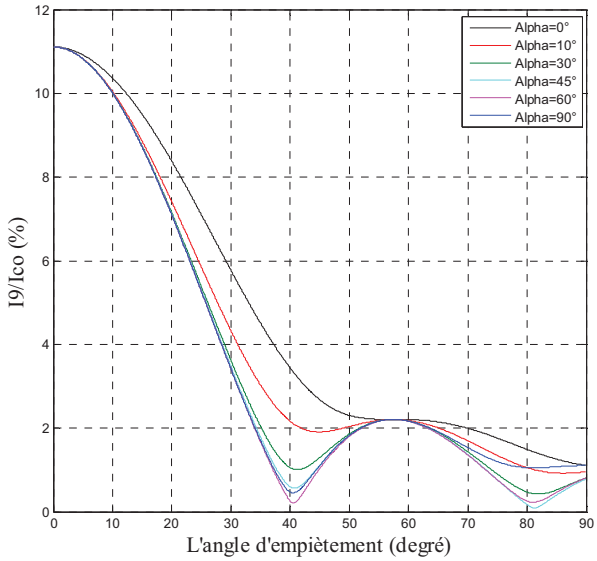


Figure 34: La variation du courant de 9ème harmonique en fonction de l'angle d'amorçage et de l'angle d'empiètement.

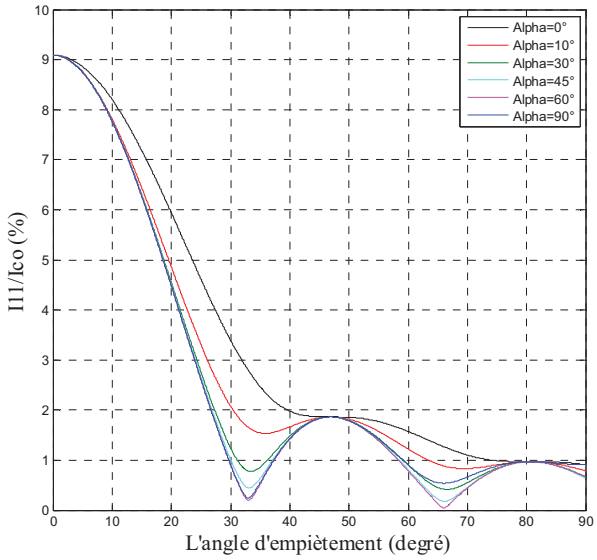


Figure 35: La variation du courant de 11ème harmonique en fonction de l'angle d'amorçage et de l'angle d'empiètement.

V.3.3.2 Harmoniques sur le côté continu

Les figures (36, 37, 38, 39) donnent respectivement la variation du taux d'harmonique de la tension, en fonction de l'angle d'amorçage α et l'angle d'empiètement μ.

D'après les figures, on remarque que si α **augmente**, les **taux harmoniques augmentent** aussi. D'après la comparaison entre ces figures ci-dessous, on constate que les taux d'harmoniques **d'ordre supérieur croissent** rapidement en fonction de **α.**

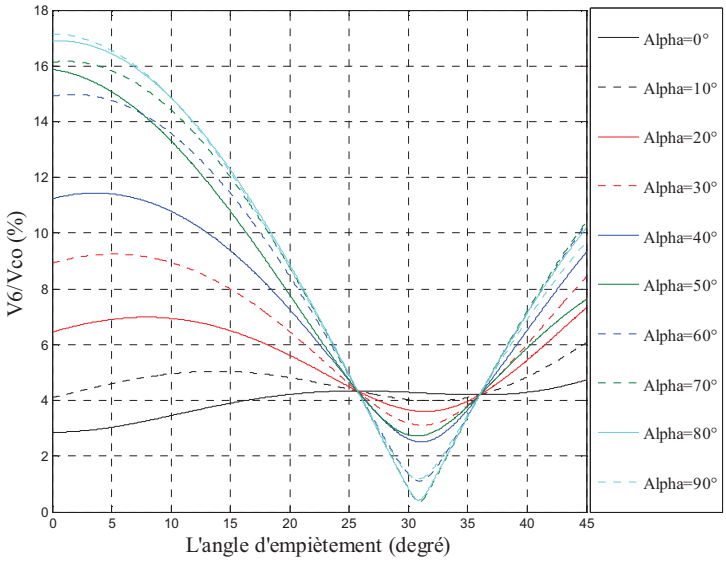


Figure 36: variation de la tension du 6ème harmonique en fonction de l'angle d'amorçage et de l'angle d'empiètement.

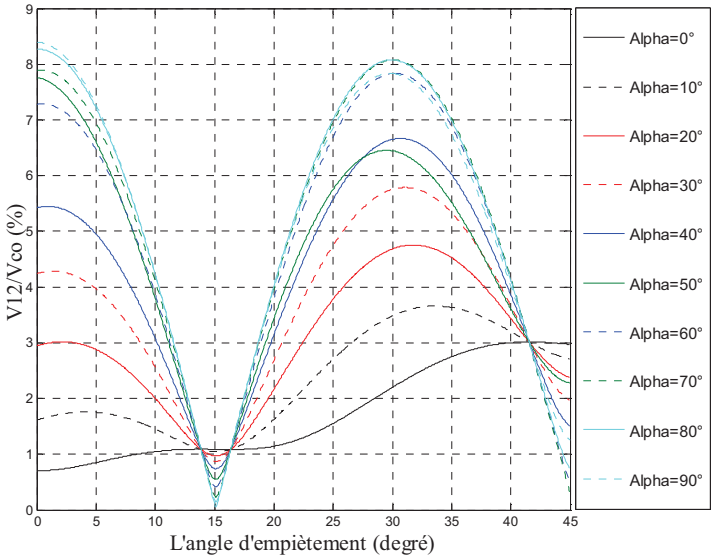


Figure 37: variation de la tension du 12ème harmonique en fonction de l'angle d'amorçage et de l'angle d'empiètement.

