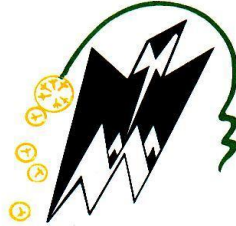


**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA**  
**RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE DE MOULOU D MAMMERI**  
**FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET DE L'INFORMATIQUE**  
**DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE**



# **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

Option : Machine Electrique

Thème

**Contrôle - commande d'un système de  
puissance à liaison CCHT biterminale**

Proposé et dirigé par :

M<sup>r</sup>.HADJ-SAID Karim

Présenté par :

M<sup>elle</sup>.HARROUCHE Samira

M<sup>r</sup>. BELAID Ahmed

M<sup>r</sup>. HOCEINI Nacim

Promotion :

2008-2009

## Remerciements

Premièrement nous louons Dieu de nous avoir donné le courage pour mener ce présent travail à terme.

On tient à remercier particulièrement notre promoteur Monsieur HADJ-SAID, pour son aide et sa disponibilité, et pour nous avoir offert la possibilité de réaliser notre projet de fin d'études.

Nous remercions les membres du jury, qui nous ont fait l'honneur de participer au jugement de ce travail.

Par ailleurs, nos remerciements vont à l'ensemble de nos professeurs du Génie Electrique, qu'ils veuillent bien trouver ici l'expression de nos sentiments les plus respectueux.

Introduction générale .....	01
-----------------------------	----

## **Chapitre I : Configuration et composants d'un système de transmission CCHT**

I-1 Introduction .....	03
I-2 Classification des liaisons CCHT .....	05
• I-2-1 Liaisons mono polaires .....	05
• I-2-2 Liaisons bipolaires .....	05
• I-2-3 Liaisons homopolaires .....	06
• I-2-4 Liaisons dos à dos .....	07
I-3 Composant d'un système de transmission CCHT .....	07
• I-3-1 Unité de conversion .....	09
• I-3-2 Les transformateurs .....	09
• I-3-3 Les convertisseurs .....	09
• I-3-4 Les réactances de lissage .....	10
• I-3-5 Les filtres d'harmoniques et compensation de la puissance réactive .....	11
○ Filtre coté réseau alternatif .....	11
○ Filtre coté convertisseur .....	11
○ Filtre coté continu .....	11
○ Filtres homopolaires .....	11
○ Inductance continue .....	11
• I-3-6 Les alimentations des puissances réactives .....	12
○ Compensateurs synchrones .....	12
○ Bans de capacités .....	12
• I-3-7 Les électrodes .....	13
• I-3-8 La liaison continue .....	13
○ Ligne aérienne .....	13
○ Câbles sous terrains et câbles sous marins .....	14
• I-3-9 Appareillage de coupure .....	15
• .....	
I-4 Systèmes CCHT multi terminaux .....	15
• I-4-1 Configuration parallèle .....	15
• I-4-2 Configuration série .....	18

## Chapitre II : Etude théorique des convertisseurs et équations de performance

II-1 Introduction .....	20
II-2 Caractéristiques des valves .....	20
• II-2-1 Association en série/ parallèle .....	20
• II-2-2 Tension .....	21
• II-2-3 Amorçage des thyristors .....	21
• II-2-4 Caractéristiques thermiques .....	21
• II-2-5 Caractéristiques mécaniques .....	22
II-3 Evaluation technique des valves .....	22
• II-3-1 Thyristors .....	23
• II-3-2 Convertisseurs avec un plus grand nombre de pulsations .....	23
• II-3-3 Valves et thyristors commandés par la lumière .....	23
• II-3-4 Le thyristor GTO .....	24
• II-3-5 Thyristor SE .....	24
• II-3-6 Le thyristor IGCT .....	25
• II-3-7 Le transistor MOS .....	25
• II-3-8 Le transistor bipolaire .....	26
• II-3-9 L'IGBT .....	26
• II-3-10 Le MOSFET de puissance .....	26
II-4 Les circuits convertisseurs .....	27
• II-4-1 Transformateur de conversion .....	27
• II-4-2 Convertisseurs statiques .....	28
II-5 Analyse du pont triphasé à thyristor .....	28
• II-5-1 Hypothèses simplificatrices .....	28
• II-5-2 Analyse du pont avec inductance de source négligeable .....	29
a- Sans retard à l'amorçage ( $\alpha=0$ ) .....	29
➤ Etude des tensions .....	32
➤ Etude des courants .....	33
b- Avec retard à l'amorçage ( $\alpha\neq 0$ ) .....	35
➤ Etudes des tensions .....	36
➤ Etude des courants .....	37

II-6 Analyse avec le phénomène de commutation .....	38
• II-6-1 Tension de commutation .....	39
• II-6-2 Etude de la commutation .....	40
○ II-6-2-1 Le déroulement de la commutation .....	40
○ II-6-2-2 Etude des chutes de tension .....	41
a- Chute de tension ohmique .....	41
b- Chute de tension dans les composants .....	41
c- Etude de la chute de tension due a l'empiétement .....	42
II-7 Fonctionnement onduleur .....	43
II-8 Les ratés de commutation .....	46
II-9 Convertisseur à ponts multiples .....	46
• II-9-1 Association en série .....	46
• II-9-2 Association parallèle .....	47

### **Chapitre III : contrôle des systèmes CCHT**

III-1 Réglage des liaisons en courant continu .....	49
• III-1-1 Généralités .....	49
• III-1-2 Réglage rapide par les angles .....	50
• III-1-3 réglage lent par les régulateurs en charge .....	52
• III-1-4 structure et réglage des liaisons multiterminales .....	53
• III-1-5 réglage des stations dos à dos .....	55
III-2- Le contrôle des liaisons en courant continu .....	55
• III-2-1 Principe de contrôle d'une liaison à courant continu .....	55
• III-2-2 Caractéristiques E-I des convertisseurs .....	56
• III-2-3 Contrôle de la puissance .....	58
• III-2-4 Effet des fluctuations de tension .....	59
• III-2-5 Inversion de la puissance .....	60
• III-2-6 Schéma équivalent d'une liaison CCHT .....	61
• III-2-7 Système de contrôle.....	62

## **Chapitre VI : Etude d'un système de puissance à liaison CCHT biterminale (simulation)**

IV-1 Introduction .....	64
IV-2 Etude d'un système bipolaire en régime permanent .....	64
IV-3 Simulation d'un système de transmission CCHT biterminale.....	73
• IV-3-1 Description du circuit.....	73
• IV-3-2 Caractéristiques de la station .....	74
○ IV-3-2-1 Coté redresseur .....	74
○ IV-3 -2-2 Coté onduleur .....	76
• IV-3 -3 Schéma bloc de la simulation .....	78
• IV-3-4 Résultats de la simulation .....	79
• IV-3-5 Interprétation des résultats .....	83
IV-4 Conclusion .....	85
Conclusion générale .....	86

## **Introduction générale :**

Les réseaux électriques fonctionnent de plus en plus proches des limites d'utilisation de leurs matériels. De plus la consommation d'électricité est en constante augmentation du fait de l'industrialisation, de l'urbanisation et de la croissance démographique.

Cependant les pressions écologistes associées aux lourdeurs administratives rendent très difficiles la construction de nouveaux équipements (lignes, centrales, etc..... ).

Il résulte de tout ceci que les réseaux doivent transporter plus de puissance avec un dimensionnement non proportionnel. Les grands distributeurs d'énergie cherchent donc des solutions à ces problèmes.

Aujourd'hui, l'énergie électrique est produite, transportée et distribuée essentiellement en courant alternatif ; néanmoins la maîtrise des transferts sous cette forme du courant pose de plus en plus des problèmes difficiles à résoudre :

- La répartition des transits d'énergie dans les diverses branches des réseaux maillés se fait suivant des lois physiques et non économiques.
- La consommation de la puissance réactive doit être compensée afin de limiter les pertes et les chutes de tension.
- Le réglage de la fréquence et celui de la phase des différents alternateurs interconnectés doivent être coordonnés.

Afin de résoudre les problèmes de saturation des réseaux et de porter les solutions aux limites du courant alternatif, le courant continu se pose comme une option adéquate dans le transport de l'énergie électrique.

En effet grâce au progrès exceptionnels réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, de nouvelles liaisons en courant continu ont été construites à travers le monde.

Pour avoir de l'énergie électrique en tension et courant continus, des stations de conversion bipolaire, dos à dos ou multiterminales ont été insérées dans les réseaux de transport. L'ensemble forme un système nommé système CCHT (courant continu à haute tension).

La contrôlabilité du sens du transit de puissance donne au mode de transfert de l'énergie en courant continu un avantage certain dans plusieurs domaines d'applications.

Parmi ces domaines, on peut citer, l'interconnexion asynchrone entre deux réseaux et le transport d'énergie électrique à grandes distances.

Les systèmes de conversion à liaisons bipolaires sont les plus utilisés en raison des avantages qu'on tire du contrôle de ces systèmes.

Notre travail consiste en l'étude du contrôle-commande des stations de conversion à liaison biterminale.

Le premier chapitre portera sur l'étude générale d'un système de transmission CCHT. Dans le second chapitre, on abordera l'analyse du pont de Gatz qui est le composant principal des convertisseurs.

Le contrôle des systèmes CCHT à liaison bipolaire fera l'objet du troisième chapitre. Une simulation d'un système de puissance à liaison CCHT biterminale mettant en évidence les modes de contrôle dans différents fonctionnements illustrera le travail dans le quatrième chapitre.

Nous terminerons notre travail en concluant sur le rôle de la contrôlabilité des systèmes de conversion dans le transport de l'énergie électrique.

## ***Chapitre I : Configuration et composants d'un système de transmission CCHT***

### **I.1 Introduction :**

Le premier système de puissance électrique (comprenant un générateur, des câbles et des charges) a été construit par Thomas Edison. L'historique station de Pearl Street à New York qui fonctionna à partir de 1882. Il s'agissait d'un système de courant continu dans lequel la génératrice fournissait de la puissance à 59 consommateurs disposés à l'intérieur d'une surface d'environ 1,5 Km de rayon [4].

Le courant alternatif à 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 : thyatron et valves à vapeurs de mercure ; mais c'est en 1889 que la première ligne de transmission AC (monophasé) fonctionna en Oregon entre Willamette Fall et Portland [3].

Le développement des systèmes polyphasés a ensuite marqué l'émergence des systèmes à courant alternatif pour les raisons suivantes :

- Les niveaux de tensions peuvent être facilement transformés dans les systèmes à courant continu, permettant ainsi une flexibilité dans l'utilisation de tensions différentes pour la génération, la transmission, et la consommation.
- Les génératrices (ou moteurs) à courant alternatif sont plus simples à concevoir que les génératrices (ou moteurs) à courant continu.

Dans les années cinquante, avec le développement des interrupteurs au mercure, les systèmes de transport à haute tension continu (CCHT : Courant Continu à Haute Tension) sont devenus attractifs pour les transmissions de puissance longues distances.

La première transmission de puissance utilisant les systèmes CCHT a été commercialisée en 1954. Il s'agissait d'une interconnexion entre l'île de Gotland et la Suède. Elle était réalisée par l'intermédiaire d'un câble sous-marin de 96 km de long, assurant un transport de puissance de 20 MW avec une tension nominale de 100 kV. Il y'a actuellement plus de 50 systèmes CCHT qui opèrent à travers le monde et beaucoup d'autres sont en phase de conception ou de construction [4].

Les raisons pour lesquelles la considération des systèmes CCHT apporte un intérêt dans la transmission de puissance et ce par rapport à un transport alternatif peuvent être représentées comme suit :

- On peut transporter le courant continu sur de grandes distances en utilisant des câbles sous-terrains ; la capacité des câbles limite le transport en courant alternatif à des distances de quelques dizaines de kilomètres. Au-delà de cette limite, la puissance réactive générée par le câble excède même sa propre capacité ampérique.
- Une interconnexion entre réseaux alternatifs n'est faisable qu'au prix de dispositifs complexes et de technologie de régulation sophistiquée pour des raisons de stabilité et de différence entre les fréquences nominales des deux systèmes ;
- Par contre la fréquence, la réactance et le déphasage n'interviennent pas dans le transport en courant continu. Seule la résistance de la ligne et la différence des tensions entre les deux extrémités déterminent la puissance transmise.
- Transmission de puissance longues distances par l'intermédiaire de lignes aériennes. Lorsque les deux types de transmissions sont envisageables, la décision finale est prise en fonction du coût total des deux alternatives. Ce coût inclut entre autres celui des lignes (inducteurs, isolateurs et pylônes) et celui de l'exploitation. Il est montré dans la figure ci-dessous que le coût d'une transmission à courant continu est plus faible que celui d'une transmission à courant alternatif pour les distances supérieures à 600 Km.

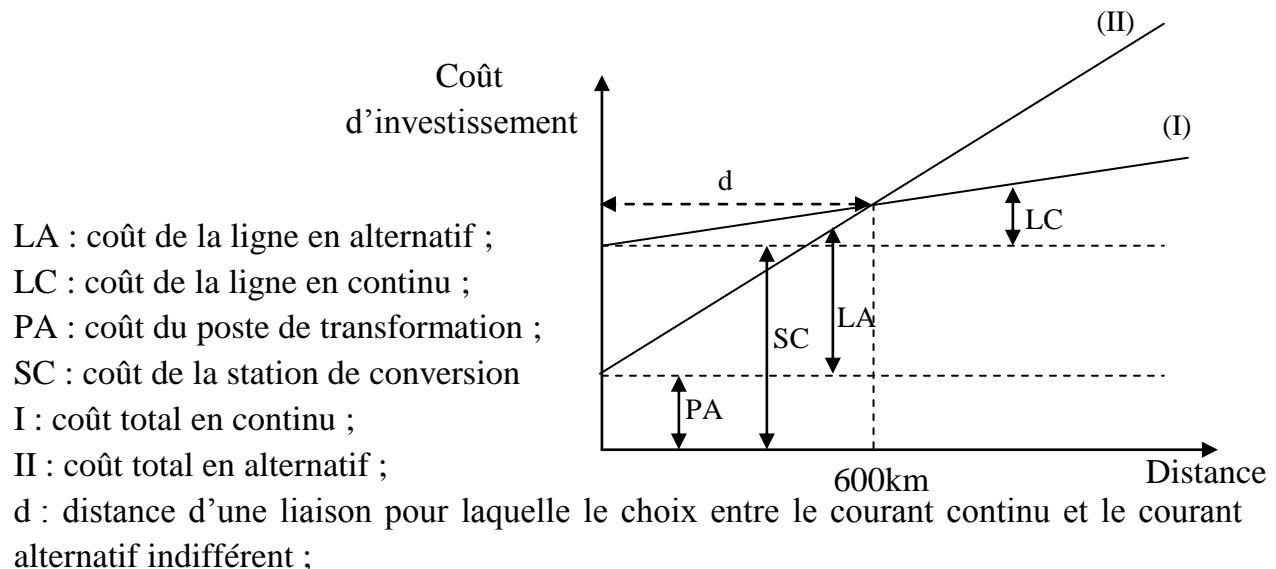


Figure I-1 coût relatifs comparés d'une liaison à courant continu et une autre à courant alternatif en fonction de la longueur d'une ligne [2]

## I.2 Classification des liaisons CCHT :

Les systèmes CCHT peuvent être classifiés en plusieurs catégories :

### I.2.1 Liaison monopolaire :

La liaison monopolaire utilise un seul conducteur et le chemin du retour est assuré par la terre ou l'eau. Les considérations économiques conduisent souvent à privilégier les systèmes dans le cadre de transmission par câble. A la place d'un retour par la terre, un conducteur métallique à basse tension peut être utilisé lorsque la résistivité de la terre est trop importante, ou encore, lorsque les interférences avec des structures métalliques sous-terraines ou sous-marines sont préjudiciables.

La configuration correspondante est représentée par la figure I-2

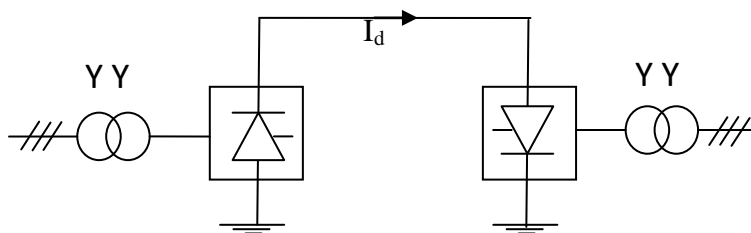


Figure I-2: liaison monopolaire [6]

### I.2.2 Liaison bipolaire :

La liaison bipolaire utilise deux conducteurs l'un de polarité positive et l'autre de polarité négative avec une mise à la terre commune. Un convertisseur est installé à l'extrémité de chacune des lignes. Normalement, les courants qui traversent les conducteurs sont égaux et il n'y a pas de courant qui s'écoule dans la terre.

Les deux pôles peuvent fonctionner indépendamment et par conséquent si un pôle est isolé à cause d'un défaut sur son conducteur, l'autre pôle peut transporter la moitié de la puissance nominale, voire plus en considérant les possibilités de surcharges des convertisseurs et de la ligne. Du point de vue des performances, une configuration bipolaire est considérée comme étant l'équivalent d'une transmission alternative utilisant deux lignes. Généralement, elle est utilisée pour une transmission de puissance par voie aérienne. La configuration est donnée par la figure I-3

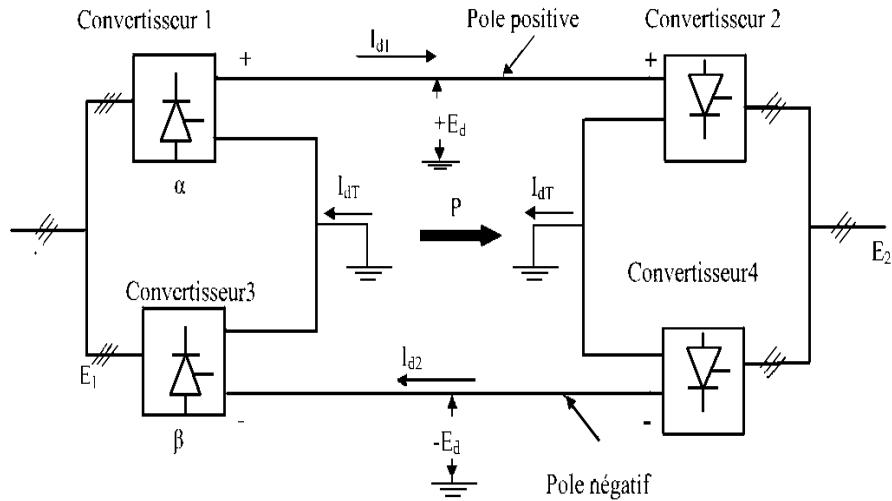


Figure I-3 : liaison bipolaire [1]

### I.2.3 Liaison homopolaire :

Une liaison homopolaire a deux conducteurs ou plus, tous ayant la même polarité. Habituellement, une polarité négative est préférée parce qu'elle cause moins d'interférences radio. Le chemin de retour pour un tel système est la terre. Quand il y'a défaut sur un conducteur, le convertisseur entier est disponible pour alimenter le conducteur restant qui, ayant quelques possibilités de surcharges, et peut porter plus de puissance sans aucun problème.

Cette liaison offre un avantage à cet égard dans les situations où le courant continu au sol est acceptable. Le schéma est le suivant :

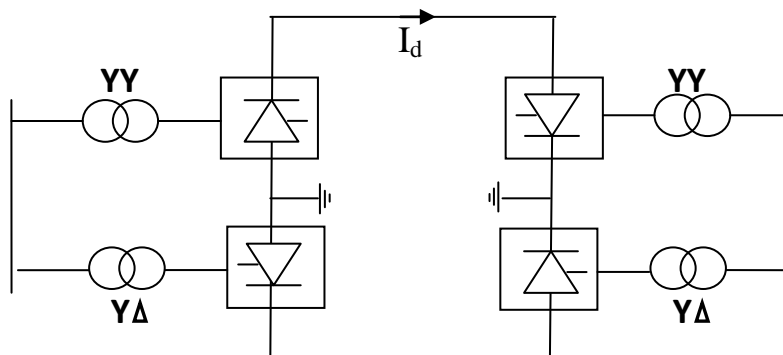


Figure I-4 : liaison homopolaire [6]

## I.2.4 Liaison dos à dos

Les convertisseurs «dos à dos» relient deux réseaux à courant alternatif par une ligne dont la longueur n'excède guère une dizaine de mètres. Le redresseur (convertisseur courant alternatif-courant continu) et l'onduleur (convertisseur courant continu - courant alternatif) sont localisés dans une même station, c'est-à-dire un même bâtiment. Ces convertisseurs permettent un échange de puissance entre les deux réseaux, tout en permettant à chacun de fonctionner à sa propre fréquence et à sa propre tension. Les perturbations apparaissant sur un réseau ne viennent donc pas déstabiliser l'autre. De plus, la valeur et la direction de la puissance peuvent être changées en quelques millisecondes. Cette catégorie de système est couramment utilisée pour interconnecter deux systèmes à courant alternatif asynchrones qui peuvent opérer à des fréquences nominales différentes.

La configuration d'une liaison dos à dos est donnée sur la figure I-5

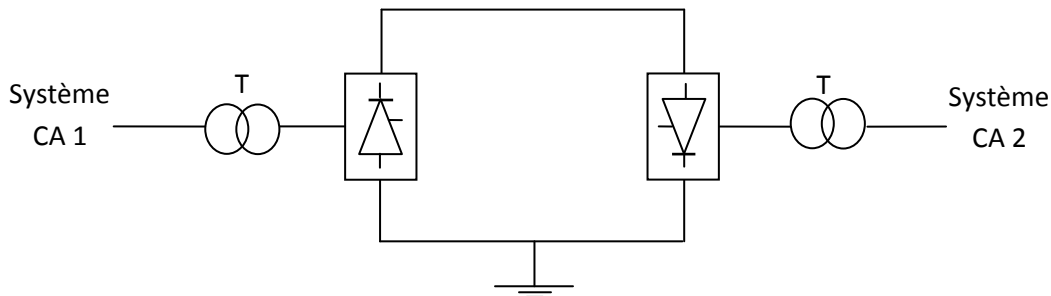


Figure I-5 : liaison dos à dos

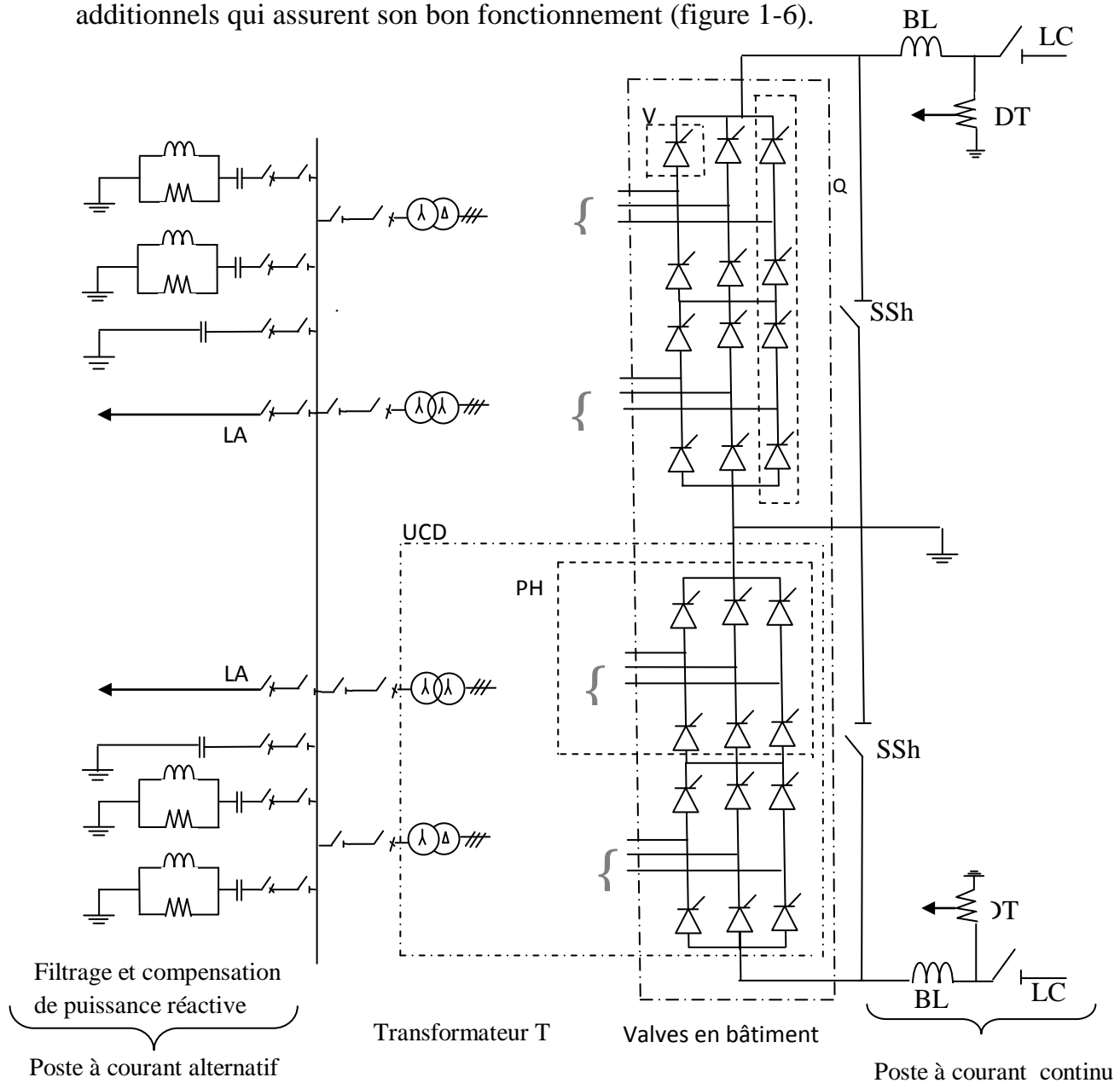
## I.3 Composants d'un système de transmission CCHT :

Le principe de fonctionnement peut être résumé de la manière suivante : la puissance alternative fournie par une ou plusieurs sources est dans un premier temps transformée en une puissance continue.

Ce processus s'effectue avec un rendement très proche de l'unité, au prix toutefois de la génération de deux sous produits gênants :

- De la puissance réactive absorbée, qui doit être compensée en partie sur place ;
- Des harmoniques, qui doivent être filtrés pour ne pas perpétuer dans le réseau alternatif avec une amplitude intolérable.

Le schéma général d'une station de conversion comprend plusieurs composants additionnels qui assurent son bon fonctionnement (figure 1-6).



- |                                |                            |   |
|--------------------------------|----------------------------|---|
| BL bobines de lissage          | LC ligne à courant continu | SSh sectionneur de shuntage des ponts       |
| DT diviseur de tension continu | PH pont hexaphasé          | UCD unité de conversion dodécaphasée        |
| LA ligne à courant alternatif  | Q quadrivalve à thyristor  | V valve à thyristor (bras de convertisseur) |



Figure (I-6) : schémas généraux d'une station de conversion [3]

### **I.3.1 Unité de conversion :**

L'unité de conversion est l'association d'un ou deux ponts de Graetz triphasés, d'un transformateur ainsi que du matériel de commande et de protection .Elle constitue l'élément principal d'une station de conversion, elle est sous deux formes :

- Unité hexaphasée : c'est une unité où le transformateur alimente un convertisseur en pont d'indice de pulsation  $p=6$ .
- Unité dodécaphasée : c'est une unité de conversion constituée de deux ponts hexaphasés mis en série, dans ce cas l'indice de pulsation de convertisseur est  $p=12$ , elle est alimentée par un transformateur de deux secondaires l'un en étoile et l'autre en triangle.

L'association de ces deux dernières avec d'autres appareillages tels que les filtres du côté alternatif et du côté continu, les compensateurs de la puissance réactive et les accessoires de commande constituent une station de conversion.

### **I.3.2 Les transformateurs :**

Ils assurent essentiellement deux fonctions : le découplage galvanique entre les réseaux à courant alternatif et à courant continu et le changement de tension.

L'alimentation d'une unité de conversion peut être assurée par deux transformateurs triphasés distincts de couplage : étoile-étoile et étoile-triangle soit par trois transformateurs monophasés comportant deux secondaires connectés en étoile pour l'un et en triangle pour l'autre.

Le choix entre ces deux solutions résulte de considérations sur le coût total des transformateurs.

L'extrême sensibilité de ces transformateurs à la pollution de l'huile exige en outre des opérations de filtrage à l'huile très minutieuses.

### **I.3.3 Les convertisseurs :**

Le pont triphasé représenté sur la figure I-6 est la principale configuration utilisée dans la transmission en CCHT, comparée à d'autres configurations.

La configuration en pont requiert une meilleure utilisation du transformateur du convertisseur et le plus bas pique (sommet) de la tension inverse à travers les valves du convertisseur.

Le convertisseur en pont permettant la conversion d'énergie électrique (de l'alternatif en continu ou de continu en alternatif) est constitué d'un ou deux ponts de Graetz triphasé, pont hexasphasé. Ce dernier est l'association en série de deux montages l'un à cathode commune et l'autre à anode commune, alimentés par les mêmes enroulements secondaires d'un transformateur.

Le pont de Graetz triphasé est un convertisseur d'indices de pulsation  $p=6$ , il fournit une tension redressée dont la valeur moyenne  $V_d$  s'exprime en fonction de la tension alternative composée efficace  $V_c$  de la source et de l'angle de retard à l'amorçage :

$$V_d = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} V_c \cdot \cos \alpha$$

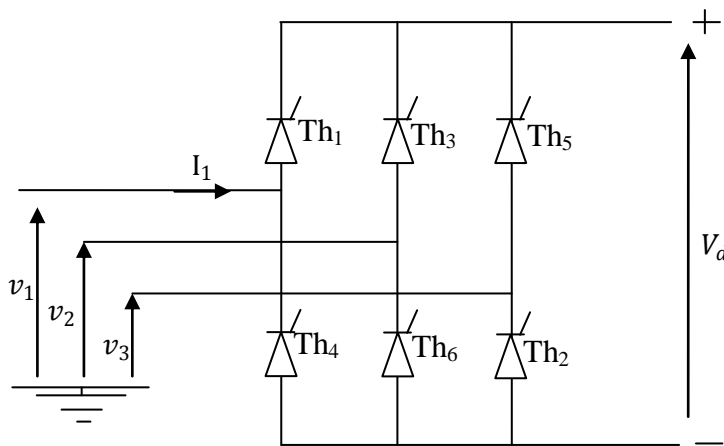


Figure I- 7 : pont triphasé tout thyristors

### I.3.4 Les réactances de lissage :

Les réactances de lissage ont pour but de lisser le courant continu, c'est-à-dire limiter les variations. Elles servent aussi à empêcher une montée trop rapide du courant en cas de court-circuit sur la ligne. Cela permet au convertisseur de prendre le contrôle du courant avant que celui-ci ne devienne trop grand.

La forte valeur d'inductance impose souvent d'utiliser des bobines à noyaux magnétiques refroidies par l'huile. Des mesures de protection doivent être prises pour éviter l'échauffement des pièces métalliques du voisinage, du fait de l'ondulation du courant qui induit un champ magnétique variable et des courants de Foucault dans les pièces métalliques.

### **I.3.5 Les filtres d'harmoniques et compensation de la puissance réactive :**

Le problème de filtrage consiste à agencer des bobines d'inductances et des condensateurs afin de réaliser des circuits passifs qui ont pour but d'abaisser l'impédance harmonique du réseau comme ils participent aussi à la compensation de l'énergie réactive qu'est fournie par les condensateurs .Et pour cela, on distingue plusieurs filtres :

- **Filtres côté réseau alternatif :**

En fonction du réseau alternatif, des filtres peuvent être nécessaires pour empêcher toute pénétration d'harmoniques vers la station de conversion, d'autant plus qu'aucune compensation de réactif n'est nécessaire.

- **Filtres côté convertisseur :**

La fréquence élevée des commutations dans l'unité de conversion rend les harmoniques qu'elle génère plus nocifs pour le matériel mais également plus faciles à filtrer .Aussi, ces filtres permettent de cantonner les harmoniques de hautes fréquences à l'intérieur de la station de conversion.

- **Filtres côté continu :**

Des filtres peuvent être installés sur le côté continu pour limiter l'ondulation de tension continue sans pour autant augmenter la valeur de la capacité continue, dans les cas où cette dernière est limitée par d'autres contraintes.

- **Filtres homopolaires :**

Certaines liaisons dont les câbles avoisinent des installations sensibles doivent être équipées d'un filtre bloquant la composante homopolaire .Il s'agit d'un transformateur de rapport unité et d'impédance de court-circuit négligeable.

- **Inductance continue :**

Une inductance peut être ajoutée en série dans le circuit continu pour atténuer les harmoniques sans augmenter la capacité continue.

Une autre fonction de cette inductance est de modifier la fréquence de résonance du circuit continu, au cas où celle-ci est trop proche d'une fréquence générée par le convertisseur.

Il faut noter qu'une inductance série modifie la dynamique du système en s'opposant aux variations brutales du courant continu, donc de la puissance active transmise.

### **I.3.6 Les alimentations des puissances réactives :**

La puissance réactive absorbée par les convertisseurs peut être fournie par les réseaux alternatifs auxquels les convertisseurs sont raccordés. En pratique, on utilise une source locale comme un compensateur statique ou un compensateur synchrone. Comme la puissance active transportée varie au cours de la journée, on doit ajuster la puissance réactive qui est fournie entièrement par des bancs de condensateurs.

- **Compensateurs synchrones :**

On appelle un compensateur synchrone, un moteur synchrone qui tourne à vide et dont la seule fonction est de fournir ou d'absorber de la puissance réactive sur une ligne de transport ou sur un réseau.

Dans certaines stations de conversion, raccordées à des réseaux peu puissants, insulaires par exemple, des machines synchrones fonctionnant en compensateur sont utilisées, non seulement pour fournir de la puissance réactive, mais surtout pour apporter une inertie suffisante et garantir un certain maintien de la fréquence en cas d'interruption brutale du transit de la liaison continue. L'inconvénient majeur est que ces machines sont chères aussi bien à l'achat qu'en entretien. Elles posent aussi des problèmes difficiles à résoudre, de maintien du synchronisme durant un court-circuit sur le réseau alternatif. [3].

- **Bancs de capacités :**

La solution du problème de filtrage consiste à agencer des bobines d'inductance et des condensateurs afin de réaliser des circuits passifs LC, éventuellement amortis par des résistances auxiliaires. Les condensateurs contribuent par ailleurs à fournir de la puissance réactive à la fréquence fondamentale. Le cas échéant, des bancs de condensateurs complètent les moyens de compensation. Filtres et bancs de condensateurs sont mis sous ou hors tension par des disjoncteurs conventionnels, à air comprimé et, de plus en plus au SF6

### **I.3.7 Les électrodes :**

L'électrode de mise à la terre mérite une attention particulière car la présence d'un courant continu circulant dans la terre produit de la corrosion. Pour cette raison, l'électrode est toujours placée à quelques kilomètres du poste de conversion. Le conducteur qui est mis à la terre est soit un câble blindé, soit une ligne aérienne supportée par des poteaux. On apporte un soin particulier à la construction de l'électrode afin de réduire la résistance de mise à la terre. Cette résistance devient importante lorsque la ligne fonctionne temporairement en mode monopolaire. Dans ce cas, le courant circulant dans le sol peut être de l'ordre de 1000 à 2000 A [1]. La chaleur créée pourrait assécher le sol, ce qui provoquerait une augmentation progressive de la résistance. Les meilleurs sites de mise à la terre utilisent une masse d'eau, comme la mer.

### **I.3.8 La liaison continue :**

Dans les systèmes CCHT, on a deux types de liaisons :

- Lignes aériennes ;
- Câbles sous-terrains et câbles sous-marins.

#### **➤ Lignes aériennes :**

Le dimensionnement d'une ligne aérienne en CCHT relève des 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.

A densité de courant égale dans les deux cas, un même conducteur peut ainsi transporter 1.41 fois plus de puissance en courant continu qu'en courant alternatif. Ce rapport est de 1.5 si l'on prend en compte un facteur de puissance de 0.945 pour la charge de la ligne en alternatif. Donc, si l'on compare la puissance transmissible par une ligne triphasée à trois conducteurs à celle d'une ligne à courant continu à deux conducteurs de même type, on constate que les deux ouvrages peuvent transmettre la même puissance [3].

Une ligne à courant continu est plus simple et moins coûteuse puisqu'elle n'a besoin que de deux conducteurs. Le nombre de chaînes d'isolateurs est réduit d'un tiers par rapport à la ligne en alternatif. Les pylônes sont également plus légers, moins chers et plus étroits pour la ligne continue. Le coût de la ligne à courant continu est ainsi réduit d'environ 30% par rapport à celui d'une ligne en alternatif.

### ➤ Câbles sous-terrains et câbles sous-marins :

Les types de câbles utilisables pour le transport en courant continu à haute tension sont les suivants :

- Le câble de type « solide » est le plus économique, aujourd'hui encore [3]. Son isolation est assurée par des bandes de papier imprégnées d'huile à haute viscosité. Ce type de câble peut être utilisé aujourd'hui pour des tensions continues allant jusqu'à 400kV. Il n'y a pas de limitation de longueur, sauf à considérer les moyens de transport et de pose pour de très longs câbles qui peuvent atteindre des milliers de tonnes [3].
- Les câbles à l'huile sous pression sont complètement remplis d'huile à basse viscosité maintenue sous pression. La pression d'huile nécessaire augmentant avec la longueur, de longs câbles sous-marins demanderaient une pression extrêmement élevée et la longueur maximale serait approximativement de 60km. Des câbles de ce type sont actuellement en service pour des tensions inférieures à 300kV [3].
- Dans l'avenir, on peut s'attendre à ce que le câble à isolation synthétique (polyéthylène extrudé par exemple), largement utilisé en courant alternatif et dans les liaisons continues à base de convertisseur source de tension devient un concurrent potentiel des câbles que l'on vient de décrire. Plus léger, il présenterait l'avantage économique de simplifier considérablement la pose en mer. Cependant, d'importants travaux de développement restent encore à effectuer pour résoudre le difficile problème des charges d'espace, nuisibles à la tenue diélectrique en cas d'inversion de tension, phénomène courant dans les liaisons utilisant des convertisseurs à thyristors.

En plus de ces deux types de liaisons, on peut trouver :

- Une liaison de communication afin de commander les convertisseurs situés aux deux extrémités de la ligne, par exemple pour maintenir la marge de courant  $\Delta I$ , l'ondulation située à une extrémité de la ligne doit connaître à tout instant la consigne de courant  $I_R$  affichée au poste redresseur. Cette information est transmise continuellement entre deux postes, généralement par micro-onde ou fibre optique [1].

### **I.3.9 Appareillage de coupure :**

Il est nécessaire de placer des appareils de coupure et de protection des deux côté alternatif et continu de la liaison.

Un disjoncteur principal situé au point de connexion sert à connecter ou à déconnecter la station de conversion du réseau alternatif. Il peut être équipé de résistances de pré-insertion pour limiter les pointes de courants.

Vue le temps d'ouverture exigé (de l'ordre de la milliseconde), il faut utiliser un interrupteur statique, ce qui pose des problèmes de coûts et de pertes Joule dans ce composant supplémentaire.

### **I.4 Systèmes CCHT multiterminaux :**

De par le développement et le succès grandissant des transmissions en courant continu entre deux terminaux, les concepteurs des systèmes de puissance ont réalisé que les liaisons CCHT multiterminales pouvaient être beaucoup plus attractives, et ce afin d'exploiter pleinement les avantages économiques et techniques de la technologie CCHT.

Les systèmes CCHT multiterminaux se déclinent suivant deux configurations :

- Les liaisons parallèles ;
- Les liaisons séries.

Le choix de l'une ou de l'autre solution résulte de la contrainte de transporter la puissance sous la tension continue la plus élevée possible pour réduire les pertes, mais aussi de l'intérêt économique de concevoir des convertisseurs tirant le meilleur profit des capacités en courant des thyristors disponibles.

#### **I.4.1 Configuration parallèle :**

La connexion en parallèle de plusieurs unités de conversion permet de mieux s'adapter aux étapes successives de construction d'un ouvrage de transport dont la capacité doit augmenter au cours du temps .On peut ainsi exploiter l'ouvrage à la tension nominale dès la mise en série de la première unité de conversion dans chaque station de liaison (Figure I-8). Dans une configuration parallèle, les convertisseurs opèrent tous à la même tension nominale, les connexions peuvent être soit radiales (Figure I-9), soit maillées (Figure I-10). Les connexions radiales sont préférées .En effet, bien que les connexions maillées offrent plus de redondances, elles demandent

néanmoins des longueurs de ligne plus importantes et par conséquent, elles sont onéreuses.

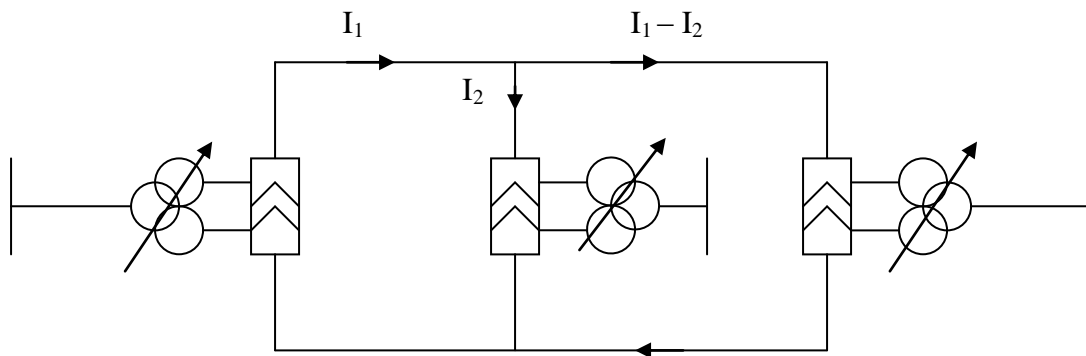


Figure I-8 : liaison à courant continu multiterminale, schéma parallèle [2]

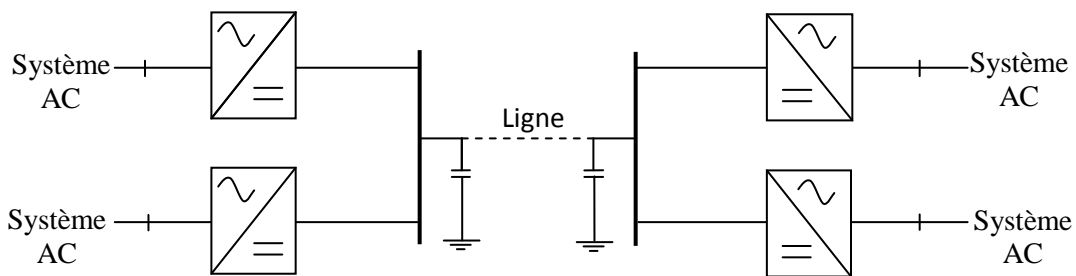


Figure I-9 : Connexion radiale [4]

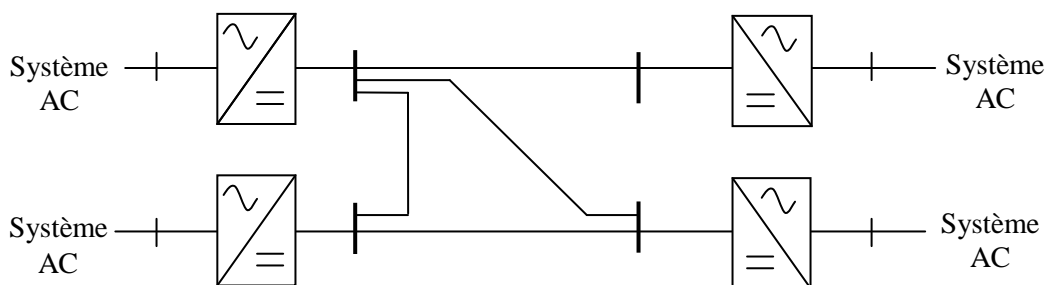
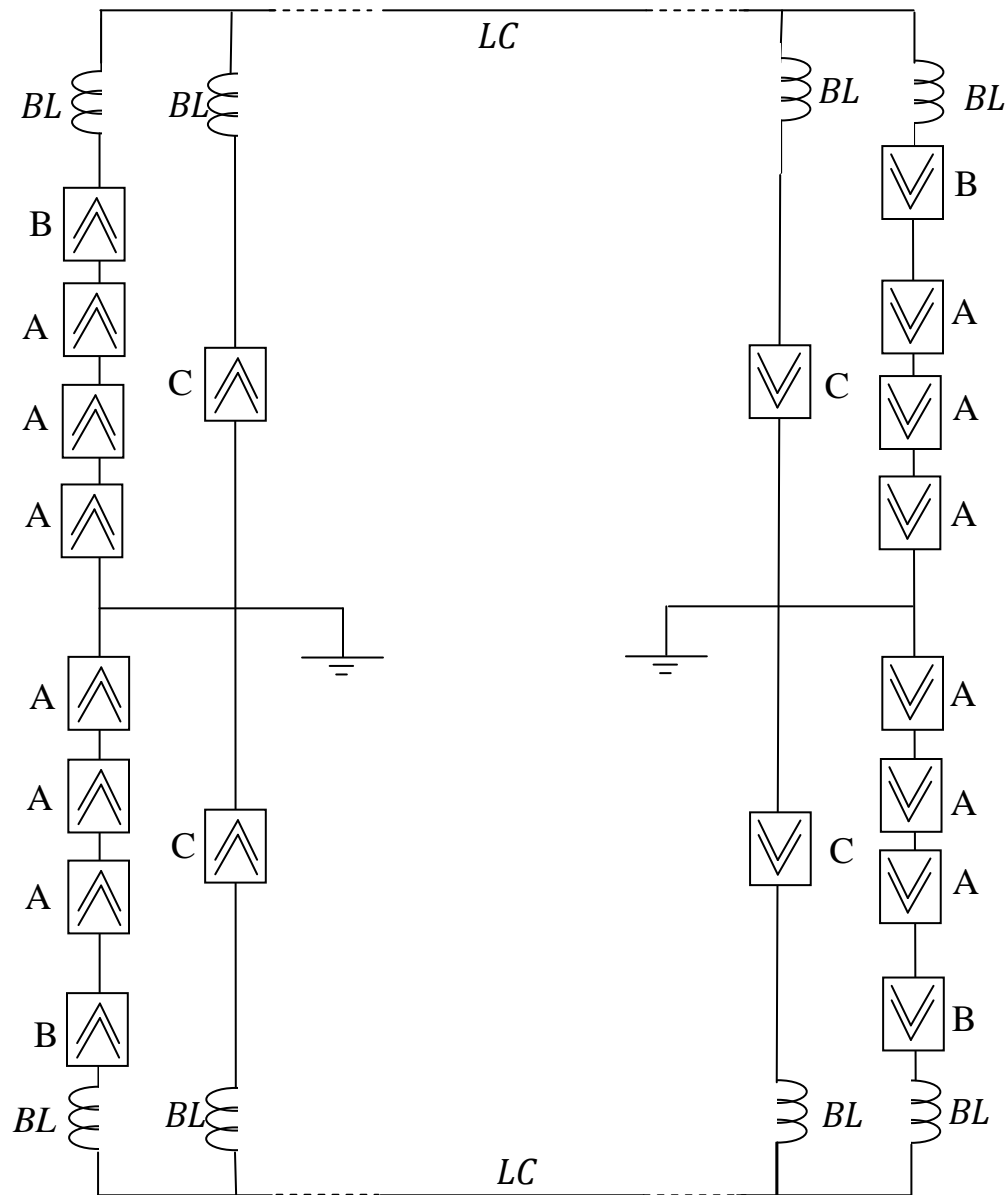


Figure I-10 : Connexion maillée [4]

Exemple de configuration parallèle :

La liaison Pacific Inertie (figure I-11), initialement à base de convertisseurs à valves de mercure, a été étendue par l'ajout en série et en parallèle de convertisseurs à thyristors : la puissance est passée de 1600 à 2000 MW (+ou- 400 à + ou - 500 KV) par l'ajout en 1985 de convertisseurs en série puis à 3100 MW par l'ajout en 1989 de convertisseurs en parallèle. [3]



- A : unités de conversion hexaphasées de 133 kV et 2000 A, installées en 1970  
(Valves à vapeur de mercure)
- B : unités de conversion hexaphasées de 100 kV et 2000 A, installées en 1985  
(Valves à thyristors)
- C : unités de conversion dodécaphasées de 500 kV et 1100 A, installées en 1989  
(Valves à thyristors)
- BL : bobines de lissage du courant
- LC : ligne aérienne à courant continu

Figure (I-11) : Association d'unités de conversion : schéma unifilaire de la liaison Pacific inertie (Etats-Unis) [3]

## I.4.2 Configuration série :

Pour transporter une puissance sous des tensions continues élevées et si elle utilise la pleine capacité des thyristors, la mise en série des unités de conversion, est plus avantageuse car la mise hors circuit est plus simple puisque la fermeture d'un disjoncteur suffit à son élimination.

Les figure I-12 et figure I-13 représentent les schémas d'une configuration série d'une liaison à courant continu multiterminale.