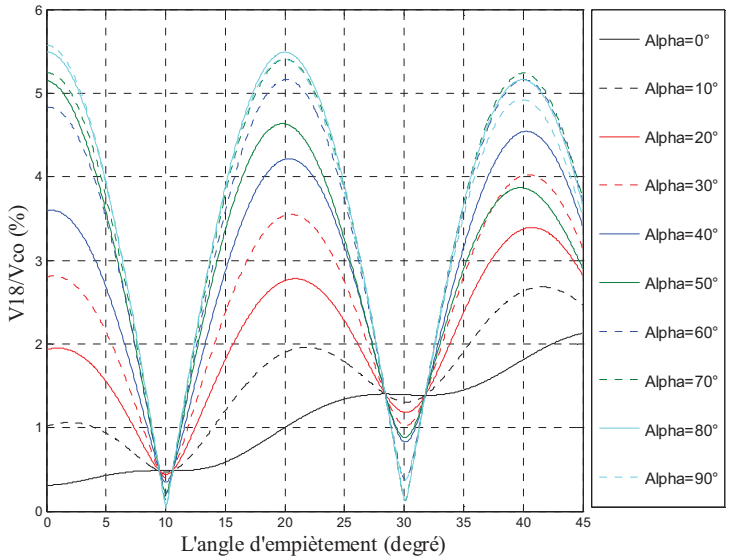


Figure 38: variation de la tension du 18ème harmonique en fonction de l'angle d'amorçage et de l'angle d'empiètement.

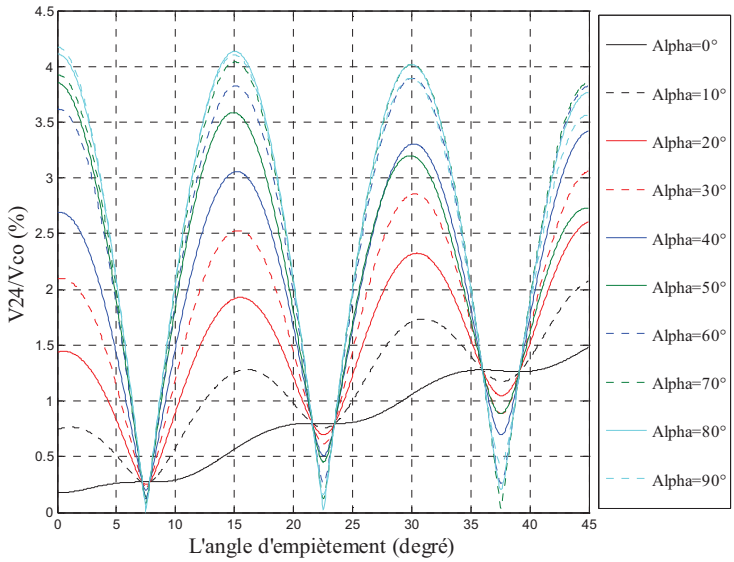


Figure 39: variation de la tension du 24ème harmonique en fonction de l'angle d'amorçage et de l'angle d'empiètement.

V.3.3 Réponse en fréquence des systèmes CA et CC

On va maintenant mesurer la réponse fréquentielle des systèmes CA (côtés redresseur et onduleur) et de la ligne CC.

Les grandeurs des trois impédances en fonction de la fréquence sont indiquées:

Impédances des deux réseaux CA et de la ligne CC

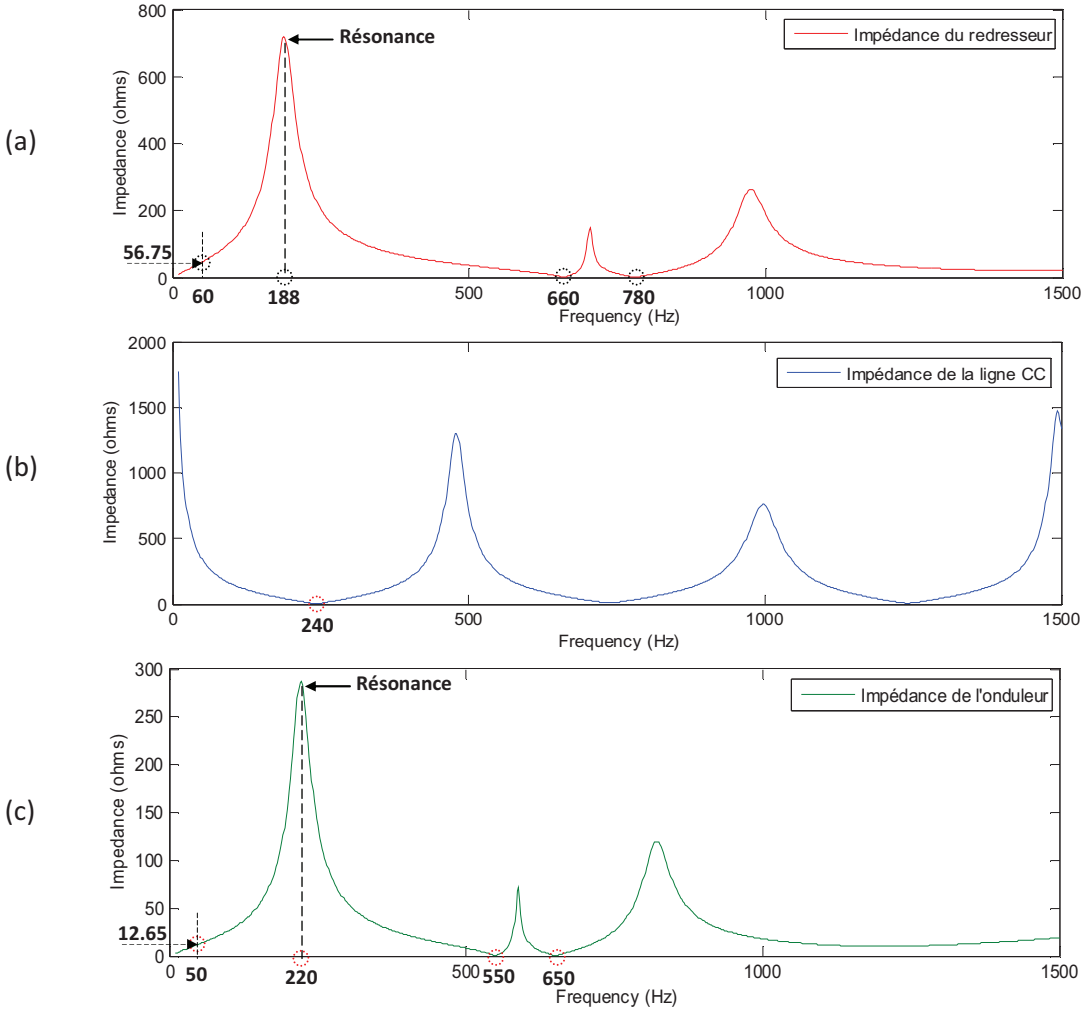


Figure 40: Réponse en fréquence des systèmes CA et CC

La figure 40 (a, c) présente les deux impédances minimales sur les amplitudes des impédances des systèmes de CA. Ces résonances sont créées par les filtres du 11ème et 13ème harmoniques. Elles surviennent à 660 Hz et 780 Hz sur le système de 60 Hz, 550 Hz et 650 HZ pour le système de 50 Hz. On remarque également que l'addition des filtres capacitifs de 600 Mvar sur les systèmes d'induction crée des résonances (autour de 188 Hz sur le côté redresseur et 220 Hz sur le côté de l'onduleur). Sur l'amplitude d'impédance

dans le réseau 1 (500kv, 60 Hz) et le réseau 2 (345kv, 50 Hz), nous devrions trouver respectivement une amplitude de 56,75 Ω et 12.65 Ω.

Pour la ligne CC, noter la résonance à 240 Hz, ce qui correspond au mode principal probablement à exciter du côté CC, sous des grandes perturbations.

V.3.4 Minimisation des perturbations d'harmoniques

On va illustrer les méthodes de minimiser les harmoniques qui sont cités dans le 4ème chapitre.

Nous allons présenter les résultats de simulation du système complet constitué du système électrique CCHT. L'objectif de notre travail est d'obtenir un bon résultat de la valeur du THD. Les résultats sont comme suit :

V.3.4.1 Les courants d'une ligne avant le filtrage

Les figures 41 et 42 présentent respectivement le courant du transformateur ($Y-Y$, $Y-\Delta$) et son spectre harmonique. Ces résultats sont obtenus avec un signal triangulaire causé par l'existence des harmoniques 5, 7, 11, 13, 19.... La valeur du THD est de 25% pour la connexion $Y-Y$ et celle de la connexion $Y-\Delta$, est 24.98%.

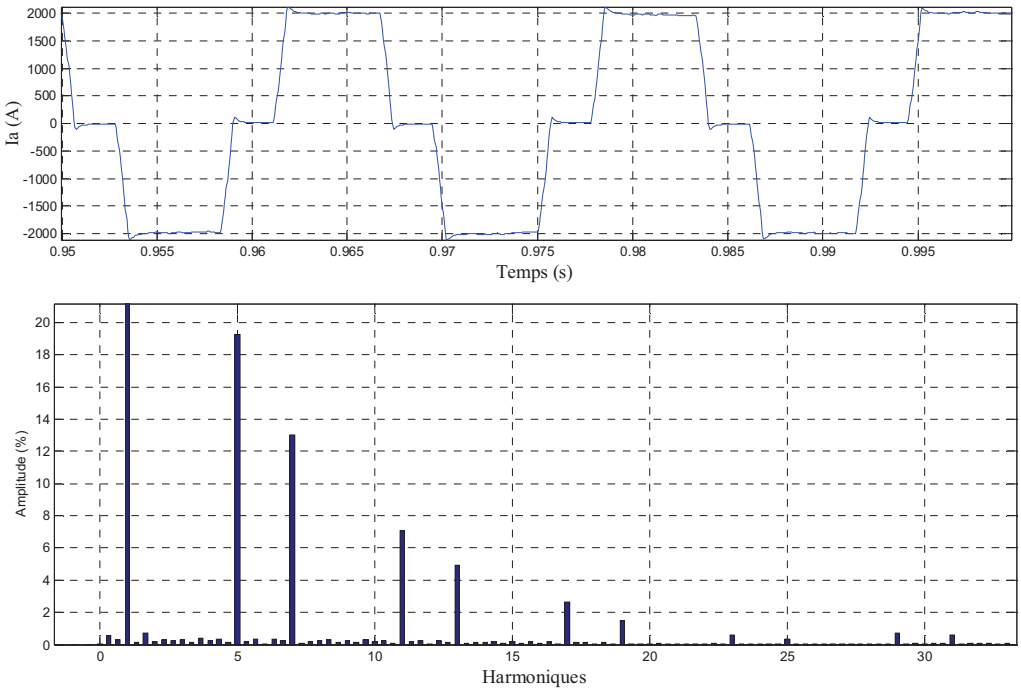


Figure 41: Courant de phase (a) pour le transformateur (connexion $Y-Y$), et son spectre harmonique.