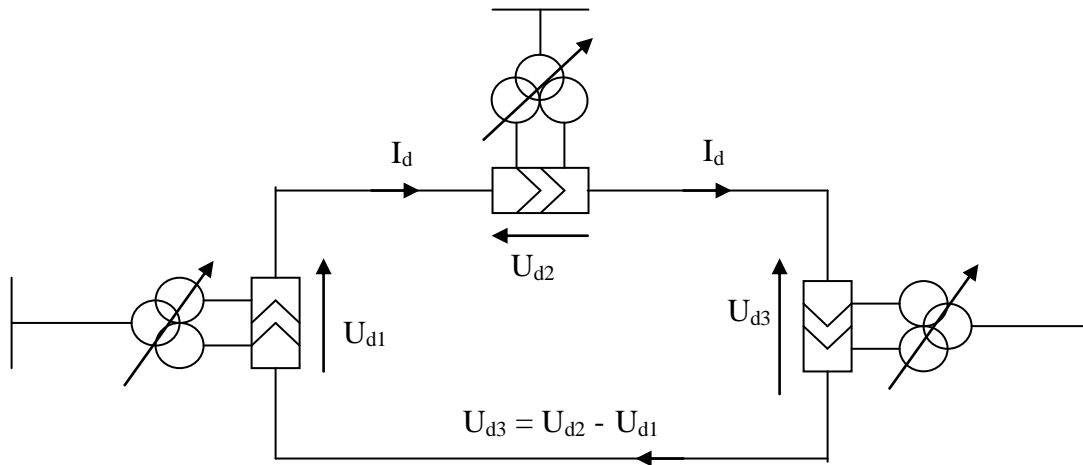


Figure I-12 : liaison a courant continu multiterminale, schéma série [2]

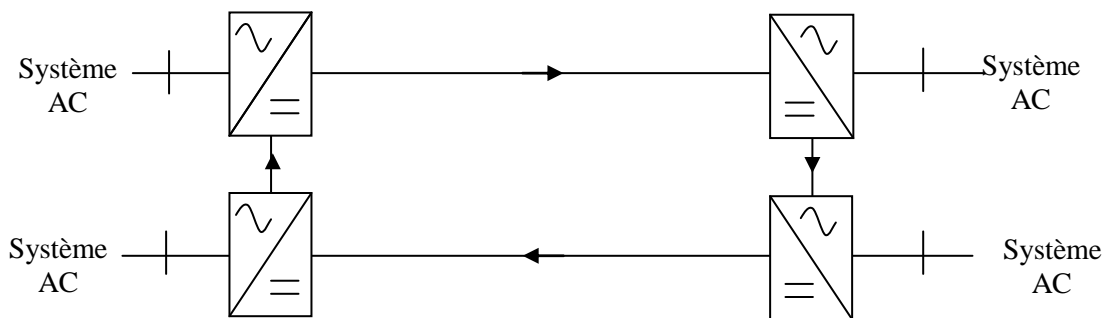
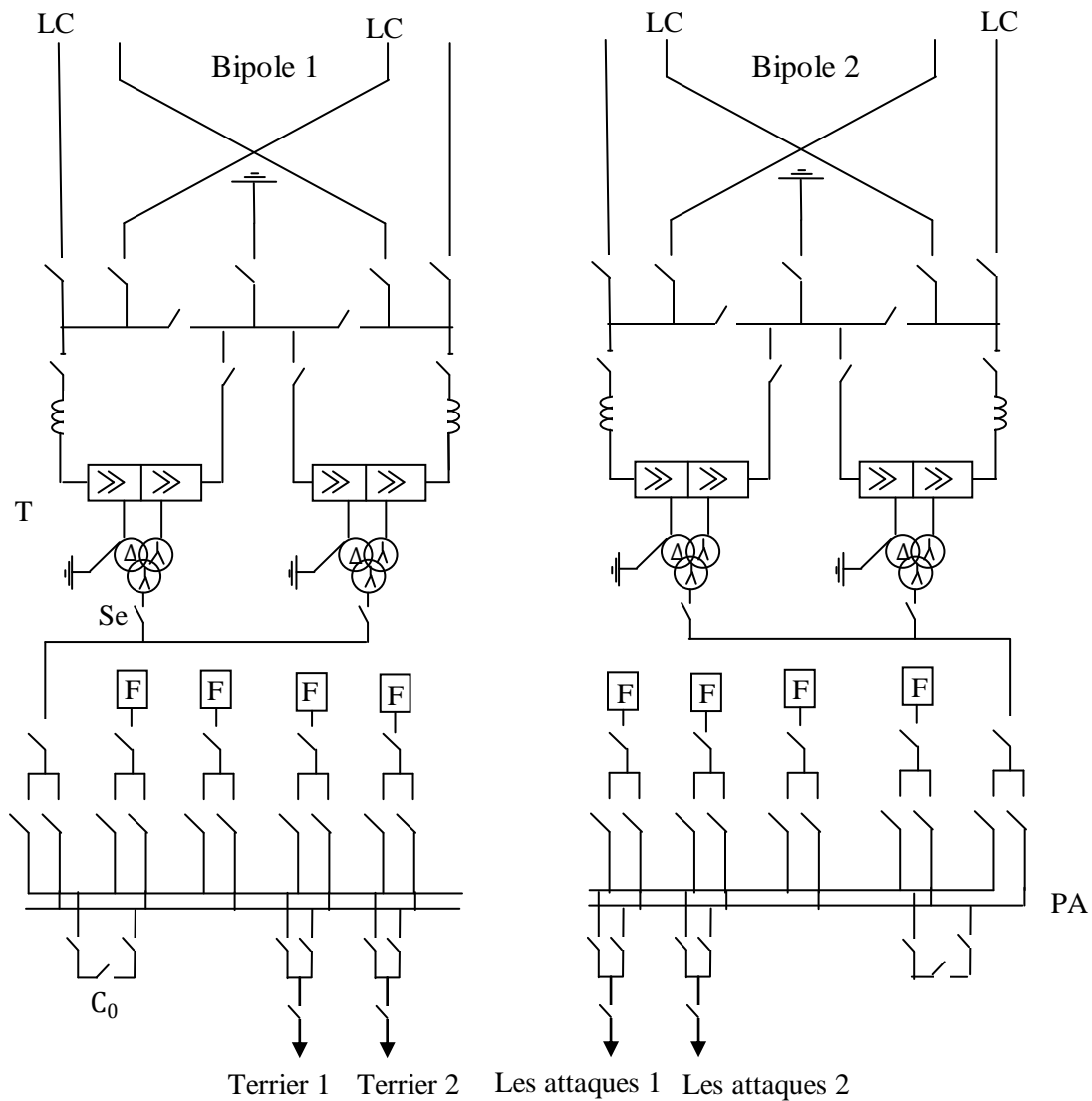


Figure I-13 : schéma de principe d'une liaison a courant continu multiterminale [4]

Exemple de configuration série :

La station de conversion française de l'interconnexion par câbles sous-marins de 2000MW entre la France et l'Angleterre comporte, par exemple, deux bipôles avec chacun deux unités de conversion de 500 MW sous+ et -270KV associées en série (figure I-14) [2].



Se : Sectionneur

C : 4 convertisseurs de 500M sous  $\pm 270$  kV

F : 8 gradins de filtres de 150Mvar

LC : ligne à courant continu (pour compenser le champ magnétique perturbateur il faut rapprocher dans une même tranchée les câbles transportant des courants de sens opposés)

PA : Poste alternatif à 400 kV

T : 4 unités de transformateurs de 681 MVA

C<sub>0</sub> : Couplage

Figure (I-14) : mise en série des unités de conversion (Schéma unifilaire) [2]

## ***CHAPITRE II : Etude théorique des convertisseurs et équations de performance***

### **II-1 Introduction :**

Le développement de l'électronique de puissance a augmenté et a amélioré les capacités des équipements de conversion, de protection et de commande en termes de matériels et de logiciels.

Les progrès considérables réalisés dans la technologie des semi-conducteurs de puissance au silicium ont permis la conception des valves à haute tension. Les performances de commande de ces dispositifs ont joué un rôle prépondérant dans la constitution des valves.

### **II-2 Caractéristiques des valves :**

En dépit des performances des valves, les possibilités offertes par le thyristor sont encore très inférieures aux besoins des convertisseurs fonctionnant sous très haute tension. L'association de plusieurs thyristors élémentaires s'avère ainsi nécessaire et soulève de multiples problèmes dont quelques solutions retenues par les constructeurs sont présentées ci-après :

#### **II-2-1 Association en série /parallèle :**

Vu les très fortes intensités de courant possibles, l'assemblage en parallèle de deux thyristors n'est plus justifié aujourd'hui. Cela peut toutefois être fait pour d'autres raisons comme celle de diminuer les pertes par conduction. Dans ce cas, les thyristors associés en parallèle doivent être appairés.

Pour atteindre des tensions élevées adaptées au transport de grandes puissances, l'assemblage en série de plusieurs thyristors est nécessaire. La maîtrise de la répartition de tension entre tous les thyristors en série est assurée par un réseau diviseur de tension branché en parallèle sur chaque niveau de thyristor. La tension continue doit en particulier être répartie uniformément.

Comme une très grande dispersion résulterait des disparités inévitables des courants de fuite des thyristors, un réseau de résistances, donc dissipatif est nécessaire pour obtenir une répartition acceptable. Par ailleurs, les surtensions transitoires doivent aussi être équiréparties. Une chaîne de condensateurs s'avère être la meilleure solution pour contrebalancer l'effet des capacités parasites, d'autant que chaque condensateur constitue un des éléments d'un classique circuit RC visant à limiter les surtensions appliquées à chaque thyristor individuel durant son blocage.

## **II-2-2 Tension :**

Afin d'assurer le transport de grandes puissances avec un minimum de pertes , il faut augmenter la tension c'est-à-dire mettre en série plusieurs thyristors qui nécessitent la bonne répartition des tensions à leurs bornes, pour cela il faut des diviseurs de tensions branchés en parallèle sous chaque niveau de thyristor ainsi qu'une chaîne de condensateurs pour contrebalancer l'effet des capacités parasites .

## **II-2-3 Amorçage des thyristors :**

L'amorçage des différents thyristors doit être aussi simultané que possible afin que les derniers thyristors à s'amorcer ne soient pas soumis à des tensions excessives. De plus, l'amorçage ne doit pas être provoqué par un parasite et les dispositifs d'amorçage au potentiel haute tension doivent être alimenté en énergie. Pour satisfaire ces impératifs de précision d'immunité aux perturbations électromagnétiques, d'isolement galvanique et d'alimentation, les solutions techniques des constructeurs, très diversifiées dans les premières valves à thyristors, ont convergé après quelques années, grâce notamment à l'apparition sur le marché de fibres optiques monobrins à faibles pertes de transmission [3].

## **II-2-4 Caractéristiques thermiques :**

Les progrès des valves à thyristors ont rendus possible la maîtrise de la technologie des thyristors de puissance : il a été ainsi possible de réduire le nombre de thyristors en série dans un rapport de 3 à 1, pour une même tension redressée, et de réduire la chute de tension à l'état passant, la chute de tension de chaque composant individuel n'augmentant que légèrement en comparaison de l'augmentation de la tension de tenue maximale.

Plusieurs fluides ont été utilisés pour assurer la dissipation thermique des thyristors.

- **L'air** présente les avantages de très grande simplicité de mise en œuvre (moyennant cependant des débits considérables de plusieurs  $m^3/s$ ) ainsi que d'excellentes propriétés isolantes. Dans cette technologie de refroidissement, plusieurs circuits d'évacuation des pertes sont utilisés en cascade : radiateur thyristor-air, air circulant dans un échangeur air-eau, eau circulant dans un échangeur eau-air extérieur [3].

- **Le Fréon** a été envisagé du fait de ces excellentes caractéristiques calorifiques et isolantes mais les contraintes environnementales en empêchent l'utilisation.
- **L'eau désionisée**, additionnée éventuellement de glycol, présente parmi tous les fluides utilisés couramment dans l'industrie le meilleur compromis de performances, coût, facilité d'utilisation et sécurité environnementale. Le refroidissement par eau a permis de diminuer notablement la taille des valves à thyristors [3].

## **II-2-5 Caractéristiques mécaniques :**

Une valve est constituée d'un empilement mécanique de modules aisément déplaçable par un seul opérateur, ce qui facilite la maintenance.

La structure quadruple de valves est suspendue depuis le plafond du hall par l'intermédiaire des isolateurs de porcelaine. Ils sont conçus pour supporter le poids et les charges additionnelles pendant la maintenance, ainsi que pour résister aux contraintes sismiques. Au dessus et au bas de la structure, un cadre métallique assure la stabilité mécanique des valves entre les cadres, les différents niveaux sont mécaniquement fixes à l'aide des tiges

## **II-3 Evolution technique des valves:**

Les nouvelles technologies des valves permettront toute une gamme de procédés de conversion à commutation forcée, nouveaux pour le transport d'énergie, mais déjà largement répandus dans l'industrie pour ses besoins d'alimentations secourues et d'entraînements à vitesses variables.

Trois avantages principaux sont attendus, par rapport à la technique des convertisseurs à commutation assistée par le réseau :

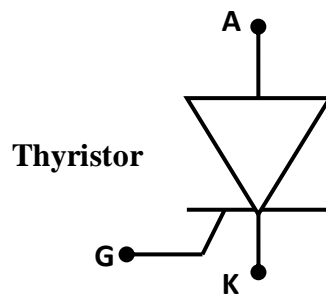
- Possibilité de régler indépendamment l'échange de puissance active et de puissance réactive avec le réseau alternatif associé : il en résultera une simplification notable des moyens de compensation de puissance réactive. Les énormes batteries de condensateurs utilisées aujourd'hui ne seront plus nécessaires, ce qui évitera tous les inconvénients de génération de surtensions qui leur sont attachés.
- Possibilité de commander la génération d'harmoniques émis par le convertisseur : cette commande se fait grâce à des techniques de commande par découplage (MLI : modulation de largeur d'impulsion), éliminant les

harmoniques de rangs faibles. Les filtres anti-harmoniques pourront être conçus pour filtrer des fréquences élevées avec un minimum de condensateurs.

- Indépendance beaucoup plus grande entre les conditions de fonctionnement d'un convertisseur à commutation forcée et l'état du réseau alternatif : cela a comme conséquence la possibilité de restaurer immédiatement l'échange d'énergie à l'élimination d'un défaut du réseau alternatif.

### II-3-1 Thyristor :

Réalisé pour des tensions jusqu'à 6000 V, des courants de plusieurs milliers d'ampères et une chute de tension directe d'environ 1,5 V, son amorçage ne nécessite qu'une faible impulsion de courant mais le blocage exige par contre d'annuler, par dérivation dans un circuit auxiliaire, la totalité du courant anodique ; un tel dispositif est encombrant et coûteux. Le thyristor est toutefois un composant fiable et économique à l'achat.



### II-3-2 Convertisseurs avec un plus grand nombre de pulsations :

Actuellement, l'utilisation dans les liaisons CCHT des convertisseurs avec un nombre de pulsations supérieur à douze est pratique courante, afin de simplifier le filtrage à la fois du côté alternatif et du côté continu. Il est possible d'augmenter le nombre de pulsations, par exemple de douze à quarante huit, en ajoutant quelques circuits supplémentaires au schéma de base du convertisseur à douze pulsations.

Cependant, les expériences sur des convertisseurs à nombre élevé de pulsations ont été arrêtées pour leur complexité et pour les problèmes causés lors d'une coordination d'isolement correcte.

### II-3-3 Valves et thyristors commandés par la lumière :

Ils sont appelés aussi LASCR (redresseur au silicium activé par la lumière). Ce sont des thyristors dont le déclenchement est provoqué non pas par une impulsion électrique sur la gâchette, mais par une source lumineuse. De tels types de thyristors ont permis l'élaboration des unités de commande dont l'élément de commande est une lampe à filament ou une LED, et dont l'élément de commutation est un thyristor. Ce qui permet d'isoler galvaniquement l'étage de commande de la partie commandée.

### II-3-4 Le thyristor GTO (gate turn off thyristor):

On peut assimiler un thyristor GTO à un thyristor équipé d'une commande de blocage dont le gain est cependant très faible. La gamme de puissance est équivalente à celle du thyristor mais c'est un composant relativement cher qui trouve la majorité de ses applications dans la commande des moteurs de traction.

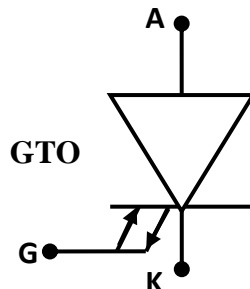
Il présente l'avantage par rapport au thyristor de pouvoir être commuté par une impulsion et bloqué par une autre impulsion inverse.

Pour un thyristor normal, il existe deux façons de le bloquer après qu'il ait été rendu passant :

- En coupant totalement la tension d'anode, ce qui a pour effet de faire descendre le courant d'anode en dessous du courant de maintien ;
- En baissant suffisamment le courant de maintien sans couper la tension d'anode.

Certaines applications sont un peu gênées avec ce type de fonctionnement. Aussi, des thyristors de type GTO ont vu le jour, permettant de passer de l'état conducteur à l'état bloqué au moyen d'une impulsion de tension négative appliquée sur la gâchette.

La même gâchette peut donc servir deux fonctions Marche/Arrêt, sans qu'il ait besoin de réduire ou faire disparaître le courant circulant entre anode et cathode.



### II-3-5 Thyristor SE (Shorted Emitter):

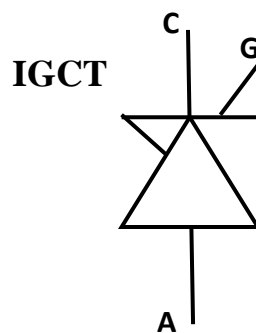
La technologie employée pour la fabrication des thyristors rend ces derniers très sensibles au déclenchement. Si cela apporte un plus pour la commande (moins de courant est nécessaire pour les activer), cela peut être un inconvénient dans certains environnements plus ou moins bruités (électriquement ou électromagnétiquement), et ou des déclenchements intempestifs peuvent alors se produire.

La technique courante pour limiter cette forte sensibilité consiste à ajouter une résistance entre la gâchette et la cathode, ce qui améliore en plus les caractéristiques de tenue en température. Les thyristors SE se voient tout simplement intégrer cette résistance dans leur boîtier au moment de la fabrication, ce qui évite de l'ajouter par la suite.

### II-3-6 Le Thyristor IGCT (Integrated Gate-Commutated Thyristor)

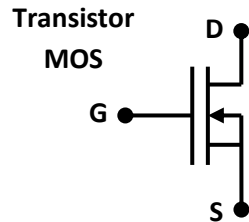
L'IGCT associe les performances exceptionnelles en commutation du thyristor GTO à commande intégrée et plusieurs évolutions technologiques au niveau du dispositif lui-même et de la commande de gâchette avec, à la clé, des perspectives intéressantes pour de nombreuses applications.

La commutation homogène améliore l'aire de fonctionnement de sécurité de l'IGCT jusqu'aux limites d'avalanche dynamique. Les qualités intrinsèques de l'IGCT permettent de s'affranchir des circuits amortisseurs. Une réduction des pertes autorise les applications haute fréquence jusqu'à plusieurs kHz.



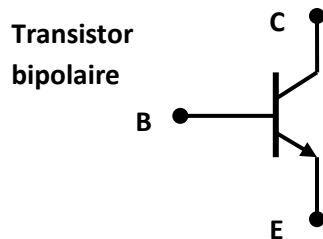
### II-3-7 Le transistor MOS (Metal Oxyde Semiconductor):

Séduisant par sa commande en tension et par ses temps de commutation inférieurs à 100 ns, ce transistor présente cependant l'inconvénient d'une chute de tension directe relativement importante par rapport à ses concurrents. Sa limite se situe vers 50 A et 500 V.



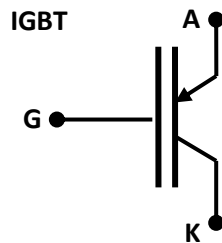
### II-3-8 Le transistor bipolaire :

Ce dispositif, sans doute le plus ancien, n'a vu sa montée en puissance que vers 1985 avec des modules Darlington triples (3 transistors en cascade) de 300 A, 1000 V et un gain d'environ 100. Malgré ce gain, la commande en courant aux fortes puissances reste pénalisante. Aux fortes puissances, les temps de commutation se situent environ à 1,5  $\mu$ s et la chute de tension directe à 1,5 V.



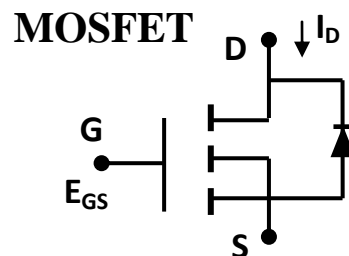
### II-3-9 L'IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor):

Du point de vue de l'utilisateur, on peut décrire sommairement l'IGBT comme un transistor bipolaire contrôlé par un transistor MOS qui apporte l'avantage d'une commande en tension et des temps de commutation très courts (300 ns) pour des niveaux de puissance similaires à ceux du bipolaire. Son principal inconvénient est sa chute de tension directe de l'ordre de 3 V pour des dispositifs de 1200 V.



### II-3-10 Le MOSFET de puissance

Le MOSFET de puissance est un semi-conducteur à trois bornes qui s'appellent drain D, source S et grille G. Le drain est l'anode alors que la source est la cathode. L'état de ce transistor dépend de la tension appliquée sur la grille. Le courant  $I_D$  dans le drain est amorcé en appliquant une tension  $E_{GS}$  positive d'environ 12 V entre la grille et la source. La conduction cesse dès qu'on diminue  $E_{GS}$  en dessous d'environ 1 V. Le courant dans la grille est extrêmement petit ; par conséquent, une très faible puissance est requise pour amorcer et désamorcer la conduction. Le MOSFET ne peut pas tolérer des tensions  $E_{DS}$  négatives. Afin de répondre à cette exigence, on y incorpore une diode. Les MOSFET de puissance peuvent porter des courants de quelques centaines d'ampères sous des tensions d'environ 500 V. Lors de la conduction, à l'état saturé, la chute de tension  $E_{DS}$  est comprise entre 2 V et 5 V.



## **II-4 Les circuits convertisseurs:**

### **II-4-1 Transformateur de conversion :**

Le transformateur convertisseur CCHT est une pièce maîtresse du transport courant continu haute tension. Outre sa vocation première de faciliter le transit de puissance entre deux niveaux de tension, il assure un certain nombre de fonctions supplémentaires, dont l'isolation galvanique des circuits alternatif et continu. Un large choix de prises de réglage permet d'optimiser son exploitation avec différents types de charge, sans perte de rendement.

Le transformateur convertisseur comporte généralement deux enroulements de valves, de mêmes puissances et tension, l'un couplé en étoile, l'autre en triangle. Cette configuration supprime les principaux harmoniques du convertisseur.

Un transformateur convertisseur CCHT peut être triphasé ou monophasé, selon la tension et la puissance assignées. Triphasé, il se compose de deux unités, l'une avec l'enroulement de valves pour le couplage étoile, l'autre avec l'enroulement de valves pour le couplage triangle. En monophasé, les deux enroulements de valves équipent généralement la même unité.

Une bonne répartition interne des tensions continues, aux bornes des valves du transformateur, nécessite une isolation différente de celle d'un transformateur classique.

### **II-4-2 Convertisseurs statiques :**

L'énergie électrique est disponible soit sous forme alternative (réseau de distribution électrique, alternateur) soit sous forme continu (batterie d'accumulation, génératrice à courant continu, alimentation par caténaire,..) .La charge peut nécessiter une alimentation en alternatif ou en continu. On définit quatre classes de convertisseurs transformant directement l'énergie électrique .Leurs gamme de puissance d'utilisation est très vaste : on en trouve des applications à partir de quelques watts (alimentations à découpage) .Les tensions mises en jeu s'échelonnent de quelques volts à plusieurs centaines de kilovolts. Les courants utilisés varient entre une fraction d'ampère et quelques centaines de kilo-ampères.

L'utilisation des interrupteurs à semi-conducteurs permet d'obtenir des convertisseurs statiques présentant de nombreux avantages.

## **II-5 Analyse du pont triphasé à thyristor (pont de Greutz) :**

L'échange d'énergie entre deux réseaux triphasés peut se faire par l'intermédiaire de deux ponts (redresseurs – onduleurs) ; Les deux ponts sont des ponts à thyristors.

En triphasé, le redresseur commandé comporte six thyristors .Le secondaire du transformateur est couplé en étoile et connecté à deux groupes de thyristors : un groupe à cathode commune ( $Th_1, Th_2, Th_3$ ) et un autre à anode commune ( $Th_4, Th_5, Th_6$ ).

Le thyristor conduisant est toujours connecté à la tension d'alimentation la plus positive, (négative) à condition qu'il ait reçu une impulsion d'allumage.

### **II-5-1 hypothèses simplificatrices :**

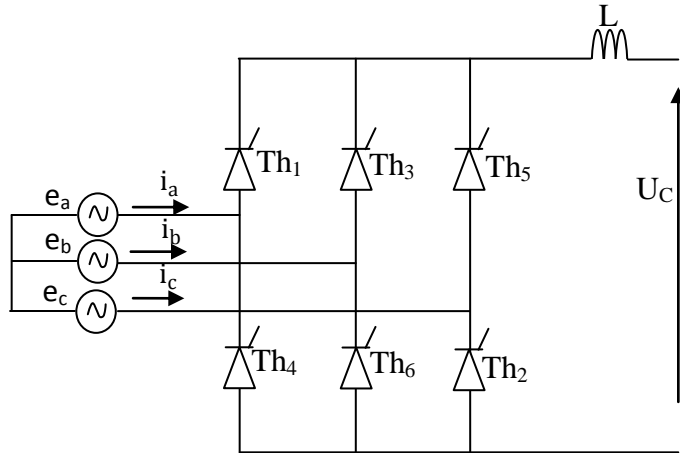
L'étude théorique du pont redresseur repose sur les hypothèses suivantes :

- Les tensions d'alimentation sont sinusoïdales et forment un système équilibré direct ;
- La commutation est instantanée c'est à dire que l'impédance ramenée au secondaire du transformateur est ignorée ;
- Le courant de charge est parfaitement lissé, ( $L = \infty$ ) ;
- Les thyristors considérés comme des interrupteurs parfaits (court-circuit à l'état conducteur et interrupteur ouvert à l'état de blocage).

### **II-5-2 Analyse du pont avec inductance de source négligeable :**

La figure (II-1) représente la structure d'un pont de Greutz à 6 pulsations, supposé idéal, que l'on obtiendra sous deux conditions :

- D'une part, des inductances nulles du coté alternatif, permettant des commutations de courant instantanées d'un thyristor à l'autre, et donc les empiétements nuls ;
- D'autre part, une inductance  $L$  infinie du coté continu, conduisant à une ondulation nulle et un lissage parfait. La cellule de commutation positive regroupe les trois thyristors  $Th_1, Th_3, Th_5$  dont les cathodes sont reliées à la borne d'entrée de la source de tension .La cellule de commutation négative regroupe les trois thyristors  $Th_2, Th_4, Th_6$  dont les anodes sont reliées à la borne de sortie de la source de tension .



Figure(II-1) Pont de Greatz tous thyristors

**a-Sans retard à l'amorçage  $\alpha=0$ :**

L'amorçage d'un thyristor bloqué peut être provoqué, à partir du moment où la tension à ses bornes devient positive, par une impulsion de courant appliquée sur sa gâchette. Son amorçage entraîne le blocage spontané du thyristor à l'état passant de la même cellule.

Dans le cas d'une modulation symétrique, deux thyristors placés sur des branches opposées du pont sont amorcés simultanément et les deux autres sont amorcés après un temps  $T/2$ ,  $T$  étant la période des grandeurs alternatives.

Les allures de la tension redressée, ainsi que les instants de conduction des différents thyristors sont représentées sur la figure (II-2)

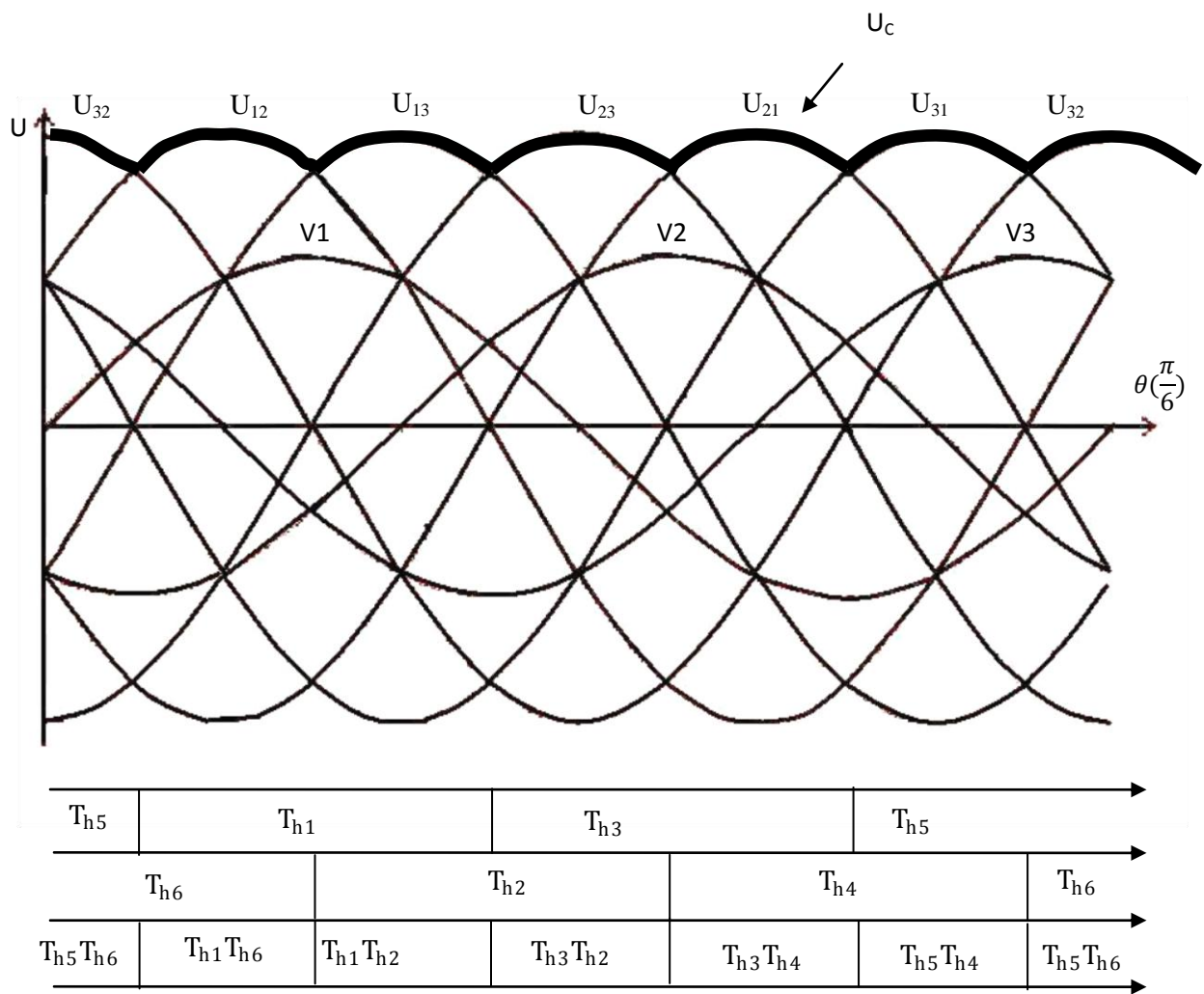


Figure (II-2) : Allure de la tension redressée ( $\alpha=0$ ).

Les étapes de commutation et la forme d'onde de la tension redressée sont représentées sur la figure (II-3).

Les valves  $T_1, T_3, T_5$  en haut et  $T_4, T_6, T_2$  en bas sont connectées aux phases  $e_a, e_b, e_c$ , respectivement.

Sur la figure (II-3-A) les phases  $e_a$  et  $e_b$  sont responsables de la conduction des valves  $T_1$  et  $T_6$ . Cet état de fonctionnement est maintenu jusqu'au point B où le courant commute de la valve  $T_6$  vers la valve  $T_2$  figure (II-3-B). Le courant commute de la valve  $T_1$  vers la valve  $T_3$  figure (II-3-C). Ceci est suivi par la commutation de la valve  $T_2$  vers la valve  $T_4$  figure (II-3-D), La valve  $T_3$  vers la valve  $T_5$  figure (II-3-E), La valve  $T_4$  vers la valve  $T_6$  figure (II-3-F) et la valve  $T_5$  vers la valve  $T_1$  figure (II-3-G). Ceci complète le cycle de séquences de commutation. La durée de conduction de chaque valve est  $\frac{1}{3}$  de la période, avec toujours deux valves conduisant en série.

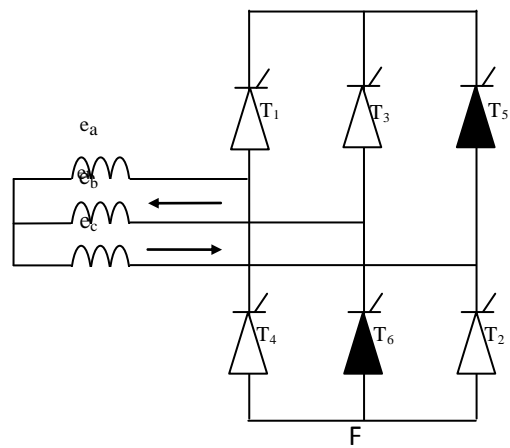
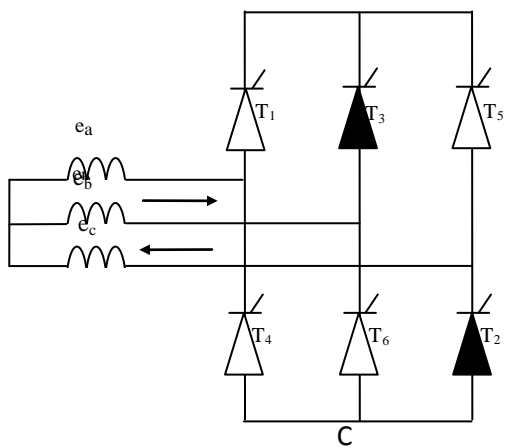
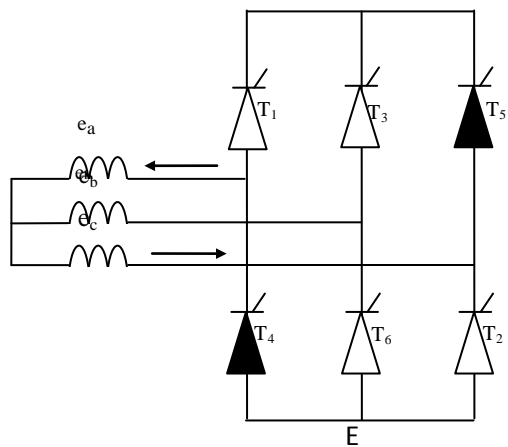
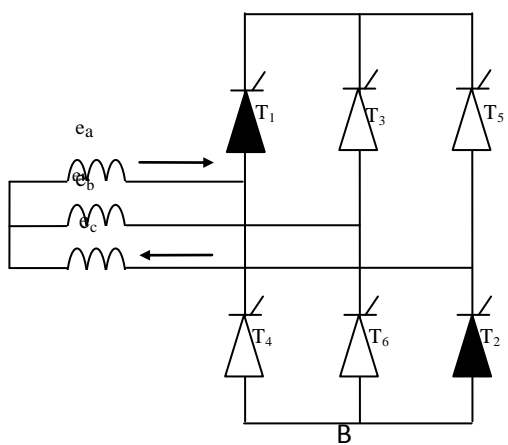
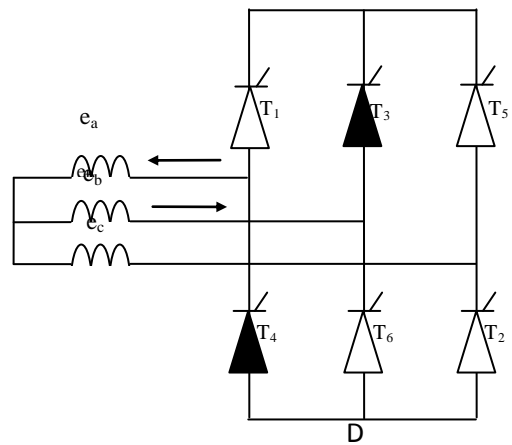
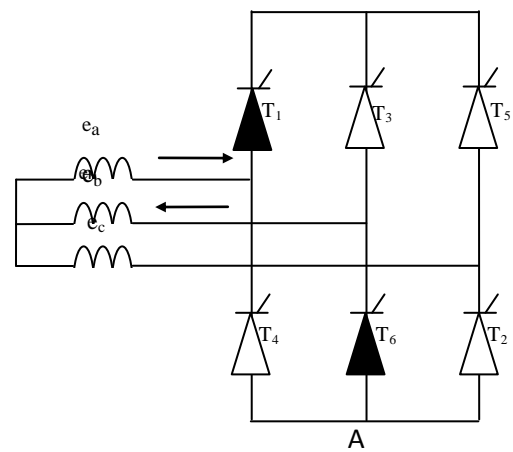


Figure (II-3) : Séquences de conduction du pont

➤ **Etude des tensions:**

**La valeur moyenne de la tension redressée :**

Soit  $(e_a, e_b, e_c)$  le système de tensions équilibré direct d'alimentation du pont :

$$\begin{aligned} e_a &= E\sqrt{2} \sin \theta \\ e_b &= E\sqrt{2} \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ e_c &= E\sqrt{2} \sin \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \end{aligned}$$

Avec  $\theta = \omega t$  et  $E$  : est la tension simple.

La tension redressée  $U_c$  est formée de six portions identiques de sinusoïdes par période  $T$  des tensions alternatives.

La tension moyenne redressée se calcule de la manière suivante :

$$\begin{aligned} u_{c_0} &= \frac{1}{T} \int_0^T U_c(\theta) d\theta \\ u_{cmoy} &= \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} U_{12}(\theta) d\theta \end{aligned}$$

Avec :

$$\begin{aligned} U_{12} = e_a - e_b &\quad \Longrightarrow \quad U_{12} = E\sqrt{2} \left[ 2 \cos\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \right] \\ U_{12} &= E\sqrt{2} \left[ 2 \cos\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \right] \\ U_{12} &= E\sqrt{2} \sqrt{3} \cos\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) \end{aligned}$$

$$\text{Donc : } u_{c_0} = \frac{3E\sqrt{2}\sqrt{3}}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \cos\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) d\theta$$

$$u_{c_0} = \frac{3E\sqrt{2}\sqrt{3}}{\pi} \left[ \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{3}\right) - \sin\left(\frac{\pi}{6} - \frac{\pi}{3}\right) \right]$$

$$u_{c_0} = \frac{3E\sqrt{2}\sqrt{3}}{\pi} \left[ \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) - \sin\left(-\frac{\pi}{6}\right) \right]$$

$$u_{c_0} = \frac{3E\sqrt{2}\sqrt{3}}{\pi} 2 \left[ \sin\frac{\pi}{6} \right]$$

$$u_{c_0} = \frac{3 E \sqrt{2} \sqrt{3}}{\pi}$$

D'où :

$u_{c_0} = \frac{3 E_m \sqrt{3}}{\pi}$
--

Avec  $E_m = E\sqrt{2}$  ( $E_m$  : valeur maximum de la tension simple)

**La valeur efficace de la tension redressée :**

$$U_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T U^2 d\theta$$

$$U_{\text{eff}}^2 = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} U_{12}^2 d\theta$$

Avec :  $U_{12} = E_m \sqrt{3} \cos(\theta - \frac{\pi}{3})$

$$U_{\text{eff}}^2 = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} [E_m \sqrt{3} \cos(\theta - \frac{\pi}{3})]^2 d\theta$$

$$U_{\text{eff}}^2 = \frac{9}{\pi} E_m^2 \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} [\cos(\theta - \frac{\pi}{3})]^2 d\theta$$

$$U_{\text{eff}}^2 = \frac{9}{\pi} E_m^2 \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} [\frac{1 + \cos 2(\theta - \frac{\pi}{3})}{2}] d\theta$$

$$U_{\text{eff}}^2 = \frac{9}{\pi} E_m^2 [\int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{2} d\theta + \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos 2(\theta - \frac{\pi}{3})}{2} d\theta]$$

$$U_{\text{eff}}^2 = \frac{9}{\pi} E_m^2 [\frac{\pi}{6} + (\sin \frac{\pi}{3})]$$

$$U_{\text{eff}}^2 = \frac{9}{2\pi} E_m^2 [\frac{\pi}{3} + \sqrt{3}]$$

$$U_{\text{eff}} = E_m \sqrt{\frac{3}{2} + \frac{9\sqrt{3}}{2\pi}}$$

D'où :

$$U_{\text{eff}} = E_m \sqrt{\frac{3}{2} [1 + \frac{3\sqrt{3}}{\pi}]}$$

➤ **Etude des courants :**

Puisqu'on a supposé que le redresseur débite un courant continu  $I_c$  parfaitement lissé et constant, chaque thyristor est traversé par  $I_c$  pendant l'intervalle de durée  $\frac{\pi}{3}$  ou il est conducteur au cours de la période  $2\pi$ .

**Courant dans le thyristor :**

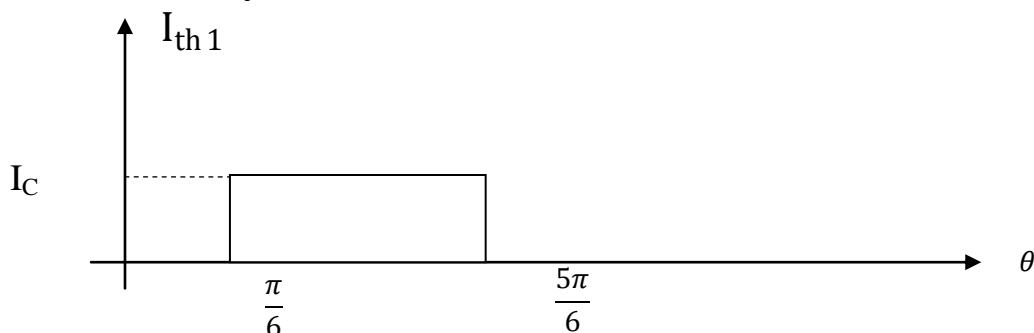


Figure (II-4) : Forme du courant dans  $Th_1$

La valeur moyenne du courant traversant les thyristors :  $I_{Thmoy} = \frac{I_c}{3}$  [7]

La valeur efficace du courant traversant les thyristors :  $I_{Theff} = \frac{I_c}{\sqrt{3}}$  [7]

Le courant maximum dans les thyristors :  $I_{max} = I_c$  [7]

**Courant de sources :**

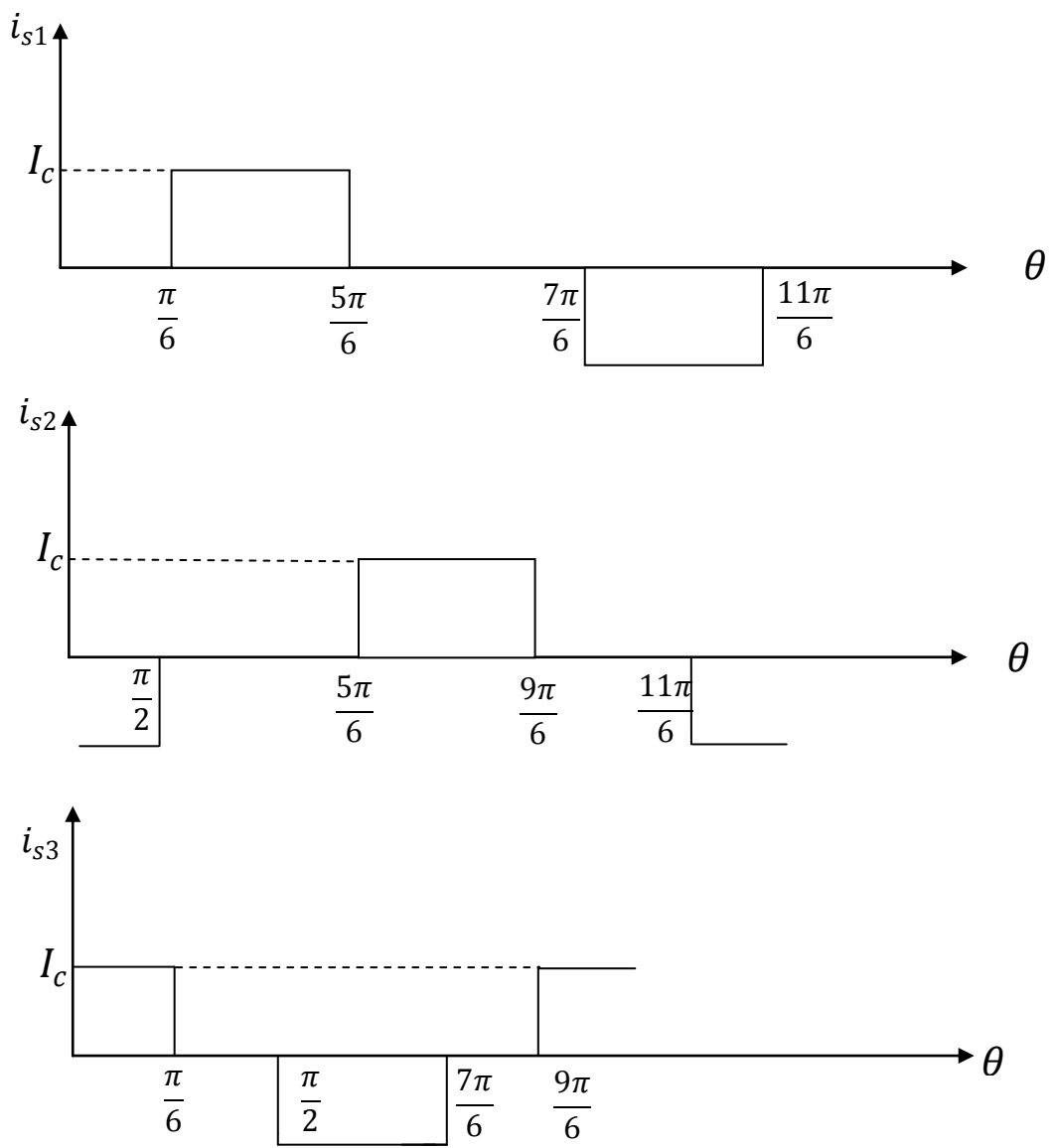


Figure (II-5) : Forme des courants de source

La forme des courant du coté alternatif est indépendante de la valeur de l'angle  $\alpha$ . C'est une fonction alternative qui présente une symétrie ; Sa valeur moyenne est nulle et sa valeur efficace est donnée par la relation suivante :

$$I_{\text{seff}} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_c \quad [7]$$

**b-Avec retard à l'amorçage ( $\alpha \neq 0$ ) :**

La tension redressée du coté continu  $U_c$  est une fonction périodique de période  $\frac{T}{6}$ , elle se compose de succession de portions identiques d'une sinusoïde de période T et d'amplitude  $E\sqrt{3}$  égale à celle de la tension composée de la source triphasée, elle se déforme suivant la valeur du retard à l'amorçage.

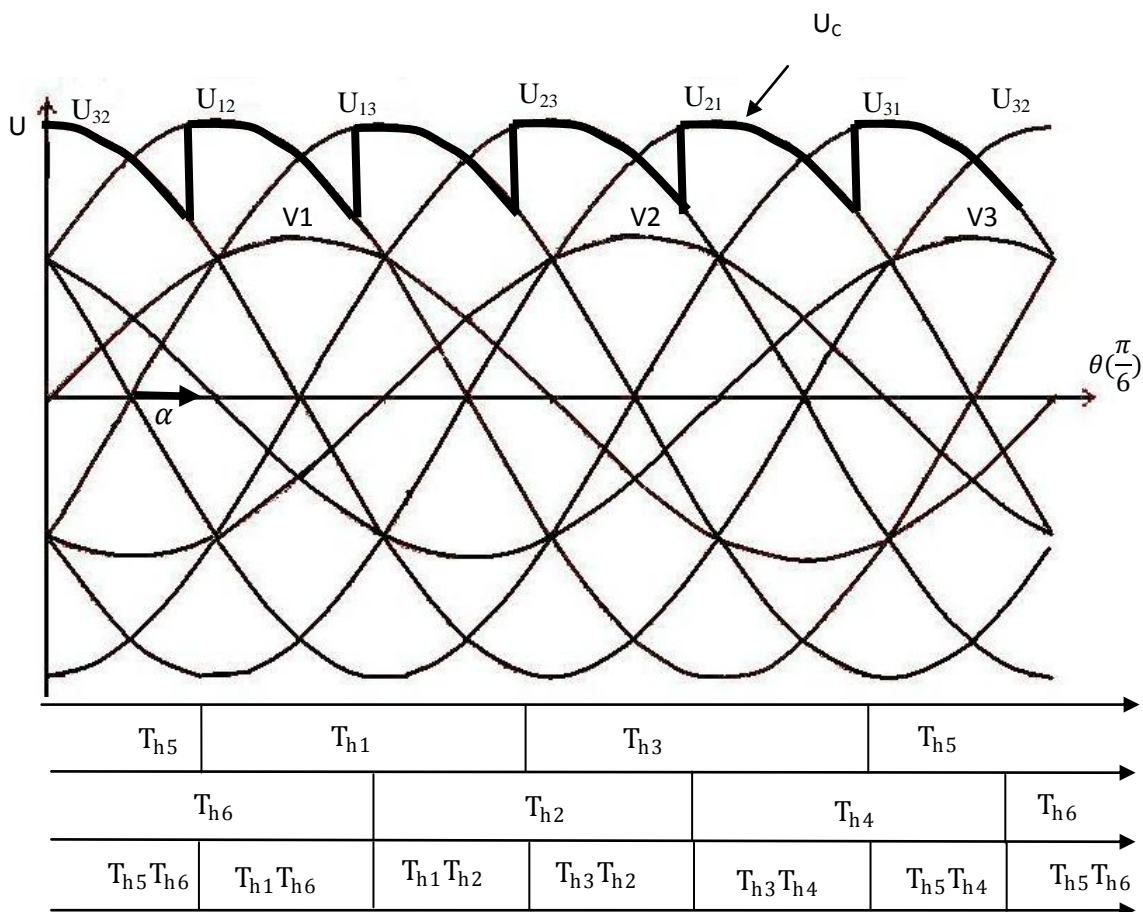


Figure (II-6) : Allure de la tension redressée ( $\alpha \neq 0$ ).

➤ **Etudes des tensions :**

**Tension moyenne redressée :**

$$u_{\text{cmoy}} = \frac{1}{T} \int_0^T U_C(\theta) d\theta$$

$$u_{\text{cmoy}} = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} U_C(\theta) d\theta$$

$$u_{\text{cmoy}} = \frac{3E_m\sqrt{3}}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} \cos\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) d\theta$$

$$u_{\text{cmoy}} = \frac{3E_m\sqrt{3}}{\pi} \left[ \sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha - \frac{\pi}{3}\right) - \sin\left(\frac{\pi}{6} + \alpha - \frac{\pi}{3}\right) \right]$$

$$u_{\text{cmoy}} = \frac{3E_m\sqrt{3}}{\pi} \left[ \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{6}\right) - \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{6}\right) \right]$$

Avec :  $\sin\left(\alpha + \frac{\pi}{6}\right) - \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{6}\right) = \cos \alpha$

$$u_{\text{cmoy}} = \frac{3 E_m \sqrt{3}}{\pi} \cos \alpha$$

Avec :  $u_{c0} = \frac{3 E_m \sqrt{3}}{\pi} \quad \Longrightarrow$

$$u_{\text{cmoy}} = u_{c0} \cos \alpha$$

**Tension efficace :**

$$U_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T U^2 d\theta$$

$$U_{\text{eff}}^2 = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} U_{12}^2 d\theta$$

Avec :  $U_{12} = E_m \sqrt{3} \cos\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right)$

$$U_{\text{eff}}^2 = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} [E_m \sqrt{3} \cos\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right)]^2 d\theta$$

$$U_{\text{eff}}^2 = \frac{9}{\pi} E_m^2 \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} [\cos\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right)]^2 d\theta$$

$$U_{\text{eff}}^2 = \frac{9}{\pi} E_m^2 \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{\pi}{2} + \alpha} \left[ \frac{1 + \cos 2(\theta - \frac{\pi}{3})}{2} \right] d\theta$$

$$U_{\text{eff}}^2 = \frac{9}{\pi} E_m^2 \left[ \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{\pi}{2} + \alpha} \frac{1}{2} d\theta + \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{\pi}{2} + \alpha} \frac{\cos 2(\theta - \frac{\pi}{3})}{2} d\theta \right]$$

$$U_{\text{eff}}^2 = \frac{9}{2\pi} E_m^2 \left[ \left( \frac{\pi}{3} \right) + \left[ \sin 2 \left[ \left( \frac{\pi}{2} + \alpha \right) - \frac{\pi}{3} \right] - \sin 2 \left[ \left( \frac{\pi}{6} + \alpha \right) - \frac{\pi}{3} \right] \right] \right]$$

$$U_{\text{eff}}^2 = E_m^2 \left[ \frac{3}{2} + \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} \cos 2\alpha \right]$$

D'ou :

$$U_{\text{eff}} = E_m \sqrt{\frac{3}{2} \left[ 1 + \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cos 2\alpha \right]}$$

➤ **Etude des courants :**

**Courant dans le thyristor:**

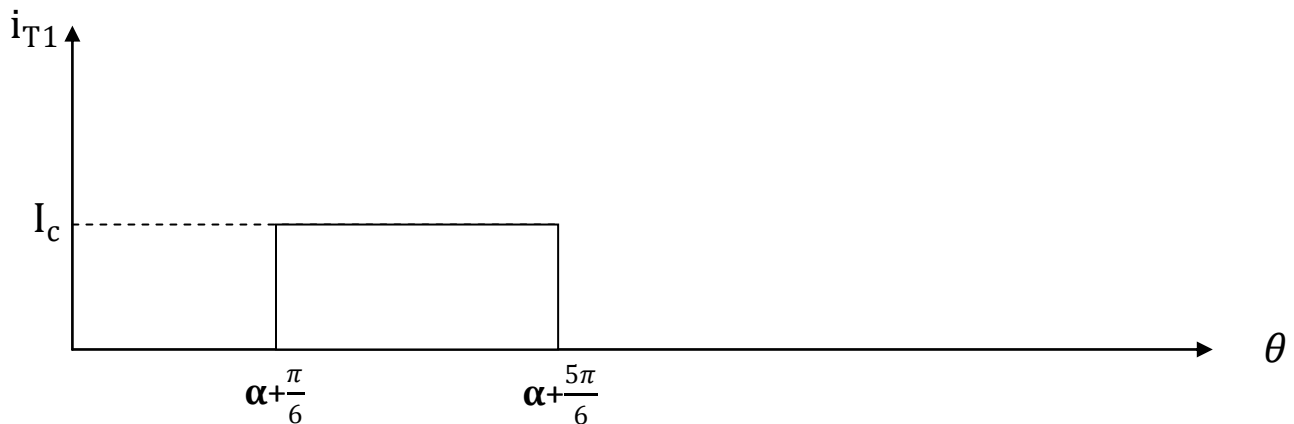


Figure (II-7) : Forme de courant dans le thyristor 1

$$I_{Th \text{ moy}} = \frac{I_c}{3}$$

$$I_{Th \text{ eff}} = \frac{I_c}{\sqrt{3}}$$

### Courant de source :

Les formes d'ondes des courants sont identiques à celles obtenues sans retard à l'amorçage. Seule différence est que les courants sont retardés d'un angle  $\alpha$ .

$$I_{\text{seff}} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_c \quad [7]$$

Le retard à l'amorçage n'affecte pas la durée de conduction ; Chaque thyristor conduit toujours pendant  $120^\circ$ . De plus, le courant demeure constant et sans ondulation, grâce à la présence de la grande inductance de lissage.