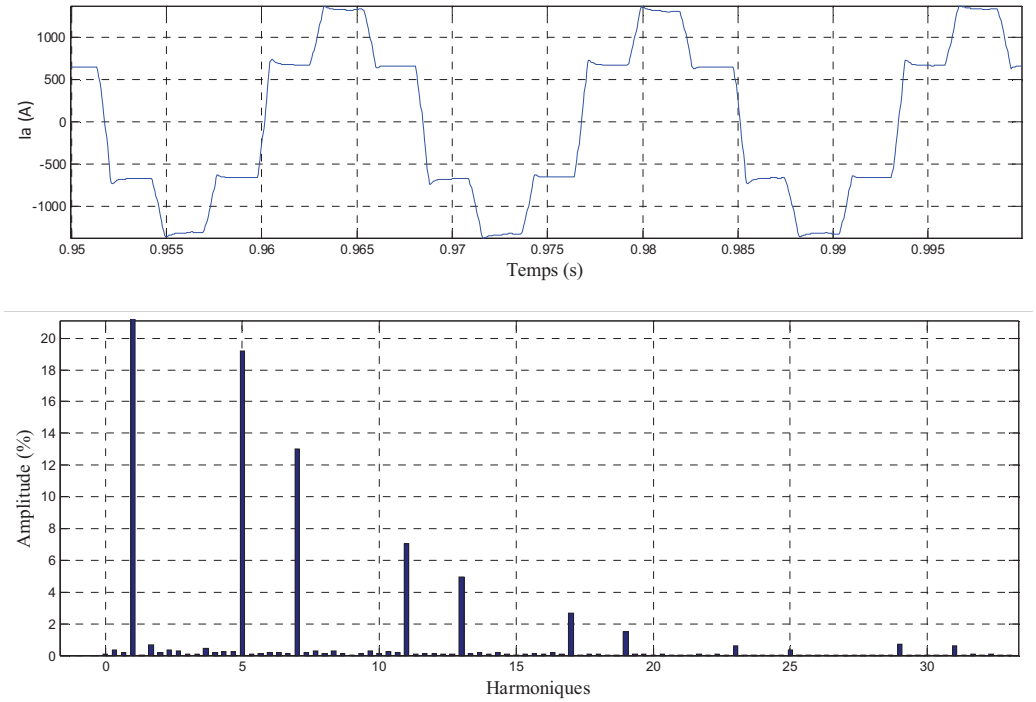


Figure 42: Courant de phase pour le transformateur (connexion $Y - \Delta$), et son spectre harmonique.

La figure 43 présente les résultats de simulation obtenus. Avant le filtrage, le THD du courant est égal à 8,66 %. Donc, on conclu que le couplage des deux transformateurs ($Y - Y\ et\ Y - \Delta$) avec convertisseur de 12 impulsions, prouve que la formule théorique de l'utilisation d'un redresseur dodécaphasé.

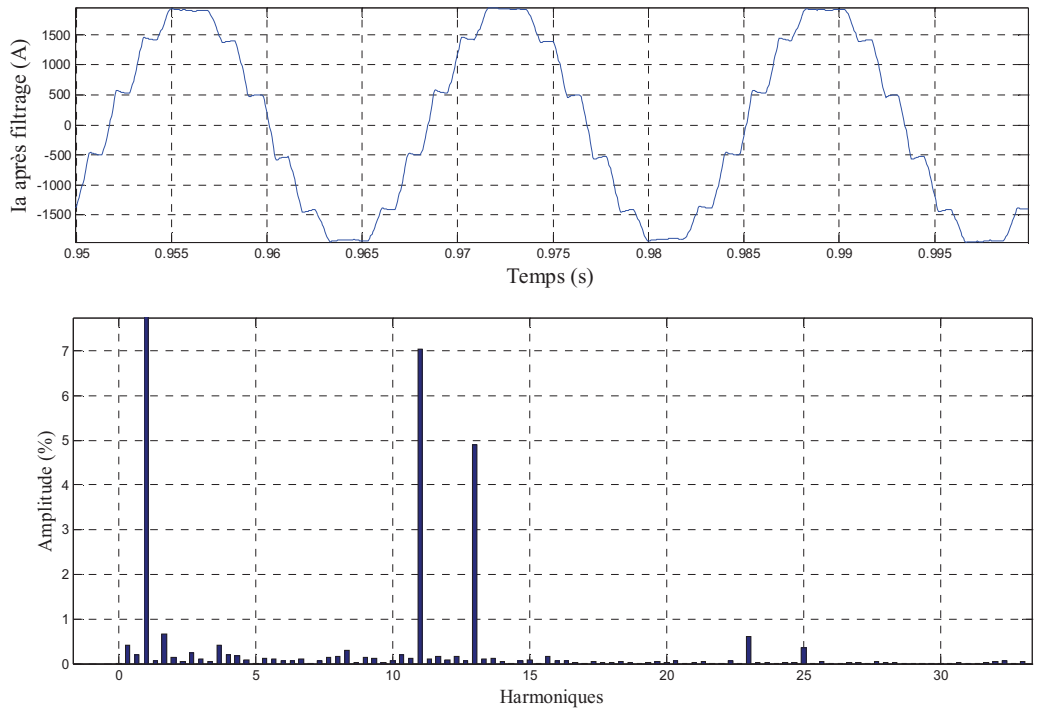


Figure 43: Courant de phase (a) avant le filtrage, et son spectre harmonique.

V.3.4.2 Les courants d'harmoniques d'une ligne

Pour observer l'influence de certains harmoniques sur le THD et superviser la réponse du système on va voir, la capacité du filtrage pour une seule phase (a), Les courants d'harmoniques, et leurs THD (figures : 44, 45, 46).