### II-6 Analyse du pont avec le phénomène de commutation :

Jusqu'ici nous avons supposé la source et le redresseur parfaits. Dans la réalité, il subsiste toujours des imperfections qui sont :

- La résistance totale de fuite dans tout le montage ;
- La chute de tension dans ces composants due à leur seuil ;
- La commutation non instantanée.

Toutes ces imperfections engendrent une diminution de la valeur moyenne de la tension redressée  $U_{\text{cmoy}}$  au fur et à mesure que le courant continu débité croit.

Quand un thyristor devient conducteur, le courant qui le traverse ne peut passer instantanément de zéro à  $I_c$ , le courant dans celui qui conduit précédemment de  $I_c$  à zéro ; cela suppose des discontinuités des courants dans les enroulements secondaires, primaires et dans la ligne à courant continu. En effet, pour toute valve le processus de commutation prend un certain temps ; Le transfert du courant  $I_c$  d'un thyristor à un autre s'effectue durant un court intervalle angulaire ( $\nu$ ) appelé angle de commutation ou d'empiétement.

La valeur de  $\nu$  augmente avec  $I_c$  : à pleine charge, il est entre  $20^\circ$  et  $30^\circ$  ; Pour de faibles charges, il peut être seulement de  $5^\circ$  (à une fréquence de 50Hz ou 60Hz) [1]

## II-6-1 Tension de commutation :

Lorsque un thyristor entre en conduction, il y'a commutation du courant  $I_c$  d'une phase à une autre, ce transfert de courant suppose le débit simultané du thyristor qui va cesser de conduire et celui qui vient de devenir passant ; Il ya empiétement des intervalles de conduction, ce phénomène entraine une diminution  $\Delta U_c$  de la tension redressée moyenne. L'allure de la tension redressée en tenant compte de l'effet de la commutation est donnée sur la figure (II-8).

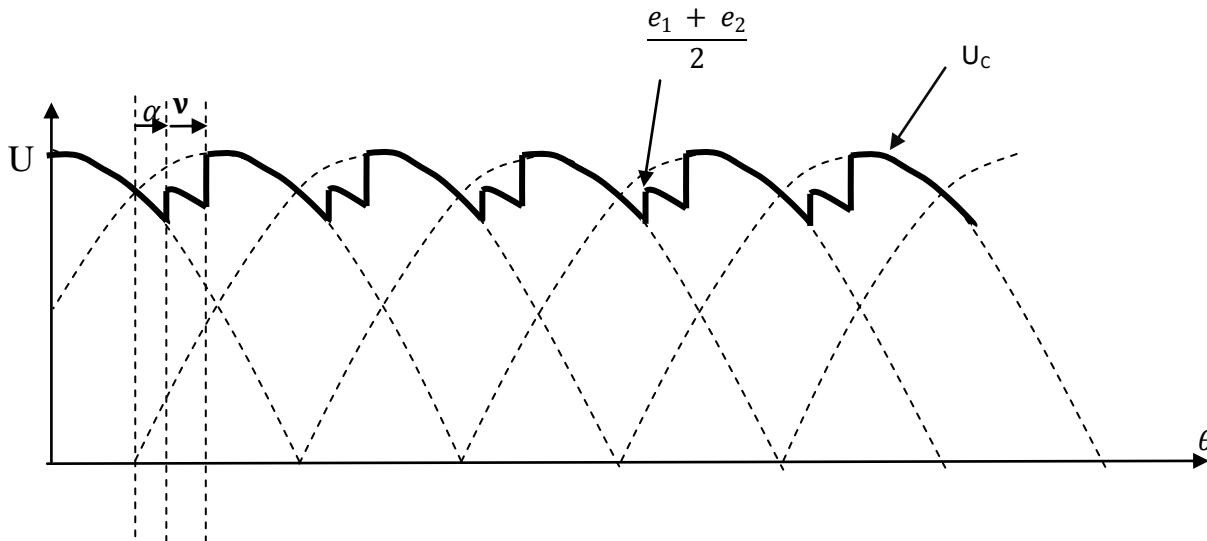


Figure (II- 8) allure de la tension de commutation

La valeur moyenne de la tension redressée en tenant compte de l'effet de la commutation est donnée par :

$$U_{cmoy} = \frac{3E}{4\pi} [\cos \alpha + \cos(\alpha + \nu)] \quad [7]$$

A cause de la période de commutation, le courant dans un thyristor circule de 0 à  $(\frac{2\pi}{3} + \nu)$  au lieu de 0 à  $\frac{2\pi}{3}$  seulement.

L'expression de l'angle de commutation est donnée par :

$$\nu = \arccos\left(\cos \alpha - \frac{X_f I_c \sqrt{2}}{E}\right) - \alpha \quad [7]$$

$\nu$ : angle de commutation;

$I_c$  : Courant continu de charge;

$\alpha$ : angle de retard à l'amorçage;

$E$ : Tension composée

$X_f$  : Réactance de fuite du transformateur ;

## II-6-2 Etude de la commutation :

La nature inductive des enroulements du transformateur et celle de la ligne interdisent à la commutation d'être instantanée. Si on considère le cas simple d'une commutation parallèle entre deux thyristors  $T_{h1}$  et  $T_{h2}$ , il y a empiètement entre les instants  $t_1$  (ou  $T_{h2}$  reçoit l'impulsion de commande) et  $t'_1$  (ou  $T_{h1}$  se bloque).

### II-6-2-1 Le déroulement de la commutation :

La figure (II-9) sur la quelle seuls les thyristors passants sont représentés montre les trois étapes du transfert du courant  $I_C$  de la phase 1 à la phase 2.

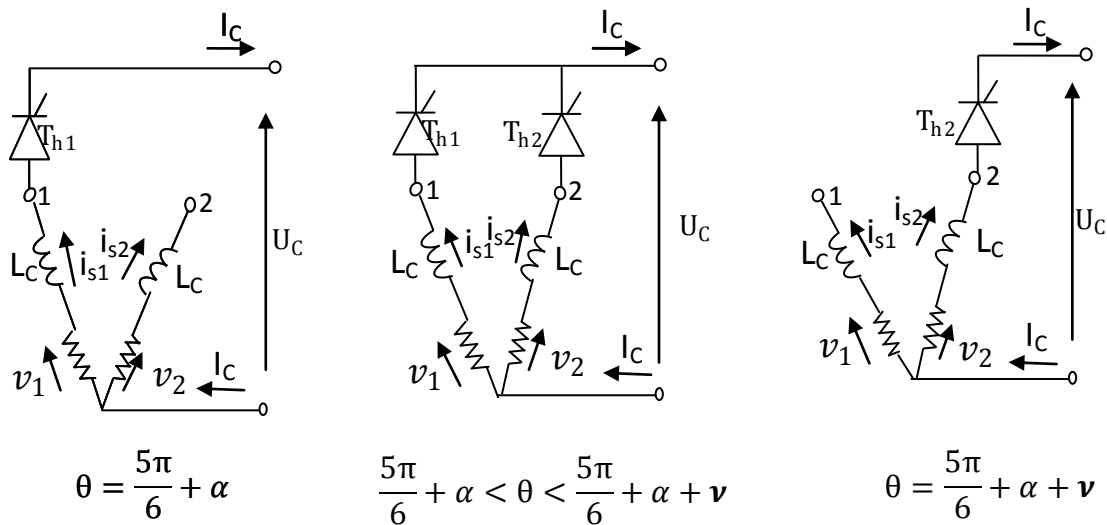


Figure (II-9) déroulement de la commutation [7]

- $T_{H1}$  Seul conducteur  $\implies \begin{cases} i_{s1} = I_C \\ U_C = v_1 - L_C \frac{di_{s1}}{dt} = v_1 \\ V_{T1} = 0 \end{cases}$
- $\theta = \frac{5\pi}{6} + \alpha \implies v_2 > v_1 ; T_{h2}$  devient passant

Le débit simultané de  $T_{h1}$  et de  $T_{h2}$  constitue l'intervalle d'empiètement. Durant cette commutation dans le circuit fermé formé par les deux phases, la tension de commutation  $v_2 - v_1$  fait croître le courant  $i_{s2}$  et diminue le courant  $i_{s1}$ .

Le transfert de  $I_C$  de la phase 1 à la phase 2 se termine pour  $\theta = \frac{5\pi}{6} + \alpha + \nu$  quand  $i_{S1}$  s'annule et  $i_{S2} = I_C$ .

Pendant l'intervalle de commutation  $[\frac{5\pi}{6} + \alpha, \frac{5\pi}{6} + \alpha + \nu]$  la tension redressée a pour expression :  $U_C = \frac{v_1 + v_2}{2}$

## II-6-2-2 Etude des Chutes de tension :

### a- Chute de tension ohmique :

Les chutes de tension ohmique sont dues aux résistances qui caractérisent les enroulements primaires et secondaires du transformateur et de la ligne d'alimentation.

$$P_J = 3R_L I_{L\text{eff}}^2 + 3R_P I_{P\text{eff}}^2 + 3R_S I_{S\text{eff}}^2 \quad [7]$$

En désignant par :

$P_J$  : Résistance par phase du réseau d'alimentation ;

$R_S$  : Résistance d'une phase secondaire ;

$R_P$  : Résistance d'une phase primaire ;

$I_P$ ,  $I_S$  et  $I_L$  : Les valeurs efficaces des courants primaires, secondaire et de ligne.

Les valeurs  $I_P$ ,  $I_S$  et  $I_L$  s'exprime en fonction de  $I_C$ , les pertes Joule peuvent se mettre sous la forme :

$$P_J = R_C I_C^2$$

Avec :

$R_C$  : Résistance équivalente ramenée au coté continu.

La chute de tension ohmique pour un pont tout thyristor a pour valeur

$$\Delta_1 U_c = 2R_C I_C \quad [7]$$

### b- Chute de tension dans les composants :

Le circuit du courant  $I_c$  passe par deux thyristors ; La chute de tension correspondante est :

$$\Delta_2 U_c = 2V_0 \quad [7]$$

$V_0$  : Tension de seuil d'un thyristor.

La chute de tension totale est la somme des différentes chutes de tension définies précédemment :

$$\Delta U_c = \Delta_1 U_c + \Delta_2 U_c + \Delta_3 U_c \quad [7]$$

Pour les montages de fortes puissances, c'est le phénomène de commutation (empiétement) qui est à l'origine de la principale chute de tension.

### c-Etude de la chute de tension due à l'empiétement :

$$v_1 - I_s \omega \frac{dis_1}{d\theta} = V_C$$

$$v_2 - I_s \omega \frac{dis_2}{d\theta} = V_C$$

$$i_{s1} + i_{s2} = I_c$$

Soit  $\Delta_3 U$  la chute de tension due à l'empiétement

$$\Delta_3 U = I_s \omega \frac{dis_2}{d\theta} = I_s \omega \frac{dis_1}{d\theta}$$

$$v_1 + v_2 - I_s \omega \left[ \frac{dis_1}{d\theta} + \frac{dis_2}{d\theta} \right] = 2 V_C$$

$$V_C = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

$$I_s \omega \frac{dis_2}{d\theta} = v_2 - V_C = v_2 - \frac{v_1 + v_2}{2}$$

D'où :

$$\Delta_3 U = I_s \omega \frac{dis_1}{d\theta} = \frac{v_2 - v_1}{2}$$

Etude des courants :

$$I_s \omega \frac{dis 2}{d\theta} = \frac{V_2 - V_1}{2} = \frac{V_1 \sqrt{2}}{2} [\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) - \sin \theta]$$

$$= \frac{V_c \sqrt{2}}{2} [2 \cos(\theta - \frac{\pi}{3}) \sin(-\frac{\pi}{3})]$$

$$I_s \omega \frac{dis 2}{d\theta} = \frac{V_c \sqrt{2}}{2} \sqrt{3} \sin(\theta - \frac{\pi}{3})$$

$$i_{s2} = \frac{V_s \sqrt{2} \sqrt{3}}{2 I_s \omega} \sin(\theta - \frac{\pi}{3}) + K$$

$$i_{s2} (\alpha + \alpha_0 + \frac{2\pi}{3}) = 0$$

$$\theta = \frac{V_s \sqrt{2} \sqrt{3}}{2 I_s \omega} \sin(\frac{\pi}{6} + \alpha + \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{3}) + K$$

$$K = - \frac{V_s \sqrt{2} \sqrt{3}}{2 I_s \omega} \sin(\alpha + \frac{\pi}{2})$$

$$K = \frac{V_s \sqrt{2} \sqrt{3}}{2 I_s \omega} \sin(\alpha + \frac{\pi}{2}) \implies K = \frac{V_s \sqrt{2} \sqrt{3}}{2 I_s \omega} \cos \alpha$$

$$i_{s2} = \frac{V_s \sqrt{2} \sqrt{3}}{2 I_s \omega} [-\sin(\theta - \frac{\pi}{3}) + \cos \alpha]$$

$$i_{s2} = \frac{V_s \sqrt{2} \sqrt{3}}{2 I_s \omega} [\cos \alpha - \sin(\theta - \frac{\pi}{3})]$$

$$i_{s1} = I_c - i_{s2}$$

$$i_{s2} (\frac{\pi}{6} + \alpha + \frac{2\pi}{3} + \mathbf{v}) = I_c$$

$$I_c = \frac{V_s \sqrt{2}}{2 I_s \omega} [-\sin(\frac{\pi}{6} + \alpha - \frac{2\pi}{3} + \mathbf{v}) + \cos \alpha] \implies$$

$$I_c = \frac{V_s \sqrt{2} \sqrt{3}}{2 I_s \omega} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \mathbf{v})]$$

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \mathbf{v}) = \frac{2 I_s \omega}{\sqrt{2} \sqrt{3} V_s} I_c$$

## II-7 Fonctionnement onduleur :

L'angle de retard à l'amorçage  $\alpha$  peut théoriquement varier de  $0$  à  $180^\circ$ , la puissance est positive pour  $0 < \alpha < 90^\circ$ , le convertisseur fournit de la puissance au réseau continu, il fonctionne en redresseur.

Le sens du transfert de la puissance [ $P_c = U_c I_c$ ] peut être changé seulement par l'inversion de la polarité de la tension redressée [ $U_c = U_{c0} \cos \alpha$ ].

A  $\alpha = 90^\circ$  la tension redressée étant autant négative que positive donc sa valeur moyenne est nulle.

Pour des valeurs de  $\alpha$  comprises entre  $90^\circ$  et une limite inférieure à  $180^\circ$ , le transfert de la puissance s'effectue du réseau continu vers le réseau alternatif.

LA figure (II-10) représente l'allure de la tension redressée pour  $\alpha > \frac{\pi}{2}$  en fonctionnement onduleur.

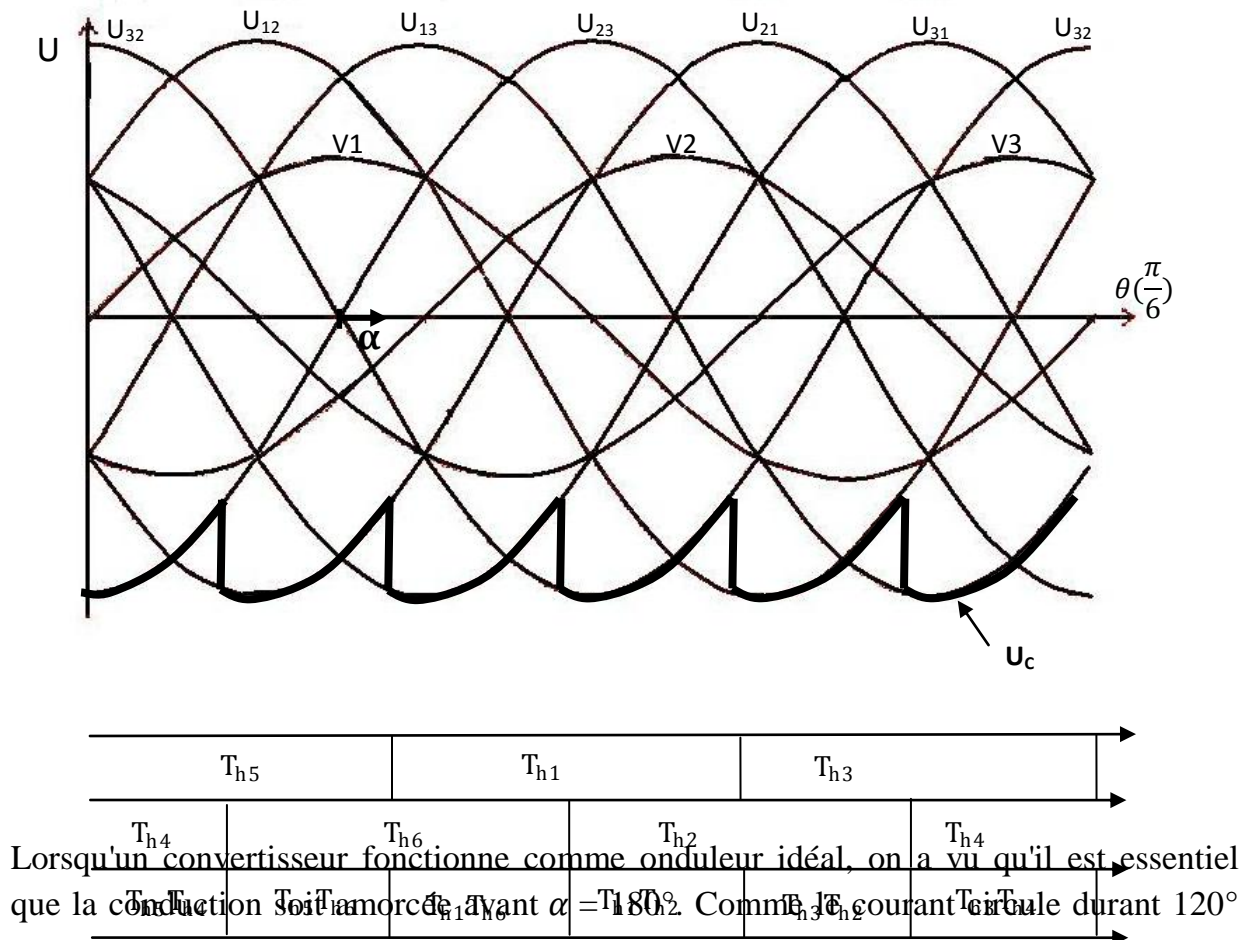


Figure (II-10) Allure de la tension redressée ( $\alpha > \frac{\pi}{2}$ ) fonctionnement onduleur.

la conduction doit cesser avant que ne soit atteint l'angle de  $180^\circ + 120^\circ = 300^\circ$ . S'il fallait que la conduction outrepassa le  $300^\circ$ , il y aurait reconduction, provoquant une montée rapide du courant dans le thyristor qui aurait manqué de s'éteindre.

En pratique, on doit laisser une marge entre la fin de la conduction et l'angle critique de  $300^\circ$ . Cet angle de marge  $\gamma$  permet au thyristor de reprendre ses propriétés de blocage avant que son anode redevienne positive par rapport à la cathode. En général, la valeur de  $\gamma$  est comprise entre  $15^\circ$  et  $20^\circ$ .

Dans le cas d'un onduleur, le moment de l'allumage est souvent défini par un angle d'avance  $\beta$ , plutôt que par l'angle de retard  $\alpha$ . Cet angle d'avance est mesuré par rapport à l'instant où  $\alpha = 180^\circ$ , soit le retard théorique maximal admissible pour un onduleur.

Les relations entre les angles  $\alpha, \beta, \gamma$  et  $\mu$  sont données par les expressions suivantes :

$$\begin{aligned}\beta &= 180 - \alpha \\ \beta &= \mu + \gamma \\ \alpha + \mu + \gamma &= 180\end{aligned}$$

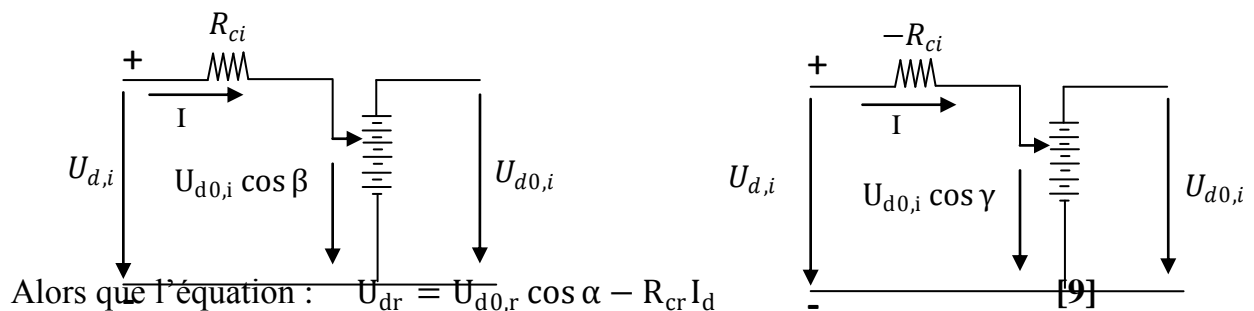
Avec :

- $\alpha$  : Angle de retard à l'amorçage
- $\beta$  : Angle d'avance à l'amorçage
- $\gamma$  : Angle de marge
- $\mu$  : Angle de commutation ou d'empiètement

Les deux relations suivantes permettent d'obtenir les deux circuits équivalents de l'onduleur figure (II-11)

$$U_{di} = U_{d0,i} \cos \beta + R_{ci} I_d \quad [9]$$

$$U_{di} = U_{d0,i} \cos \gamma - R_{ci} I_d \quad [9]$$



permet d'obtenir le circuit équivalent du redresseur figure (II-12)

Figure (II-11) Les schémas équivalents du pont onduleur

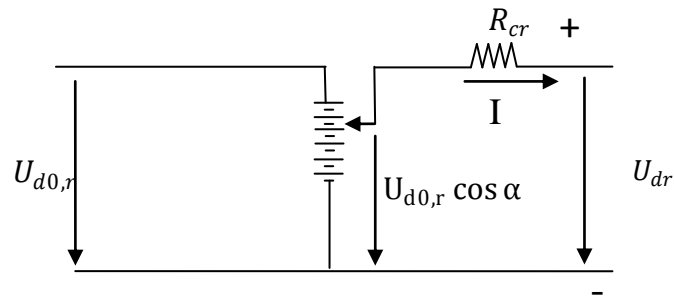


Figure (II-12) Le schéma équivalent du pont redresseur

## II-8 Les ratés de commutation

Des perturbations internes ou externes au montage peuvent provoquer une perte momentanée du contrôle. Il faut veiller à ce que si ces perturbations ne soient pas répétitives, le montage considéré ne soit pas détruit et recouvre son fonctionnement normal très rapidement.

Ces ratés de commutation peuvent être provoqué par :

- Un amorçage intempestif prématuré qui est lui-même provoqué soit par un signal de gâchette parasite, soit par une croissance trop rapide de la tension à ses bornes.
- Un non blocage en fin de conduction, cette perturbation peut venir soit d'un angle de retard à l'amorçage  $\alpha$  excessif (par altération de la commande ou bien par un défaut sur les tensions du réseau qui servent de référence aux générateurs d'impulsion), soit par un angle de commutation  $\mu$  excessif ( parce que le courant à commuter est trop fort ou bien la tension de commutation très faible).
- Un non amorçage qui est du soit à une défectuosité du générateur d'impulsion, soit au vieillissement prématuré du semi-conducteur.

## II-9 Convertisseur à ponts multiples :

Les convertisseurs à thyristors peuvent être groupés soit en série, soit en parallèle ; Il convient à chaque fois de préciser si le convertisseur équivalent à l'ensemble doit être réversible en tension ou non (s'il permet ou non l'inversion de la valeur moyenne de la tension redressée).

On ajoute aussi des associations en antiparallèle destinés à obtenir des ensembles réversibles en courants (ils permettent d'inverser le sens du courant redressé, ils peuvent être réversibles en tension ou non).

### II-9-1 Association en série :

Les associations en série des convertisseurs à thyristors sont utilisés soit :

- Pour obtenir de hautes ou de très hautes tensions continues variables
- Pour réduire les perturbations des réseaux d'alimentations par les courants harmoniques ou encore par la consommation des puissances réactives.

Pour obtenir à partir du réseau triphasé une tension redressée variable d'indice de pulsations égale à 12. On utilise la mise en série de deux ponts complets à six thyristors chacun.

La figure (II-13) montre un seul transformateur à un primaire et deux secondaires l'un en étoile, l'autre en triangle alimentant les deux ponts mis en série.

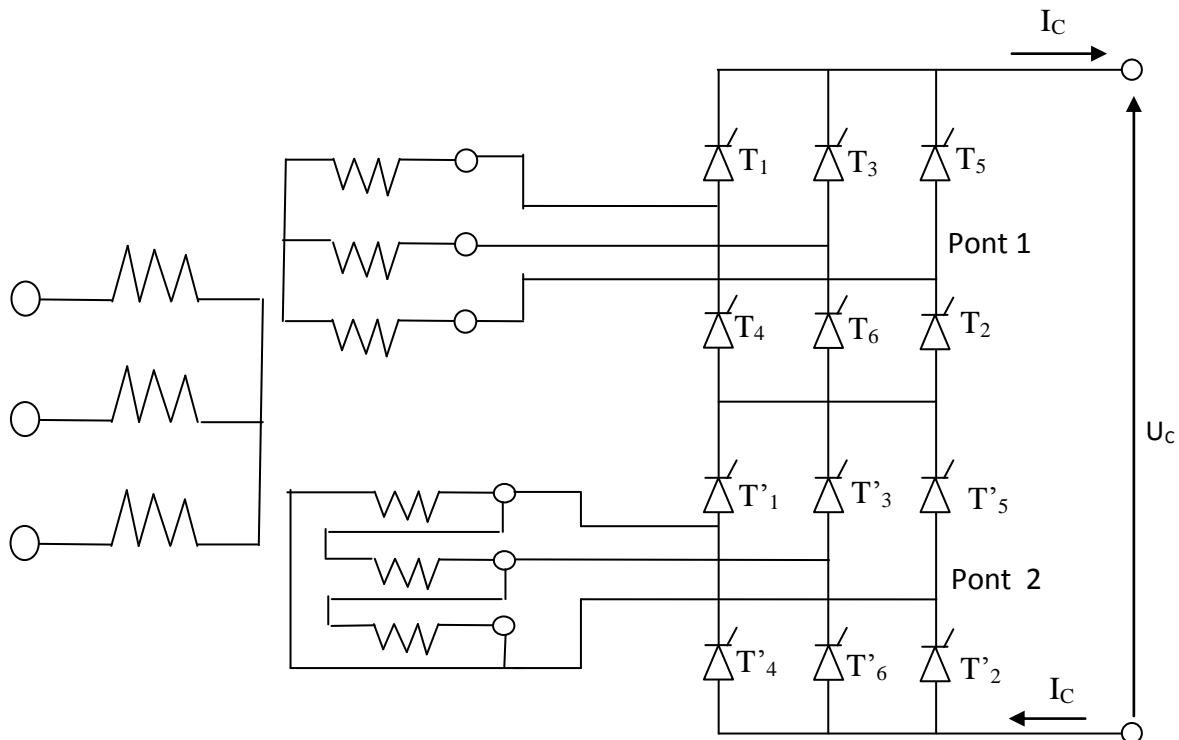


Figure (II-13) : Association en série de deux ponts à thyristors [7]

Les seules précautions à prendre sont de vérifier que :

- Les deux redresseurs mis en série sont aptes à débiter le même courant redressé puisque les cotés continus des deux montages sont parcourus par le même courant.
- Les tensions d'isolement entre les deux groupes de thyristors et entre les enroulements qui les alimentent sont suffisantes.

### II-9-2 Association parallèle :

On utilise ce type d'association de pont pour obtenir de basses tensions continues variables à indice de pulsations élevés et pour réduire le taux d'ondulation de la tension redressée et les harmoniques du courant pris du réseau .

On met en parallèle des convertisseurs donnant des ondes de tensions décalées .deux bobines interphasées sont alors nécessaires, et le fonctionnement en parallèle devient effectif qu'au delà d'une valeur du courant débité appelé intensité critique.

La figure (II-14) montre la mise en parallèle de deux convertisseurs en pont tout thyristors l'un alimenté en source en étoile, l'autre par une source en triangle.

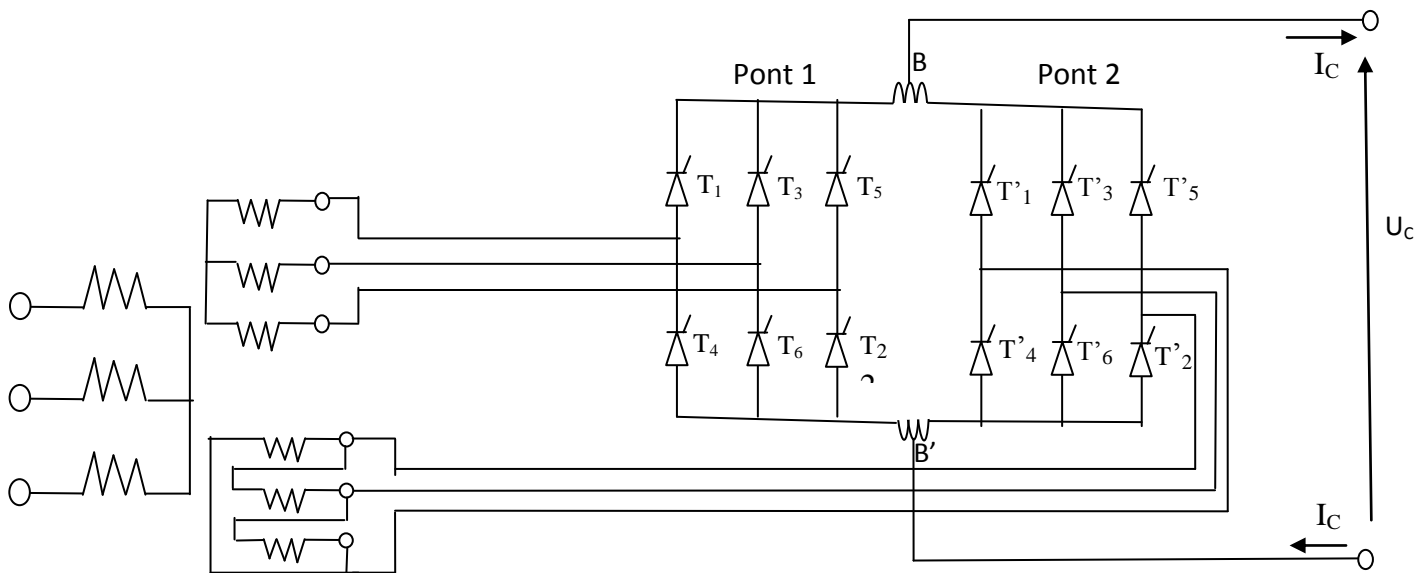


Figure (II-14) : Association en parallèle de deux ponts à thyristors [7]

## *Chapitre III : Contrôle des systèmes CCHT*

### **III-1 Réglage des liaisons à courant continu :**

#### **III-1-1 Généralités :**

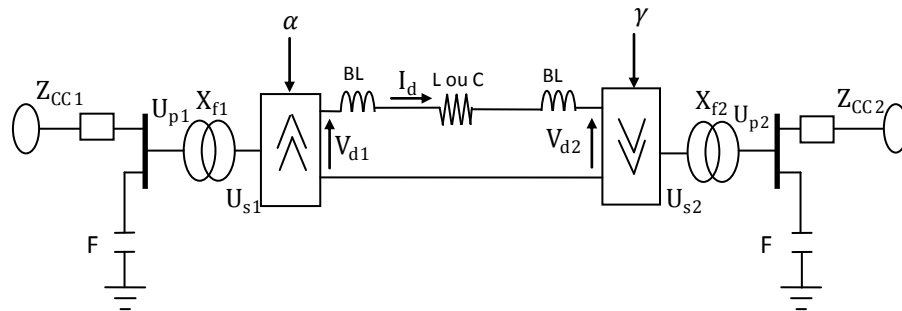
Le réglage du transit de puissance sur une liaison à courant continu repose sur la possibilité de régler les tensions de sorties moyennes du redresseur et de l'onduleur par simple action sur les angles de retard à l'amorçage de leurs valves.

La liaison possède deux degrés de liberté (les angles  $\alpha$  et  $\gamma$ ) ; on peut donc lui faire réguler deux grandeurs.

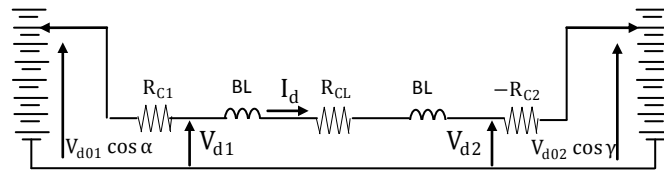
Il est primordial de réguler la tension continue pour s'assurer qu'elle ne dépassera pas la tenue du matériel continu et pour la maximiser de façon à minimiser le courant (donc les pertes) à puissance donnée. L'un des convertisseurs asservira donc son angle de retard à l'amorçage à la tension mesurée pour la réguler. Si la tension est régulée par l'un des convertisseurs, étant donné la faible valeur de la chute de tension résistive dans la ligne ou le câble continu, on peut considérer la tension régulée sur tout le réseau continu.

Le réglage de la puissance, à tension constante, est alors effectué par le réglage du courant : la puissance transmise par la liaison à courant continu est en première approximation le produit du courant redressé imposé par le redresseur par la tension continue à l'extrémité onduleur. Comme les angles de retard à l'amorçage règlent la tension de sortie des convertisseurs, une boucle est ajoutée qui mesure le courant et le traduit en ordre de variation de la tension, c'est-à-dire de l'angle. Si le courant est régulé par l'un des convertisseurs, il est régulé sur tout le réseau continu car celui-ci est parcouru par un même courant.

La figure (III-1) montre la liaison d'un point de vue macroscopique par deux sources de tension continue variables reliées par les résistances (fictives) de commutation et la résistance (réelle) de la ligne ou du câble de liaison. La liaison continue possède deux degrés de liberté qui sont les angles  $\alpha$  et  $\gamma$ , respectivement l'angle de retard à l'amorçage de redresseur et l'angle de garde de l'onduleur.



a- Schéma montrant les constituants de la liaison



b- Schéma fictif faisant apparaître les résistances de commutation

$$V_{d01} = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} U_{s1} \quad V_{d02} = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} U_{s2}$$

$$R_{c1} = \frac{6 \times I_1}{\pi} \quad R_{c2} = \frac{6 \times I_2}{\pi}$$

BL bobine de lissage

F filtre

Figure III-1 schéma macroscopique d'une liaison à courant continu [5]

### III-1-2 Réglage rapide par les angles :

Un convertisseur doit régler plusieurs de ses paramètres (maintenir les angles  $\alpha$  et  $\gamma$  supérieurs à des seuils donnés : tension et courant continus dans des plages données) avec une seule variable de commande ( $\alpha$  ou  $\gamma$ ), aussi il faut choisir lequel des paramètres sera réglé.

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  $\alpha$  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  $\alpha_{\min}$  : l'amorçage des 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  $\gamma_{\min}$ , si l'angle de garde est trop faible, la moindre variation de tension entrainera 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 tension continue  $U_d$  par l'un des convertisseurs ;
- réglage du courant continu  $I_d$  par l'autre convertisseur (ou les autres dans le cas d'une liaison multiterminale) ;
- réglage de tension continue  $U_d$  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  $\approx 110\%$  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 ;

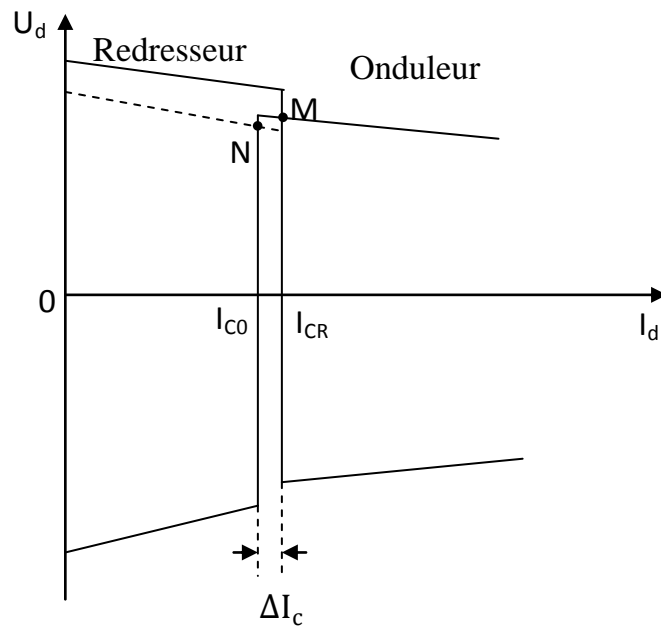
C'est en général le convertisseur fonctionnant en onduleur qui régule la tension continue. La consigne de courant de l'onduleur, qui n'est sollicitée que lors de défaut, est déduite en retranchant la marge de courant de la consigne de courant du redresseur :

$$I_{c0} = I_{cR} \left[ 1 - \Delta I_c \right] \quad [5]$$

La marge de courant  $\Delta I_c$  est une valeur fixe souvent prise égale à 10% de la valeur nominale.

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.

Les différents modes de fonctionnement sont représentés par des droites dans le plan ( $U_d ; I_d$ ) de la figure (III-2).



- $I_d$  Courant continu
- $I_{c0}$  Consigne de courant à l'extrémité onduleur
- $I_{cR}$  Consigne de courant à l'extrémité redresseur
- $U_d$  tension continue
- $\Delta I_c$  Marge de courant

- M :  $\alpha = 15^\circ$                       Station onduleur :  $\gamma_{\min} = 18^\circ$
- N :  $\alpha = 7^\circ, \gamma > 18^\circ$             Station redresseur :  $\alpha_{\min} = 7^\circ$

Figure III-2 liaison à courant continu point à point : principe fondamental de réglage [5]

### **III-1-3 réglage lent par les régulateurs 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  $U_d = f(I_d)$  (figure III-2), 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 pour quoi un autre réglage coexiste avec celui des angles ; c'est le contrôle des tensions alternatives en entrée de convertisseur.

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  $\alpha$  et  $\gamma$  dans une plage donnée. Ainsi, les changements brusques de consigne, le temps que les régleurs ramènent les angles dans les plages nominales.

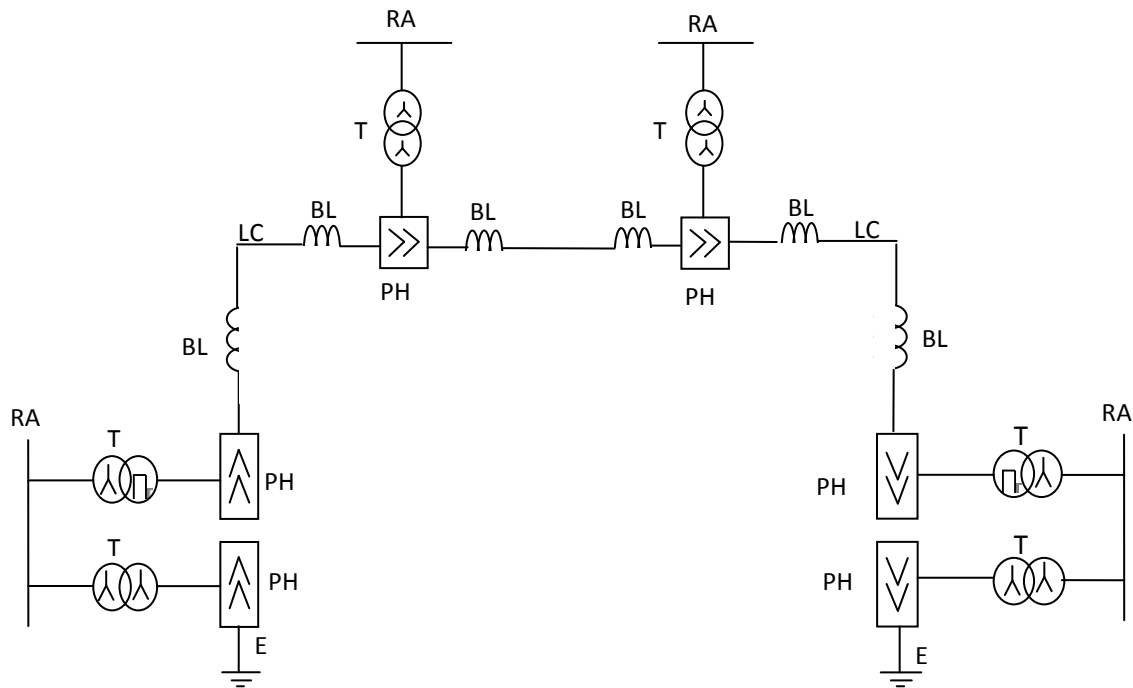
### **III-1-4 structure et réglage des liaisons multiterminales :**

Une liaison multiterminale est constituée d'au moins trois stations de conversion interconnectées par une même ligne à courant continu. Le problème est d'assurer le réglage de puissance échangée entre le réseau à courant continu et chacun des réseaux alternatifs adjacents, indépendamment des autres réseaux alternatifs, en respectant toutefois la contrainte d'égalité aux pertes près, de la puissance injectée dans le réseau continu et de la puissance extraite du réseau continu.

Le choix du type de réglage dépend fondamentalement de la structure du réseau à courant continu : série ou parallèle

- Dans la structure série (figure III-3), le courant continu est commun à tous les convertisseurs.

Un point de fonctionnement stable est obtenu si une seule des stations de conversion règle le courant, toutes les autres réglant leur tension de façon à maintenir la puissance au niveau requis. Les stations dont la puissance convertie est faible doivent nécessairement fonctionner avec de grands angles de retard à l'amorçage et consomment donc beaucoup de puissance réactive, ce qui constitue un inconvénient notable de ce type de schéma.

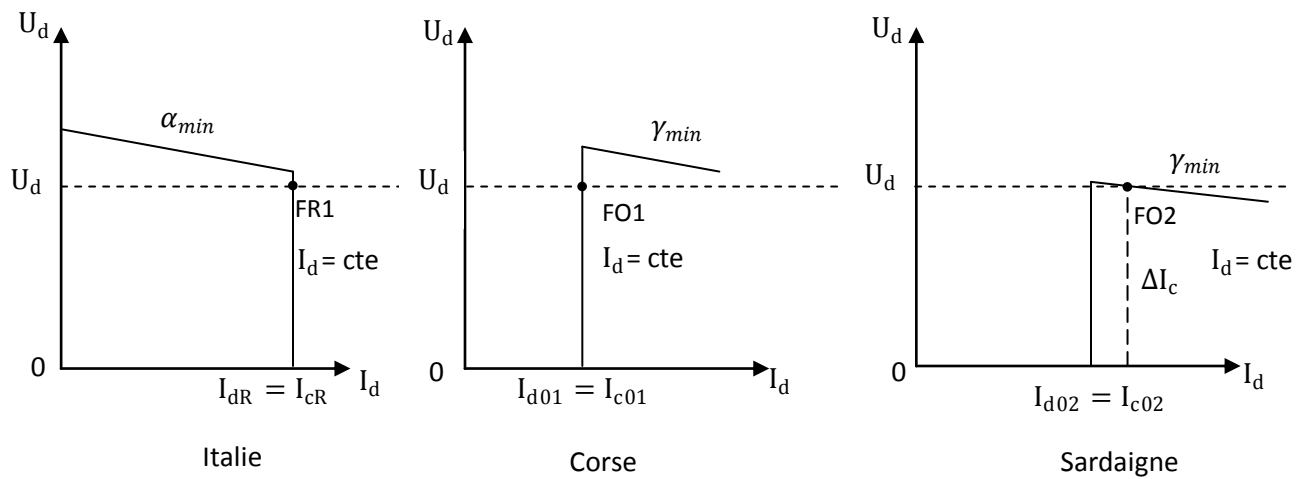


BL bobines de lissage      LC ligne à courant continu      RA jeu de barres à courant alternatif  
 E ligne d'électrode      PH pont de Gretz hexaphasé      T transformateur de conversion

Toutes les stations sont traversées par le même courant continu

Figure III-3 liaison multiterminale à connexion en série des stations de conversion : schéma unifilaire [5]

- Dans la structure parallèle, la tension continue  $U_d$  est au contraire commune à l'ensemble des stations, aux chutes de tension en ligne près. Un point de fonctionnement défini et stable est obtenu quand une seule station impose la tension continu, tandis que toutes les autres règlent le courant qu'elles absorbent ou fournissent au réseau continu. Le principe de réglage utilisé sur la liaison Sardaigne-Corse-Italie, première multiterminale au monde, est une simple extrapolation à trois stations de la méthode de réglage utilisée dans les liaisons point à point (figure III-4).



a- Redresseur 1 :  $I_{dR} = I_{cR}$       b- Onduleur 1 :  $I_{d01} = I_{c01}$       c- Onduleur 2 :  $I_{d02} = I_{dR} - I_{d01}$

$I_{cR}$	Consigne de courant du redresseur 1
$I_{c01}$ et $I_{c02}$	Consigne de courant respectivement de l'onduleur 1 et de l'onduleur 2
$I_{dR}$	Courant continu délivré par le redresseur
$I_{d01}$ et $I_{d02}$	Courant continu absorbé respectivement par l'onduleur 1 et l'onduleur 2
$\alpha_{min}$	Angle minimal constant de retard à l'amorçage
$\gamma_{min}$	Angle minimal constant de marge
$\Delta I_c$	Marge de courant
FR1, FO1, FO2	point de fonctionnement des stations redresseur 1, onduleur 1, onduleur 2

Figure III-4 Réglage des échanges de puissance d'une liaison multiterminale : exemple de la station SACOI (Sardaigne-Corse -Italie) [5]

### III-1-5 réglage des stations dos à dos :

Une station dos à dos comporte les convertisseurs des deux extrémités de la liaison sur le même site. Son principe de réglage du transit de puissance est le même que pour une liaison point à point. En revanche, la proximité du redresseur et de l'onduleur permet de disposer localement de deux degrés de liberté, l'angle  $\alpha$  du redresseur et l'angle  $\gamma$  de l'onduleur, pour régler indépendamment deux grandeurs sur un des réseaux. Ainsi, on

peut simultanément régler la puissance active injectée dans le réseau de l'onduleur et maintenir constante sa tension alternative en ajustant sa puissance réactive. Ce principe est particulièrement intéressant dans le cas où le réseau de l'onduleur est très impédant.

Pour obtenir les mêmes performances avec une liaison point à point, il faut installer des moyens rapides de compensation statique dans la station onduleur ou mettre en œuvre des moyens de télécommunication d'une très haute fiabilité et ultra-rapide.

### III-2- Le contrôle des liaisons en courant continu :

#### III-2-1- Principe de contrôle d'une liaison à courant continu :

La tension continue créée par une station de conversion est obtenue par la mise en série des tensions continues délivrées par chacun de ses ponts, le courant alternatif fourni (absorbé) par cette station est égal à la somme vectorielle des courants alternatifs fournis (ou absorbés) par ses ponts. Le pont le plus couramment utilisé dans les stations de conversion est le pont de Greatz (figure III-5).

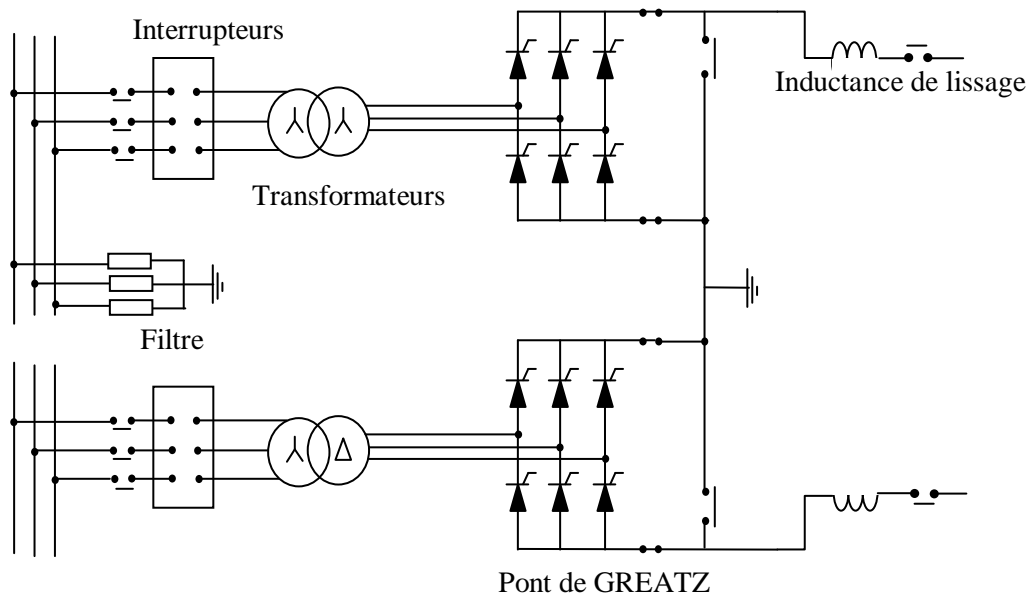


Figure III-5 station de conversion comportant deux ponts de GREATZ

Les équations principales exprimant les relations entre les grandeurs des cotés alternatif et continu, d'une station, en régime équilibré sont données par :

$$V_c = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} n \frac{N_2}{N_1} V_1 \cos \alpha \cos \varphi \quad I_{ac} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} .n. \frac{N_2}{N_1} . I_c . e^{-j\theta}$$

$$\text{Où : } \cos \varphi = \cos \left[ \frac{(\alpha + \mu) + \cos \alpha}{2} \right]$$

Où  $V_c$  et  $I_c$  sont la tension et le courant continus d'une station de conversion.