- **11ème harmonique, THD = 61.44%**

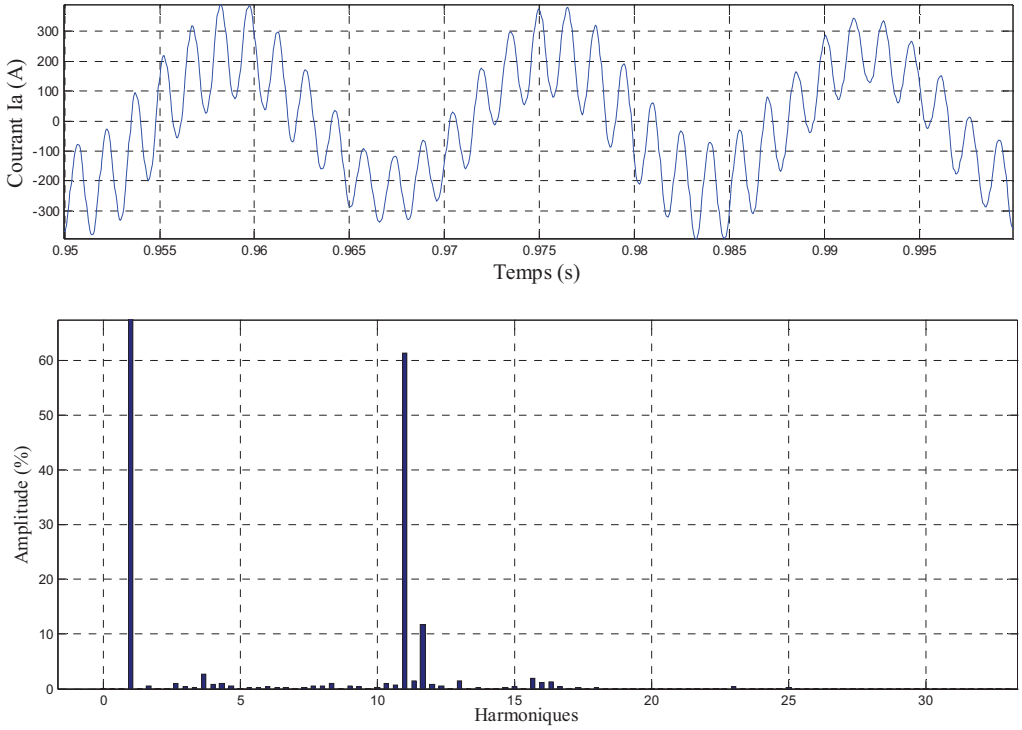


Figure 44: Courant de 11ème d'harmonique et son spectre harmonique.

- **13ème d'harmonique, THD= 41.18%**

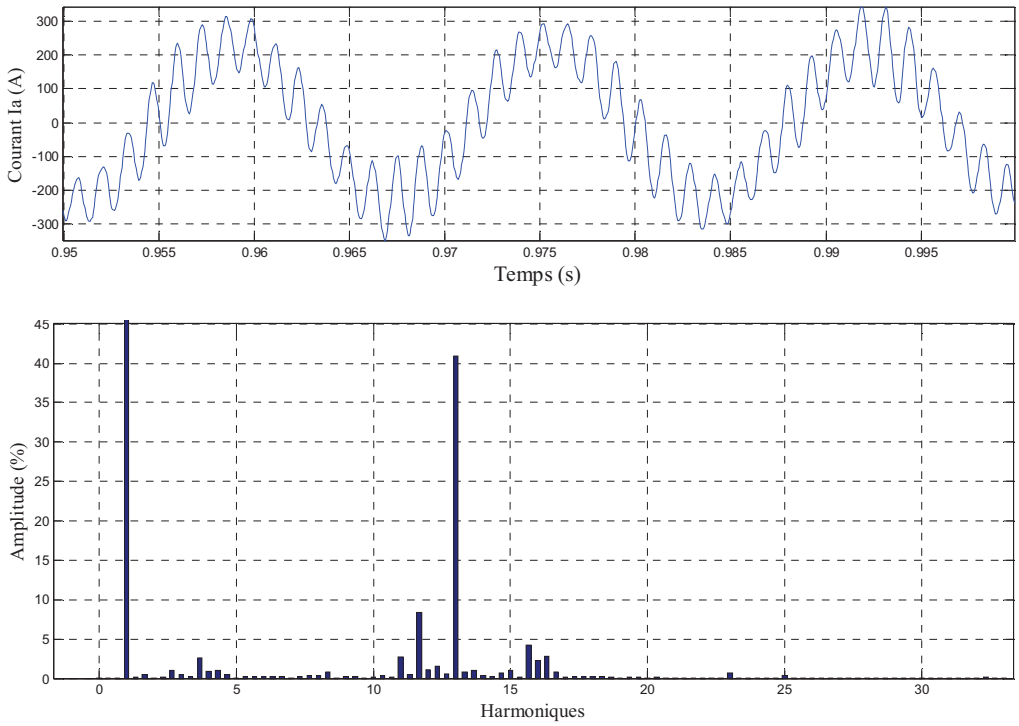


Figure 45: Courant de 13ème d'harmonique et son spectre harmonique.