$V_1$  : Est la tension alternative entre phase aux bornes de la station.

$n$  : Nombre des ponts dans la station.

$\frac{N_2}{N_1}$  : Rapport de transformation d'un pont.

$I_{ac}$  : Courant alternatif traversé par la station.

$\varphi$  : Déphasage du courant alternatif par rapport à la tension alternative de phase.

$\alpha$  et  $\mu$  sont les angles d'allumage et de commutation des valves d'un pont.

Dans les cas des réseaux à courant continu à haute tension à deux terminaux, l'un des deux postes définit la tension du réseau à courant continu en contrôlant, selon le fonctionnement du convertisseur (onduleur ou redresseur), comme constante soit la marge de commutation minimale soit l'angle de retard minimal. L'autre poste est chargé du contrôle de courant et par suite du contrôle de la puissance transportée.

Les deux postes sont munis de l'équipement du contrôle de courant, mais le courant de consigne est réglé à une valeur plus faible pour l'onduleur que pour le redresseur .La différence étant la marge de courant  $\Delta I$ .

### III-2-2- Caractéristiques E-I des convertisseurs :

En pratique, la commande des gâchettes du redresseur est conçue pour donner la courbe E-I montrée à la figure III-5-a. Pour une tension à courant alternatif,  $E_1$  constante et un angle  $\varphi$  constant et égal à sa valeur  $\alpha_{\min}$ , la tension  $E_{d1}$  demeure constante jusqu'à ce que  $I_d$  atteigne la valeur de consigne  $I_R$ . Passé ce point,  $E_{d1}$  diminue rapidement, comme l'indique la courbe. L'angle de retard à l'amorçage augmente automatiquement et rapidement de sorte que  $E_{d1}$  tombe subitement à zéro. Si un court-circuit se produit aux bornes du redresseur, le courant  $I_d$  résultant est donc limité à la valeur  $I_R$ .

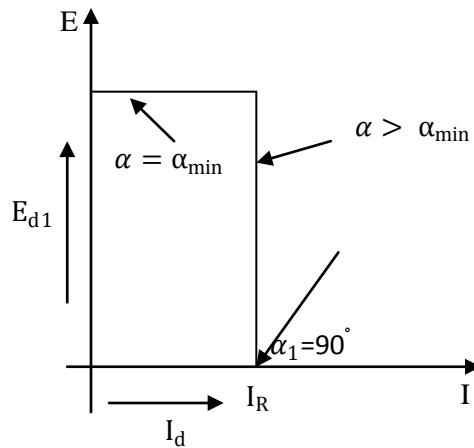


Figure III-5-a : caractéristiques E-I du redresseur

La caractéristique E-I de l'onduleur est conçue pour donner la courbe montrée à la figure III-5-b. La tension alternative  $E_2$  étant constante, la tension  $E_{d2}$  se maintient à une valeur nulle ou négative jusqu'à ce que  $I_d$  atteigne la valeur de consigne  $I_0$ . Par conséquent, entre zéro et  $I_0$ , l'angle d'allumage  $\beta$  diminue automatiquement et reste égal à une valeur minimale  $\beta_{\min}$  de l'ordre de  $30^\circ$ .

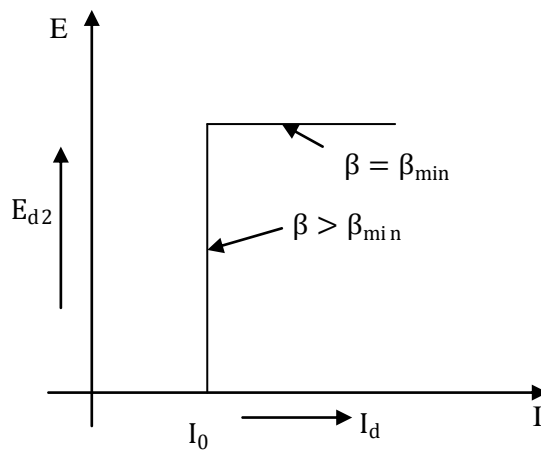


Figure III-5-b : caractéristique E-I de l'onduleur

Dans les conditions de fonctionnement normales, la tension  $I_d$  de l'onduleur est maintenue légèrement inférieure à la tension  $E_{d1}$  du redresseur. De plus, la consigne  $I_0$  est inférieure à la consigne  $I_R$ .

Lorsque l'on superpose les courbes (figure III-6), l'effet de ses contraintes devient clair. La tension  $E_d$  et le courant  $I_d$  de la ligne à courant continu correspondent au point d'intersection des courbes. Il est évident que le courant de ligne  $I_d$  est égal au

courant  $I_R$ , imposé par le redresseur, tandis que la tension de ligne  $E_d$  est égale à la tension  $E_{d2}$  générée par l'onduleur.

La différence  $\Delta I$  entre  $I_R$  et  $I_0$  s'appelle marge de courant.

Lorsque le redresseur fonctionne avec un angle  $\alpha_{\min}$  constant (partie horizontale de la caractéristique E-I) l'angle de commutation produit une chute de tension  $\Delta E_d$  qui augmente avec le courant  $I_d$ . Cela modifie la caractéristique E-I du redresseur, comme l'indique le trait en pointillé de la figure III-6. Toutefois, dans les conditions normales, cela ne change pas le point de fonctionnement du système. La puissance fournie à l'onduleur est donc égale à  $E_{d2} I_R$ .

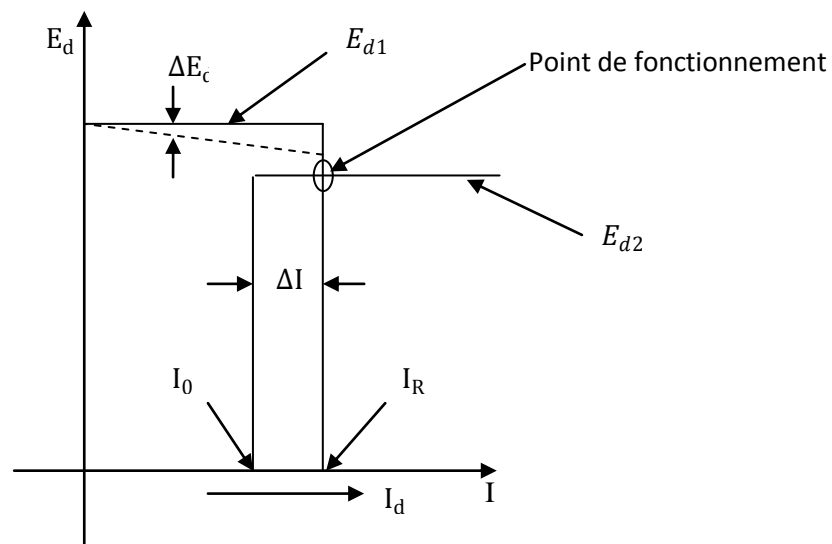


Figure (III-6) point d'opération de la ligne de transport en régime normal

### III-2-3 Contrôle de la puissance :

Pour faire varier la puissance transportée, on doit agir sur le courant  $I_d$  imposé par le redresseur. Cela revient à modifier simultanément les caractéristiques E-I du redresseur et de l'onduleur. Les tensions  $E_{d1}$  et  $E_{d2}$  sont maintenues constantes, mais les courants de consigne  $I_R$  et  $I_0$  sont changés simultanément de telle sorte que la marge de courant demeure la même.

Noter que la tension  $E_d$  de la ligne est déterminée par la tension  $E_{d2}$  de l'onduleur. Par contre le courant  $I_d$  dépend du courant  $I_R$ , établi par le redresseur. En somme, l'onduleur agit comme une source de tension alors que le redresseur détermine la valeur du courant.

L'objectif de contrôler ces caractéristiques E-I est d'empêcher des fluctuations importantes de la puissance lorsque les tensions alternatives subissent des fluctuations normales. Un autre objectif est de limiter le courant lors d'un court-circuit sur la ligne à courant continu.

#### **III-2-4 Effet des fluctuations de tension :**

En se référant de nouveau à la figure III-6, la tension de la ligne est  $E_d = E_{d1}$  et le courant  $I_d = I_R$ . Si la tension alternative du réseau 1 augmente subitement, la valeur de  $E_{d1}$  monte en proportion, mais cela n'a aucun effet sur  $I_R$ , ni sur  $E_{d2}$ . Par conséquent, la tension et le courant dans la ligne à courant continu demeurent inchangés.

Par contre, si la tension alternative  $E_2$  du réseau 2 baisse, la tension  $E_{d2}$  baisse en proportion. Le courant de ligne n'est pas affecté, mais comme  $E_{d2}$  est plus faible, la puissance transportée sera plus faible. Cependant, le pourcentage de changement ne peut pas excéder le pourcentage de changement de  $E_2$ .

Supposons maintenant qu'une contingence très sévère se produise sur le réseau 1 de sorte que la tension  $E_{d1}$  diminue beaucoup. Il en résulte un nouveau point d'opération montré sur la figure III-7. Le courant chute de  $I_R$  à  $I_0$ , en même temps que la tension tombe de  $E_{d2}$  à  $E_{d1}$ . Comme la marge de courant est habituellement de l'ordre de 10%, le courant ne diminue pas excessivement. Par conséquent, la puissance transportée change, mais pas de façon drastique. Dès que la perturbation disparaît, les conditions normales reprennent, et les caractéristiques E-I retournent à celles montrées à la figure III-6.

Un court-circuit sur la ligne à courant continu constitue une des pires contingences. Dans ce cas, le redresseur fournit un courant maximal  $I_R$  alors que l'onduleur tire, pendant quelques instants, un courant maximal  $I_0$ .

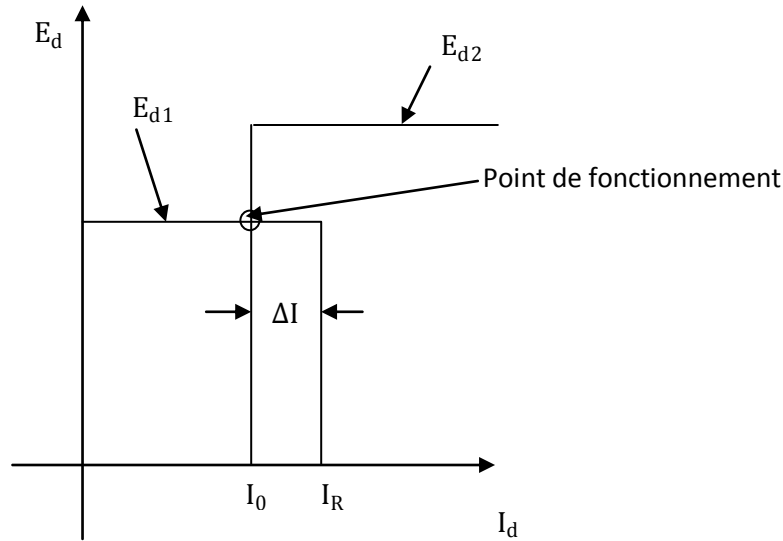


Figure (III-7) : Effet sur le point d'opération d'une diminution subite de la tension alternative  $E_1$

### III-2-5 Inversion de la puissance :

On peut changer la direction de la puissance en changeant les angles d'allumage, de sorte que le redresseur fonctionne en onduleur et vice versa. C'est encore en agissant sur les caractéristiques E-I qu'on effectue cette inversion.

Les caractéristiques E-I que nous avons montré à la figure III-6 représentent une partie seulement des caractéristiques réelles. Ces dernières sont tracées en entier sur la figure III-8. On constate que le point de fonctionnement demeure le même. Cependant, la caractéristique du convertisseur 1 montre que lorsque le courant dépasse la consigne  $I_R$ , l'angle d'amorçage est retardé, de sorte que le convertisseur fonctionne en onduleur. De même la caractéristique du convertisseur 2 indique que celle-ci fonctionne en redresseur lorsque le courant est inférieur à  $I_0$ . Noter aussi que la valeur absolue de la tension du redresseur  $E_{d1}$  est toujours supérieure à la tension de onduleur  $E_{d2}$ .

Pour inverser le sens de la puissance, il suffit de déplacer la caractéristique du convertisseur 1 légèrement vers la gauche. La figure III-9 montre alors que le point d'opération change ; la tension  $E_d$  devient négative, alors que le courant  $I_d$  reste toujours positif.

Ces caractéristiques spéciales offrent donc, en plus des avantages déjà énumérés, la capacité de changer quasi instantanément le sens de circulation de la puissance.

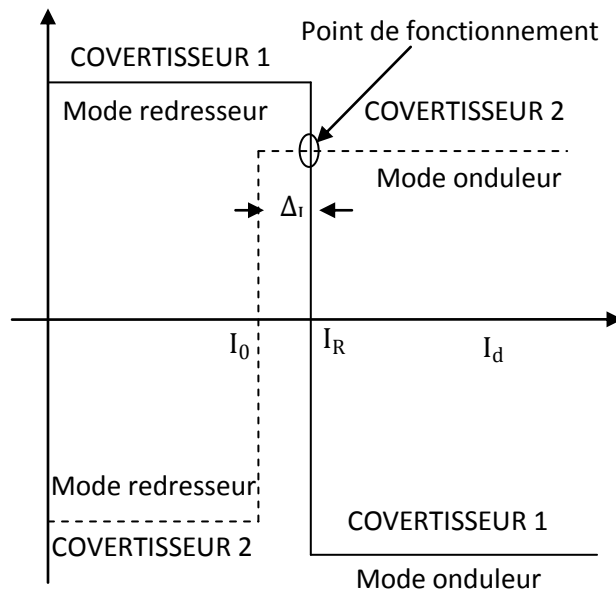


Figure (III-8) : caractéristique  $E-I$  complète pour les convertisseurs 1 et 2, la puissance circule du convertisseur 1 au convertisseur 2

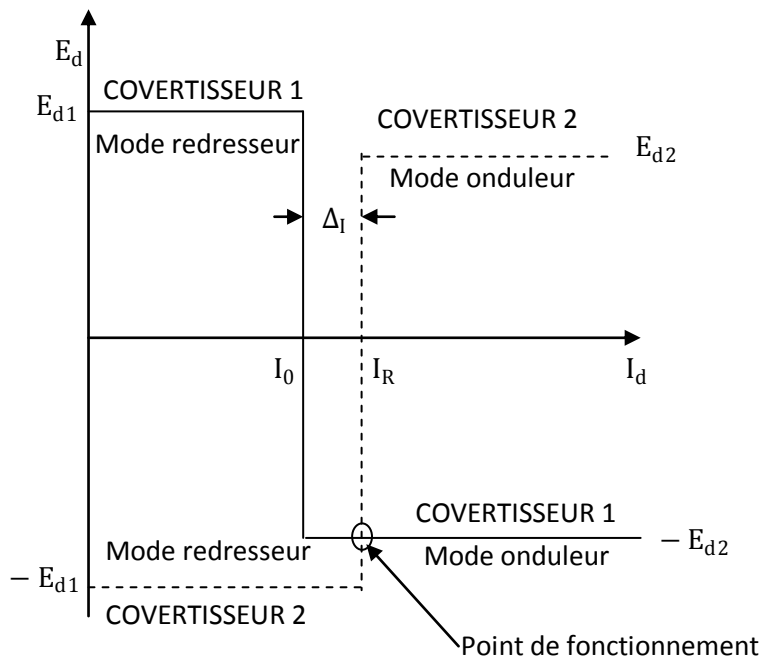


Figure (III-9) : un léger déplacement de la caractéristique du convertisseur inverse le sens de la puissance

### III-2-6- Schéma équivalent d'une liaison CCHT :

Une liaison de transport à tension continue, avec deux stations terminales, peut être représentée par un schéma équivalent dans lequel tous les éléments sont représentés vu du côté continu.

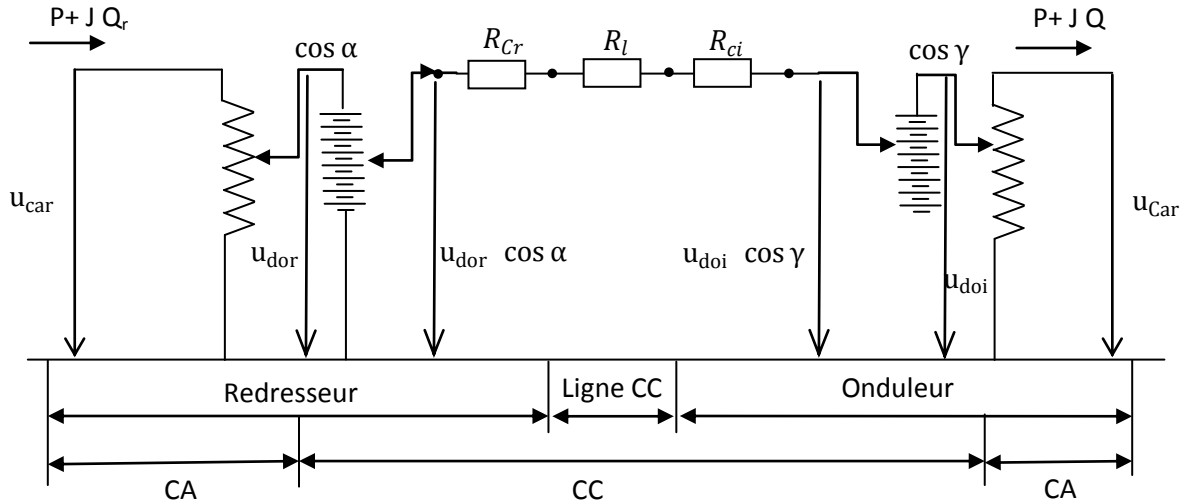


Figure (III-10) : Le schéma équivalent d'une liaison en cc à deux stations terminales

Dans un système de transport en courant continu la puissance active peut être contrôlée par l'intermédiaire de la tension ( $U_d$ ) ou du courant continu ( $I_d$ ). Généralement, la station onduleur contrôle la tension continue ( $U_d$ ), en la gardant à une valeur constante et rigoureusement liée à la tension sur la partie du courant alternatif. A l'autre station terminale, la station redresseur règle la tension continue et le courant ( $I_d$ ) établi en ligne pour correspondre à la puissance active nécessaire ( $P_d$ ).

L'expression du courant sur la ligne est :

$$I_d = \frac{U_{d0,r} \cos \alpha - U_{d0,i} \cos \gamma}{R_{cr} + R_i + R_{ci}}$$

La puissance active transmise :

$$P_{dr} = U_{dr} I_d$$

La valeur du courant continu  $I_d$  peut être donc contrôlée par le changement des valeurs  $U_{d0,r}$  et  $U_{d0,i}$  (en modifiant les prises de transformateurs), ou des angles  $\alpha$  et  $\gamma$  :

normalement le redresseur et l'onduleur fonctionnent avec des angles  $\alpha_{\min} = 12^\circ - 18^\circ$  respectivement  $\gamma_{\min} = 15^\circ - 18^\circ$ .

Sur la base du schéma équivalent de la liaison en courant continu (fig.-III-6) la tension continue en un point peut être exprimée en fonction des grandeurs électriques soit du côté redresseur, soit du côté onduleur, par les relations suivantes :

$$U_d = U_{dr} - R_1 I_d = U_{d0,r} \cos \alpha - (R_{cr} + R_1) I_d \dots\dots\dots (3.1).$$

$$U_d = U_{di} - R_2 I_d = U_{d0,i} \cos \alpha - (R_{ci} + R_2) I_d \dots\dots\dots (3.2).$$

ou  $R_1$  est la résistance de la ligne en courant continu entre le redresseur et le point contrôlé ;

$R_2 = R_1 - R_i$  correspond à la résistance de la ligne et le point contrôlé.

### III-2-7- Système de contrôle :

En général, le contrôle et le réglage d'une liaison CCHT doit vérifier :

- La limitation du courant maximum pour éviter la destruction des thyristors ;
- La limitation des fluctuations de tension et de courant produites par les variations de tension d'alimentation en alternatif ;
- Le maintien d'un niveau de tension continue le plus élevé possible ;
- La réduction de la puissance réactive consommée par les stations de conversion ;
- L'absence de ratés de commutation ;
- Le réglage de la puissance et, dans certains cas, de fréquence au terminal onduleur de la liaison ;

En ce sens, toute liaison CCHT est surveillée par un système automatique de contrôle et de réglage qui coordonne les possibilités de réglage afférentes aux stations de conversion, en obtenant les stratégies de contrôle, de type I ou P, pour maintenir constant soit le courant ( $I_d$ ) soit la puissance ( $P_d$ ). Le système automatique de contrôle et réglage est organisé en plusieurs niveaux hiérarchiques.

## Chapitre IV : Etude d'un système de puissance à liaison CCHT biterminale (simulation)

### IV-1 Introduction :

La simulation numérique est bien connue aujourd'hui dans le domaine des systèmes de puissance, elle permet aux ingénieurs et aux chercheurs d'analyser et de simuler les systèmes, avec beaucoup de précision.

Plusieurs logiciels sont utilisés pour simuler les systèmes, nous utiliserons le logiciel MATLAB-SIMULINK pour la simulation de notre station de conversion courant alternatif - courant continu, et des commandes associées.

### IV-2 Etude d'un système bipolaire en régime permanent :

Afin d'estimer les différentes grandeurs d'une station de conversion alternatif /continu bipolaire, nous considérons la station dont le schéma est le suivant :

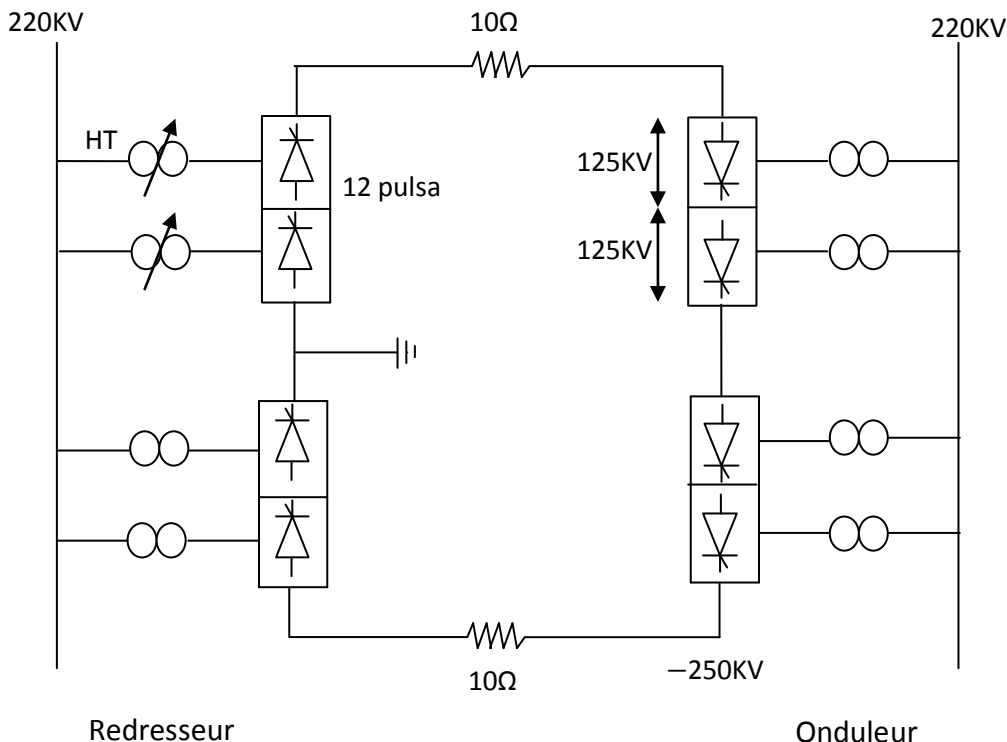


Figure IV-1

La liaison à courant continu bipolaire a une puissance estimée à 1000MW, sous la tension  $\pm 250\text{KV}$ . La résistance de la ligne continu est  $R_L = 10\Omega/\text{ph}$  ; chaque convertisseur est un pont à 12 pulsations avec la résistance de commutation

$$R_C = \frac{3X_C}{\pi} = 12\Omega \quad . \quad (6\Omega \text{ pour chaque pont hexaphasé}).$$

La performance de la liaison bipolaire est d'être analysée en la considérant comme étant une liaison monopolaire de +500 kV.

L'angle de retard à l'amorçage du redresseur  $\alpha_{min} = 5^\circ$ . Les effets de pertes de la station de convertisseur et la chute de tension à travers les valves peuvent être négligés.

La liaison à courant continu fonctionne initialement avec un redresseur à contrôle à courant constant avec  $\alpha_0 = 18^\circ, 10'$ , et l'onduleur en contrôle à angle d'extinction constant (CEA) avec  $\gamma_0 = 18^\circ, 10'$

La marge du courant  $I_M$  est prise à 15%, et le rapport des spires du transformateur dans chaque convertisseur est 0,5.

Au niveau de l'onduleur la puissance continue est 1000MW et la tension continue est de 500 kV (pour une liaison monopolaire équivalente).