- **23ème d'harmonique, THD= 10.94%**

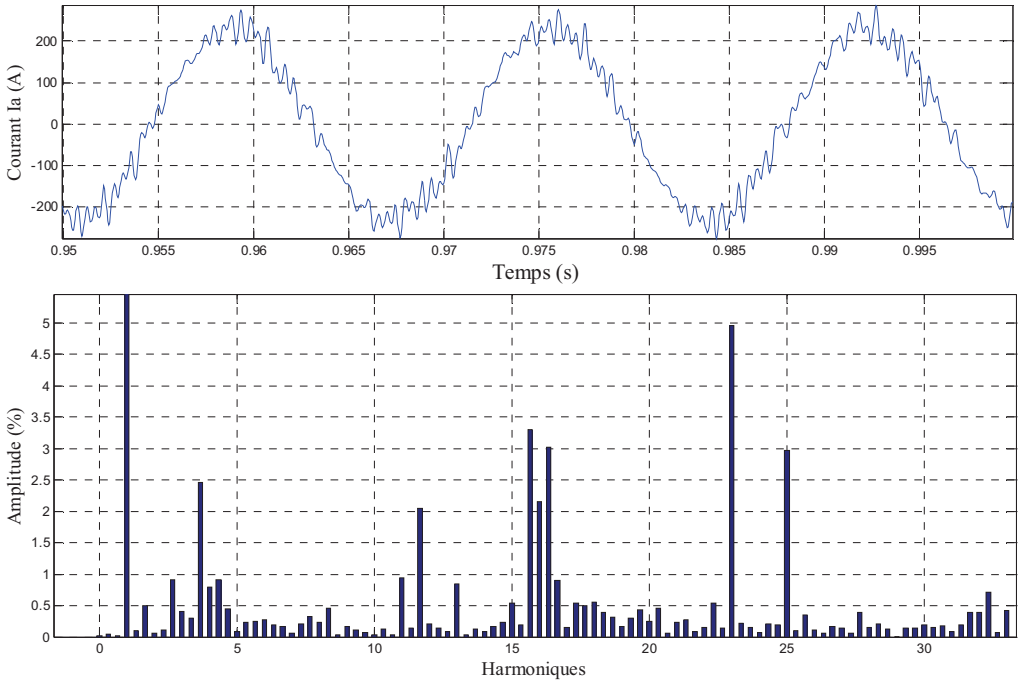


Figure 46: Courant de 23ème d'harmonique et plus, et son spectre harmonique.

V.3.4.3 Courant de ligne d'un convertisseur après le filtrage

La figure 47 présente les résultats de simulations du système pour la phase (a) après le filtrage. Le calcul du THD du courant de source sur les trente trois premiers harmoniques donne une valeur de 0.07 %.

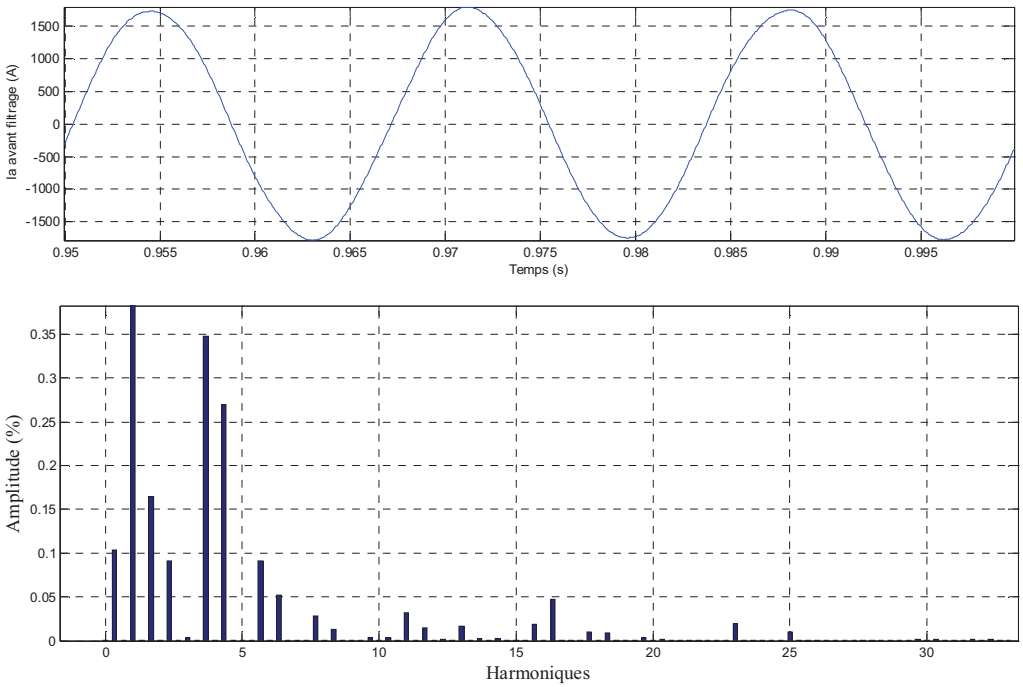


Figure 47: Courant de phase (a) après le filtrage, et son spectre harmonique.

V.4 Discussion des résultats

La forme d'onde du courant de source parfaitement sinusoïdale en régime permanent. D'après la commutation des valves, la forme d'onde qui apparaisse est quasi-triangulaire cause par l'existence des harmoniques 5, 7 ,11 ,13 ,19…, ainsi que dans un pont à 12 impulsions, il ya deux ponts de 6 impulsions avec deux transformateurs, l'une avec un couplage $Y - Y$ et l'autre avec $Y - \Delta$, et permet d'éliminer au primaire les harmoniques de rang les plus bas tels que 5 et 7 (souvent les plus gênants car ils ont de plus fortes amplitudes), et même dans les harmoniques de rang supérieur, parce qu'il ya deux formes de courant de même taille et de polarité opposée par cycle, parce que le filtre n'est donc pas capable d'éliminer les harmoniques complètement durant les commutations des thyristors du convertisseur. De même, pour réduire le coût des filtres harmoniques de manière significative. [17, 18, 23]

Initialement, les courants avant le filtrage contienne un THD de l'ordre de 8.66%. Lors du filtrage, le THD du courant de source est abaissée à 0.07%. Donc au niveau de la compensation des harmoniques par les filtres, le taux de distorsion est amélioré.

V.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait un survol de différentes facteurs qui affecté les amplitudes d'harmoniques ainsi que les différents moyens de mitigation contre la pollution harmonique étudiées dans le 4ème chapitre. Les transformateurs déphaseurs et le filtrage passif sont toutes des méthodes qui sont utilisées pour minimiser les harmoniques et certaines de leurs conséquences. Le filtrage passif est clairement démarqué dans le monde industriel lors des dernières décennies. De par ses avantages sur le filtre passif, le filtre constitue la voie par excellence pour, non seulement compenser les harmoniques, mais pour améliorer la qualité de l'énergie du réseau électrique. Ceci nous a permis de voir les caractéristiques propres des filtres qui font éliminer chaque harmonique.

Les simulations réalisées démontrent les bonnes performances de compensation en régime permanent du filtre.

D'après les résultats obtenus dans les simulations, il est possible de conclure que:

Les filtres présentent une bonne réaction pour éliminer les distorsions d'harmoniques. Donc au niveau de la compensation des harmoniques par les filtres le taux de distorsion est amélioré.

Conclusion générale

Les réseaux à haute tension (HT) se heurtent alors aux exigences du « grand transport » et leurs gestionnaires cherchent les moyens de lever les obstacles entre les lieux de production éloignés et les centres de consommation.

Le système CCHT est le plus adapté pour résolution des problèmes de transport l'énergie électrique à grandes distances.

De nos jours, la qualité de l'énergie est un domaine de la plus haute importance. À l'heure où l'économie des pays industrialisés repose sur leurs capacités à produire ou à acheter l'énergie, l'utilisation adéquate et sans perte inutile est capitale. Ce projet, bien que ne touchant qu'un de ces domaines de la qualité de l'énergie pourtant si vaste, a permis de faire un bref survol de la problématique liée à la pollution harmonique sur les réseaux électrique ainsi que des différents moyens de mitigation utilisés. Une bonne compréhension de la problématique des harmoniques, de leurs influences sur le réseau électrique, ainsi que des moyens de mitigation existant pour les minimiser est maintenant devenue essentielle pour tout ingénieur travaillant dans le domaine de l'électrotechnique.

Dans le cadre de ce projet, nous avons fait un survol d'analyse sur la performance fonctionnement d'une liaison CCHT en régime normal et causes de la pollution harmonique sur les réseaux, des effets ainsi que des moyens existants qui permettent de minimiser ces effets. Différentes topologies de filtre passif ont été examinées par le biais des outils de simulation MATLAB/Simulink/SimPowerSystems.

Les simulations nous ont permis de mettre en évidence les avantages associés à l'utilisation des filtres dans le système d'une liaison CCHT. Grâce à cette fonction, il est possible d'arriver aux performances désirées de filtrer après difformités.

Conclusion générale

Bibliographique

[1] **S. HADJERI** «Etat de l'art dans le domaine du transport en courant continu à haute tension CCHT», thèse de doctorat d'état, université Djillali Liabes de Sidi Bel-Abbès, 2003.

[2] **S. ZIDI** «Contribution à l'étude des réseaux de transport d'énergie électrique à courant continu haute tension CCHT en régime dynamique», thèse de doctorat d'état en électrotechnique, université Djillali Liabes de Sidi Bel-Abbès, 2005.

[3] **R. MEZIANE** «Simulation d'un réseau CCHT dans différents régimes de fonctionnements», mémoire de magister, Université Djilali Liabes, Sidi Bel-Abbès, Algérie, 1997.

[4] **M. KHATIR** «Comportement d'une liaison à Courant Continu Haute Tension CCHT en régime de défaut», thèse de magister, Université Djilali Liabes, Sidi Bel-Abbès, 2006.

[5] **A. BECHAREF, H. HAMDAOUI** «transport d'énergie en courant continu haute tension», thèse d'ingénieur, Université Djilali Liabes, Sidi Bel-Abbès, Algérie.

[6] **J. ARRILLAGA** «High voltage direct current transmission», 2ème Edition, The Institution of Electrical Engineers, 1998.

[7] **J. PAULINDER** «Operation and control of HVDC links embedded in AC systems», Thèse de license, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2003.

[8] **G.ASPLUND, L. CARLSSON, O. TOLLERZ** «50 ans de transport d'énergie en CCHT», Revue ABB 4/2003.

[9] **P. KUNDUR** «Power system stability & control », chapter 10, high voltage direct current.

[10] **K. PADIYAR** «HVDC power transmission systemes technology & système

interactions ».

[11] **E. JONCQUEL** «Fonctionnement des liaisons à courant continu haute tension» Techniques de l'ingénieur. Génie électrique A. 2006, vol. D10, n° D4762.

[12] **E. JONCQUEL** «Transport d'énergie en courant continu à haute tension» Techniques de l'ingénieur. Génie électrique A. 2005, vol. D10, n° D4761.

[13] **G. ASPLUND, ET AL** «Liaison CCHT légère fondée sur des convertisseurs à circuit intermédiaire de tension», Revue ABB 1/1998, 4–9.

[14] **J. LUCAS** «High Voltage Direct Current Transmission», High Voltage Engineering, 2001.

[15] «Les cours universitaire ELE653», Lien cc, page 1/23.

[16] «HVDC for beginners and beyond», Carl Barker Chief Engineer, Systems.

[17] **K VIJAY. SOOD** «HVDC and FACTS Controllers Applications of Static Converters in Power Systems», 2004 Kluwer Academic Publishers Boston.

[18] **J. ARRILLAGA, Y.H. LIU, N.R. WATSON** «Flexible Power Transmission: The HVDC Options», 2007 John Wiley & Sons Ltd, West Sussex PO19 8SQ, England.

[19] **G.CHATEIGNER, M. BOËS, D.BOUIX, J.VAILLANT, D.VERKINDERE** «Manuel de génie électrique» Tirage corrigé 2007. Dunod, Paris, 2006.

[20] **P. MAYE** «Aide-mémoire Composants Electroniques» 3ème édition- Dunod, Paris, 2005.

[21] **N. FIORINA** «harmoniques en amont des redresseurs des ASI» Cahier Technique Merlin Gerin n° 160, édition mars 1993

[22] «Harmoniques et convertisseurs de fréquence».Guide technique n° 6

[23] « The History of High Voltage Direct Current Transmission», 3ème Edition, Australasian Engineering Heritage Conference 2009.

[24] **J. GRIFFIN, S. IBRAHIM** «Power Transmission with High-Voltage DC», San Jose State University, December 2003.

[25] **JINGQIANG LI** «High Voltage Direct Current Transmission», thèse de Master, Espoo, 2009.

[26] **J. ARRILLAGA, N.R. WATSON, B.C. SMITH, A.R. WOOD** «Power System Harmonic analysis», 1998.

[27] **R, H. HUANG, H. LIPS, N. CHRISTL, G. WILD, D. RETZMANN, P. RIEDEL, K.SADEK, C. STORNER, M. GUMBERT** «HVDC Systems and Their Planning», Siemens AG.

[28] **IEC/TR 62001** «High-voltage direct current (HVDC) systems – Guidebook to the specification and design evaluation of AC filters», 1ère Edition 2009.

[29] **T. ARRO, O. SILAVWE** «Coupling of transients in HVDC lines to adjacent HVAC lines and its impact on the ac line protection», Thèse de Master, Göteborg, Sweden 2007.

[30] **CUIQING DU** «VSC-HVDC for Industrial Power Systems», Thèse de doctorate, Göteborg, Sweden 2007.

[31] «Technologie en tension continue sous-marine technologie en tension continue terrestre (aérienne et enfouie) technologie en câbles a isolation gazeuse technologie en supraconducteurs», Rapport Approuvé, CESI, 2006.

[32] **J. PAULINDER** «Operation and control of HVDC links embedded in AC systems» Thèse pour degree ingénieur, Göteborg, Sweden 2003.

[33] **W. HAMMER** «Dynamic Modeling of Line and Capacitor Commutated Converters for HVDC Power Transmission», Thèse de doctorat, 2003.

[34] **H. ARMANDO** «Study of supplementary controls for embedded hvdc links in ac power systems» Thèse de degree de Master, Göteborg, Sweden, 2008.

[35] **W .THÉODORE, G. SYBILLE** «Electrotechnique», 4ème Edition de Boeck Université, Belgique, 2005.

[36] **M. A. LAUGHTON, D. J. WARNE** "Electrical Engineer's Reference Book», Sixteenth Edition, 2003.

[37] **T. DROBIK** «High-voltage direct current transmission lines», IEEE Conference Publishing, Poland.

[38] **S. A. ZIDI, S. HADJERI, M. K. FELLAH** «Dynamic Performance of an HVDC Link» Regular paper, 2005.

[39] **M. LEILA** «Etude par simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des courants harmoniques génèrent par un pont redresseur triphasé». Thèse de magister du l'institut de Badji Mokhtar. ANNABA.2002.

[40] M. A. E. ALALI «Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension». Thèse de doctorat de l'université Louis Pasteur Strasbourg I, France, 2002.

[41] A. BOUZIDI «Filtrage hybride des harmoniques», mémoire de magister du l'institut de Badji Mokhtar. ANNABA.

[42] B. STEEVE « étude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique », université du Quebec a Chicoutiml, 2007.

[43] M. ABDUSALAM « Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales » thèse Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2008.

[44] « Energie et convertisseurs d'énergie » Chapitre 3, Licence EEA Module U6, Université de Savoie.

[45] site internent **www.Google.com**

- Institut Schneider formation / MDG9A152l/05-99 ;
- Lycée Edouard Belin 70000 BTS Electrotechnique.

[46] Norme internationale « Détermination des pertes en puissance dans les postes de conversion en courant continu à haute tension », Première édition, CEIAEC 61 803,1999.

[47] Groupe de chercheur de Math Works de MATLAB « SimPowerSystems For Use with Simulink Version 3 » TransÉnergie Technologies Inc., under sublicense from Hydro-Québec, and The MathWorks 2003.

Abstract

To ensure energy efficiency, the transmission with DC represents an important application in the process of electrical energy. This technique is mainly used for the transport of energy at long distance and for the interconnection of the independent electrical communications. An important disadvantage of conversion AC-DC is that it is accompanied by a generation of current and tensions harmonic. Within the framework of this project, we made an over flight of analysis on the performance operation of a connection CCHT in normal circumstances and causes of harmonic pollution on the networks, of the effects as of the existing means which make it possible to minimize these effects.

Keywords: transport of electrical energy to high voltage CCHT; unit of conversion containing thyristors; harmonics; means of mitigation.

Résumé

Pour assurer une efficacité énergétique, le transport à courant continu CCHT représente une application importante dans le processus d'énergie électrique. Cette technique est principalement utilisée pour le transport d'énergie à long distance et pour l'interconnexion des réseaux électriques indépendants. Un inconvénient important de la conversion AC-DC est qu'elle s'accompagne d'une génération de courant et de tensions harmoniques. Dans le cadre de ce projet, nous avons fait un survol d'analyse sur la performance fonctionnement d'une liaison CCHT en régime normal et causes de la pollution harmonique sur les réseaux, des effets ainsi que des moyens existants qui permettent de minimiser ces effets.

Mots-clés : transport d'énergie électrique à haute tension CCHT; unité de conversion à base de thyristors; harmoniques ; moyens de mitigation.

ملخص:

لضمان كفاءة الطاقة، تقنية نقل التيار المستمر عالي الجهد يمثل تطبيق مهم في عملية الطاقة الكهربائية. هذه التقنية تستعمل بشكل رئيسي لنقل الطاقة لمسافات طويلة و لتربط بين نظامين مختلفي التردد. مشاكل التحويل التيار المتردد إلى التيار المستمر مصحوب بتوليد التوافقيات التوتر و التيار. ضمن إطار هذا المشروع، قمنا بعملية التحليل على عملية أداء عمل ربطة سي سي أش تي في الظروف الطبيعية و أسباب التلوث المتناسق على الشبكات، التأثيرات كذلك الوسائل التي تجعل من الممكن تقليل هذه التأثيرات.

الكلمات المفتاحية: نقل التيار المستمر عالي الجهد، وحدة التحويل التي تحتوي على المقحل، التوافقيات، وسائل التخفيف من حدت التوافقيات.