**a- Pour la condition de fonctionnement ci-dessous, calculons :**

- Le facteur de puissance et la puissance réactive dans le réseau HT coté onduleur.
- L'angle de commutation (empiètement  $\mu$ ).
- Valeurs efficaces entre phases de la tension alternative, la composante fondamentale du courant de la ligne et la puissance réactive au réseau HT coté redresseur.

**b- Si les chutes de tension alternatives coté redresseur sont de 20%, calculons :**

- Les tensions continues aux extrémités : redresseur et onduleur.
- L'angle  $\alpha$  du redresseur et l'angle  $\gamma$  et  $\mu$  de l'onduleur.

- Les puissances : active et réactive dans les réseaux HT du redresseur et de l'onduleur.

Supposons que les prises du transformateurs n'ont pas été changées et que la tension alternative coté onduleur est maintenue constante

**c- Si les chutes de tension alternatives coté onduleur sont de 15% et la tension alternative coté redresseur reste à sa valeur initiale, déterminons après l'action le changement de prise du transformateur :**

- La tension continue aux extrémités : redresseur et onduleur.
- L'angle  $\alpha$  du redresseur et l'angle  $\gamma$  de l'onduleur.
- Les puissances active et réactive aux extrémités : redresseur et onduleur.

L'action du contrôle du transformateur du redresseur essaye de tenir  $\alpha$  entre  $15^\circ$  et  $20^\circ$ , et l'action du contrôle du transformateur de l'onduleur essaye de tenir la tension continue coté onduleur dans la gamme 500 à 510 kV.

Supposons que les positions de prises max et min sont 1.2 pu et 0.8 pu. (Correspondant au rapport de tour de 0.6 et 0.4) respectivement avec la dimension de puissance de prise de 0.001pu.

Afin d'étudier la station et de calculer ces paramètres utilisons le schéma du circuit équivalent de la liaison bipolaire représentée comme liaison monopolaire de +500 kV.

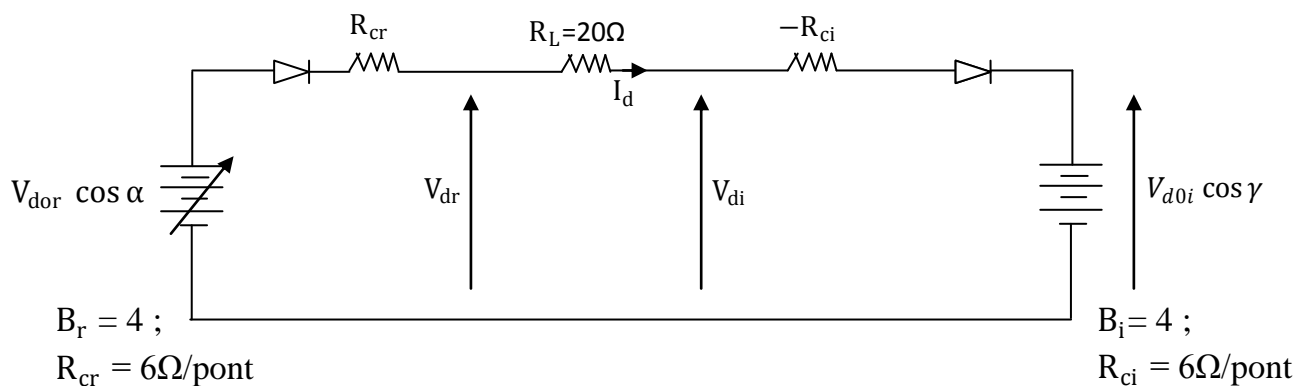


Figure IV-2 : circuit équivalent

a) La condition de fonctionnement initiale est comme suit :

$$\alpha_0 = \gamma_0 = 18.167^\circ;$$

$$T_r = T_i = 0.5;$$

$$P_i = 1000 \text{ MW};$$

$$V_{di} = 500 \text{ kV}.$$

Le courant continu (redressé) est :

$$I_d = \frac{P_i}{V_d} = \frac{1000}{500} = 2 \text{ kA}$$

La tension à vide idéal de l'onduleur :

$$V_{doi} = \frac{V_{di} + B_i R_{ci} I_d}{\cos \gamma_0} = \frac{500 + 4 \times 6 \times 2}{\cos 18.167^\circ} \implies V_{doi} = 576.75 \text{ kV}$$

• Le facteur de puissance du réseau HT coté onduleur :

$$\cos \phi_i = \frac{V_{di}}{V_{doi}} = \frac{500}{576.75} \implies \boxed{\cos \phi_i = 0.8669 \quad \text{et} \quad \phi_i = 29.896^\circ}$$

- La puissance réactive coté onduleur :

$$Q_i = R_i \operatorname{tg} \phi_i = 1000 \operatorname{tg} 29.896 \implies \boxed{Q_i = 574.94 \text{ MVAR}}$$

• Puisque  $V_{di} = \frac{V_{d0}}{2}(\cos \gamma + \cos \beta)$

$$\cos \beta = 2 \frac{V_{di}}{V_{doi}} - \cos \gamma_0$$

$$\cos \beta = 2 \times \frac{500}{576.75} - \cos 18.167^\circ = 0.7837. \implies \beta = 38.399^\circ$$

- Par conséquent l'angle de commutation est :

$$\mu_i = \beta - \gamma_0 = 38.399^\circ - 18.167^\circ \implies \boxed{\mu_i = 20.232^\circ}$$

- Au redresseur on a :

$$V_{dr} = V_{di} + R_L I_d = 500 + 2 \times 20 = 540 \text{ kV}$$

$$\text{Et } V_{dr0} = \frac{V_{dr} + B_r R_{cr} I_d}{\cos \alpha_0} = \frac{540 + 4 \times 2 \times 6}{\cos 18.167^\circ} \implies V_{dr0} = 618.85 \text{ kV}$$

- La tension alternative entre phases du réseau HT est :

$$E_{acr} = \frac{V_{d0r}}{1.3505 B_r T_r} = \frac{618.85}{1.3505 \times 4 \times 0.5} \implies E_{acr} = 229.12 \text{ kV}$$

- La somme des courants effectifs de phases du fondamental dans le transformateur est :

$$I_{Lr1} \cong \frac{\sqrt{6}}{\pi} B_r T_r I_d = 0.7797 \times 4 \times 0.5 \times 2 \implies I_{Lr1} = 3.119 \text{ kA}$$

$$P_r = V_{dr} I_d = 540 \times 2 = 1080 \text{ MW.}$$

- Le facteur de puissance du réseau HT coté redresseur est :

$$\cos \phi_r = \frac{V_{dr}}{V_{d0r}} = \frac{540}{618.85} = 0.8726 \quad \text{et} \quad \phi_r = 29.24^\circ$$

- La puissance réactive du réseau alternatif coté redresseur est :

$$Q_r = P_r \tan \phi_r = 1080 \tan 29.24^\circ \implies Q_r = 604.57 \text{ MVAR}$$

- b) Avec le changement de prise de charge du transformateur,  $V_{d0}$  est directement proportionnelle à  $E_{ac}$ . Donc, quand la tension du réseau HT coté redresseur chute de 20% nous avons :

$$V_{d0} = 0.8 \times 618.85 = 495.08 \text{ kV}$$

Nous supposons d'abord que la liaison à courant continu fonctionne en mode 1 :

Redresseur en contrôle courant continu (CC) avec  $I_d = I_{0rd} = 2$  kA et l'onduleur en contrôle CEA avec  $V_{di} = 500$  kV.

- La tension continue correspondante au redresseur est :

$$V_{dr} = V_{di} + R_L I_d = 500 + 20 \times 2 = 540 \text{ kV}$$

$$\text{Donc : } \cos \alpha = \frac{V_{dr} + B_r R_{cr} I_d}{V_{d0r}} = \frac{540 + 4 \times 6 \times 2}{495.08} > 1.0$$

Par conséquent, la condition du mode 1 non satisfaite, le contrôle passe au mode 2 : redresseur en contrôle CEA avec  $\alpha_{min} = \pm 5^\circ$  et l'onduleur en contrôle CC avec :

$$I_d = I_{0rd} - I_M = (1.0 - 0.15) \times 2 = 1.7 \text{ kA}$$

• Les tensions continues du redresseur et de l'onduleur maintenant sont :

$$V_{dr} = V_{d0r} \cos \alpha - B_r R_{cr} I_d = 495.08 \cos 5^\circ - 4 \times 6 \times 1.7 \quad \boxed{V_{dr} = 452.39 \text{ kV}}$$

$$V_{di} = V_{dr} - R_L I_d = 452.39 - 20 \times 1.7 \quad \boxed{V_{di} = 418.39 \text{ kV}}$$

• Puisque la tension alternative de l'onduleur n'a pas changé,  $V_{d0} = 576.75$  kV

Avec  $I_d = 1.7$  kV, nous avons :

$$\cos \gamma = \frac{V_{di} + B_i R_{cr} I_d}{V_{d0i}} = \frac{418.39 + 4 \times 6 \times 1.7}{576.75} = 0.796 \quad \Rightarrow \quad \boxed{\gamma = 37.23^\circ}$$

$$\text{Maintenant : } V_{di} = V_{d0i} \frac{\cos \gamma + \cos \beta}{2} \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{Donc : } \cos \beta = \frac{2 V_{di}}{V_{d0i}} - \cos \gamma = \frac{2 \times 418.39}{576.75} - 0.796 = 0.655 \quad \Rightarrow \quad \boxed{\beta = 49.10^\circ}$$

- L'angle de commutation de l'onduleur est :

$$\mu_i = \beta - \gamma = 49.10^\circ - 37.23^\circ \implies \boxed{\mu_i = 11.87^\circ}$$

- La puissance continue de l'onduleur est :

$$P_i = V_{di} I_d = 418.39 \times 1.7 \implies \boxed{P_i = 711.26 \text{ MW}}$$

- Le facteur de puissance du réseau alternatif coté onduleur est :

$$\cos \phi_i = \frac{V_{di}}{V_{d0i}} = \frac{418.39}{576.75} = 0.725 \implies \phi_i = 43.49^\circ$$

- La puissance réactive du réseau alternatif coté onduleur est :

$$\phi_i = P_i \tan \phi = 711.26 \tan 43.49^\circ = 674.85 \text{ MVAR}$$

- La puissance du réseau est :

$$P_r = V_{dr} I_d = 452.39 \times 1.7 \implies \boxed{P_r = 769.06 \text{ MW}}$$

- Le facteur de puissance du coté alternatif coté redresseur est :

$$\cos \phi_r \cong \frac{V_{dr}}{V_{d0r}} = \frac{452.39}{495.88} = 0.914 \implies \boxed{\phi_r = 23.97^\circ}$$

- La puissance réactive du réseau alternatif coté redresseur est :

$$Q_r = P_r \tan \phi_r = 769.06 \tan 23.97^\circ \implies \boxed{Q_r = 341.87 \text{ MVAR}}$$

- c) Quand la tension alternative de l'onduleur est de 15% et la tension du redresseur revient à sa valeur normale (mode 1 fonctionnement possible).

Par conséquent, le redresseur est en contrôle CC avec :  $I_d = I_{ord} = 2\text{kA}$  et l'onduleur est en contrôle CEA avec  $\gamma = 18.167^\circ$ .

En raison de la réduction dans la tension alternative, la tension continue de l'onduleur chute.  $\gamma$  de l'onduleur augmente et la tension continue diminue de telle sorte que  $I_d$  soit maintenu constant.

Le transformateur changeur de prises du redresseur agit pour maintenir  $\alpha$  entre  $15^\circ$  et  $20^\circ$ , et le transformateur changeur de prises agit pour maintenir  $V_{di}$  entre 500 kV et 510 kV.

La tension à vide idéale du convertisseur est directement proportionnelle à la tension alternative et le rapport de spire du transformateur.

En (a), on a calculé les tensions à vides idéales du redresseur et de l'onduleur sous les tensions alternatives normales et position de prise 1.0 pu (rapport de spires de 0.5) et on a :

$$V_{d0r} = 618.85 T_r' \quad \text{où } T_r' \text{ est la position de prise en pu.}$$

De la même façon pour l'onduleur avec la tension alternative réduite de 15% on a :

$$V_{d0i} = \frac{576.75}{0.85} \cdot T_i^2 = 490.24 T_i'$$

Par conséquent la tension continue de l'onduleur est :

$$V_{dr} = V_{d0i} \cos \gamma - B_i R_{ci} I_d = 490.24 T_i' \cos 18.167^\circ - 4 \times 6 \times 2$$

$$V_{dr} = (465.72 T_i' - 48) \text{ kV} \dots\dots\dots (2)$$

La tension continue du redresseur exigée pour maintenir  $I_d = 2$  kA est :

$$V_{dr} = V_{di} + R_L I_d = V_{di} + 20 \times 2 = (V_{di} + 40) \text{ kV}$$

Cela devait être égale à  $V_{dr} = V_{d0r} \cos \alpha - B_r R_{cr} I_d$

$$V_{dr} = (618.75 T_r' \cos \alpha - 48) \text{ kV} \dots\dots\dots (3)$$

De l'équation (2) et (3) on a :

$$\cos \alpha = \frac{V_{di} + 88}{618.85 T_r'} \dots\dots\dots (4)$$

Le tableau suivant montre les variations de  $V_{di}$  et  $\alpha$ , comme  $T'_i$  et  $T'_r$  varient de leurs valeurs initiales pour satisfaire les exigences du contrôle

$T'_i$	$T'_r$	$V_{di}$ (kV)	$\alpha$ (degrès)
1.0	1.0	417.7	35.2
1.01	0.99	422.4	36.6
⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮
1.07	0.93	450.3	20.7
1.08	0.92	455.0	19.4
⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮
1.10	0.93	464.3	16.3
1.11	0.93	468.9	14.6
1.12	0.94	473.6	15.1
1.13	0.95	478.3	15.6
⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮
1.17	0.98	496.9	15.3
1.18	0.99	501.5	15.8

Remarque :

$V_{di}$  est calculée en utilisant l'équation (1)

$\alpha$  est calculé en utilisant l'équation (4)

Du tableau, on remarque que la position de prise de l'onduleur augmente jusqu'à  $T'_i = 1.28$ pu. (Correspondant au rapport de spires de 0.59) qui résulte  $V_{di} = 501.55$  kV. La position de prise du redresseur en puissance utile  $T'_r$  qui est de 0.99 (rapport de spires de 0.495),  $\alpha$  correspondant est de  $15.8^\circ$  et la tension continue de l'équation (3) est :

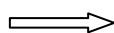
$$V_{dr} = 618.85 \times 0.99 \times \cos 15.8^\circ - 48 = 548.51 \text{ kV.}$$

Au redresseur :

$$P_r = V_{dr} I_d = 541.51 \times 2 = 1083.02 \text{ MW}$$

$$\cos \phi_r \cong \frac{V_{dr}}{V_{d0r}} = \frac{541.51}{618.85 \times 0.99} = 0.884.$$

$$Q_r = P_r \tan \phi_r = 1084.02 \tan \phi_r$$



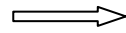
$Q_r = 573.2 \text{ MVAR.}$
-----------------------------

Au niveau de l'onduleur on a :

$$P_i = V_{di} I_d = 501.55 \times 2 = 1003.1 \text{ MW}$$

$$\cos \phi_i \cong \frac{V_{di}}{V_{d0i}} = \frac{501.55}{490.24 \times 1.18} = 0.867.$$

$$Q_i = P_i \tan \phi_i = 1084.02 \tan \phi_i$$



$Q_i = 576.7 \text{ MVAR}$
----------------------------

### VI-3 Simulation d'un système de transmission CCHT biterminale:

Notre station bipolaire constitue un système de transmission CCHT 50/60 Hz sous une tension de 500 kV, de courant 2 kA transmettant une puissance de 1000 MW.

L'analyse du système consiste en son étude en régime permanent et ses performances en régime transitoire.

#### IV-3-1 Description du circuit :

Une interconnexion en courant continu de 1000 MW (sous 500 kV et 2 kA) est utilisée pour transmettre une puissance d'un réseau alternatif de 500 kV, 5000 MW de fréquence 60Hz à un autre réseau de tension 345 kV, 10000 MVA sous une fréquence de 50Hz.

Le redresseur et l'onduleur sont des convertisseurs dodécaphasés à 12 pulsations connectés en série.

Ils sont reliés par une ligne de 300 km et deux réactances de lissage de 0,5 H.

Le transformateur échangeur de prise n'est pas simulé, donc les prises du transformateur sont fixées.

Les facteurs appliqués sont 0,90 coté redresseur et 0.96 coté onduleur.

La puissance réactive demandée par les convertisseurs est fournie par des bancs de condensateurs et filtre passe haut par total de 600 MVAR de chaque coté.

Des fonctions de protection continues sont implémentées dans chaque convertisseur.

Dans le redresseur, la protection contre les défauts continus détectera le défaut et forcera l'angle de retard à l'amorçage dans le régime de l'onduleur pour atteindre le courant de défaut.

Dans l'onduleur le contrôle de prévention de raté de commutation détectera les défauts alternatifs et réduira la limite maximum de l'angle d'amorçage pour décroître le risque de raté de commutation.

La protection de détection de la tension alternative minimale

La protection de défaut quand une chute de tension alternative est détectée :

- Le contrôle principal (Master control) initialise le début et la fin
- Le système de puissance et le système de contrôle sont échantillonnés pour un temps discret  $T_s = 50 \mu s$

### IV-3-2 Caractéristiques de la station :

#### IV-3-2-1 Coté redresseur :

##### ❖ Source alternative:

Tension entre phases	500 Kv
Puissance apparente	500 MVA
Fréquence : F	60 Hz
Résistance : R	0 $\Omega$
Inductance : L	98.03 $10^{-3}$ H
Montage	$Y_g$

##### ❖ Circuit RLC parallèle triphasé :

Résistance : R	26.07 $\Omega$
Inductance : L	48.86 $10^{-3}$ H
Capacité : C	0 F

❖ **réactances de lissage:**

Résistance : R	1 $\Omega$
Inductance : L	0.5 H
Capacité : C	Infinie

❖ **Filtre :**

Fréquence : F	50 Hz
Puissance réactive	600 MVAR

❖ **Transformateur :**

Puissance et Fréquence nominale	[1200 $10^6$ VA, 60 Hz]
[V <sub>1</sub> Ph-Ph (V <sub>rms</sub> ), R <sub>1</sub> (pu), L <sub>1</sub> (pu)]	[500 $10^3$ 0.9 ; 0.0025 ; 0]
[V <sub>2</sub> Ph-Ph (V <sub>rms</sub> ), R <sub>2</sub> (pu), L <sub>2</sub> (pu)]	[200 $10^3$ ; 0.0025 ; 0.24]
[V <sub>3</sub> Ph-Ph (V <sub>rms</sub> ), R <sub>3</sub> (pu), L <sub>3</sub> (pu)]	[200 $10^3$ ; 0.0025 ; 0.24]
Branche de magnétisation	R <sub>m</sub> = 500 pu X <sub>m</sub> = 500 pu

#### IV-3 -2-2 Coté onduleur :

##### ❖ Source alternative :

Tension	345 kV
Puissance apparente	10.000 MVA
Fréquence : F	50 Hz
Résistance : R	0 $\Omega$
Inductance : L	28.0 $10^{-3}$ H
Montage	$Y_g$

##### ❖ Circuit RLC parallèle triphasé :

Résistance : R	6.205 $\Omega$
Inductance : L	13.96 $10^{-3}$ H
Capacité : C	0 F

##### ❖ réactances de lissage:

Résistance : R	1 $\Omega$
Inductance : L	0.5 H
Capacité : C	infinie

##### ❖ Filtre :

Fréquence : F	50 H
Puissance réactive	600 MVAR

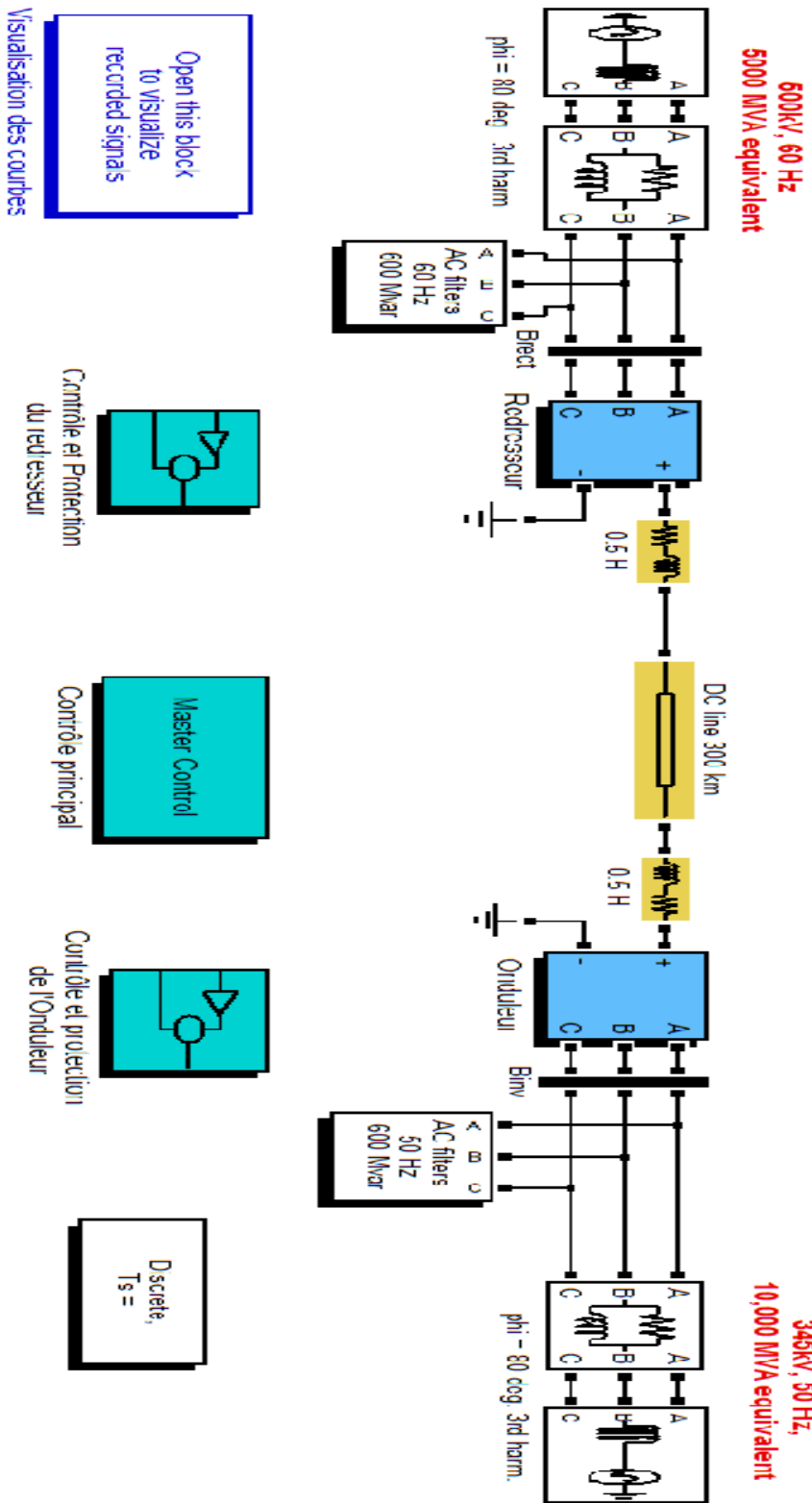
❖ **Transformateur :**

Puissance et Fréquence nominale	[1200 10 <sup>6</sup> VA, 50 Hz]
[V <sub>1</sub> Ph-Ph (Vrms), R <sub>1</sub> (pu), L <sub>1</sub> (pu)]	[345 10 <sup>3</sup> .0, 96 ; 0.0025 ; 0 ]
[V <sub>2</sub> Ph-Ph (Vrms), R <sub>2</sub> (pu), L <sub>2</sub> (pu)]	[200 10 <sup>3</sup> ; 0.0025 ; 0.24]
[V <sub>3</sub> Ph-Ph (Vrms), R <sub>3</sub> (pu), L <sub>3</sub> (pu)]	[200 10 <sup>3</sup> ; 0.0025 ; 0.24]
Branche de magnétisation	R <sub>m</sub> =500 pu X <sub>m</sub> = 500 pu

❖ **Ligne à courant continu :**

Nombre de phase	1
Fréquence : F	60 Hz
Résistance : R	0.015 Ω
Inductance : L	0.792. 10 <sup>-3</sup> H
Capacité : C	14 .4. 10 <sup>-9</sup> F
Longueur de la ligne	300 Km

IV-3 -3 Schéma bloc de la simulation :



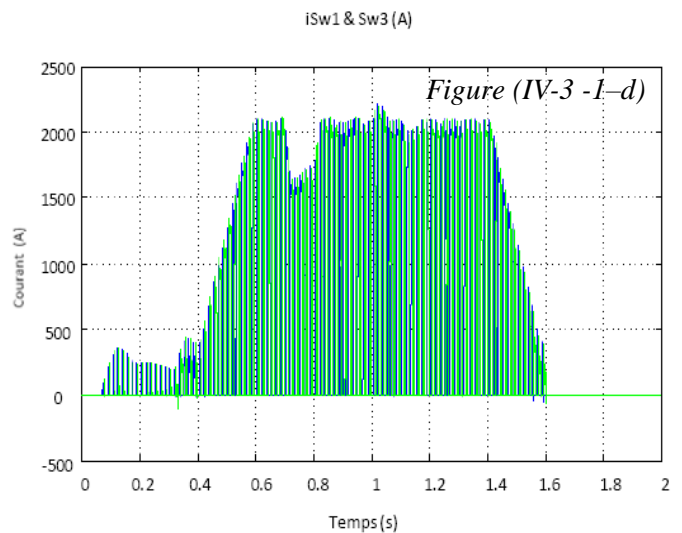
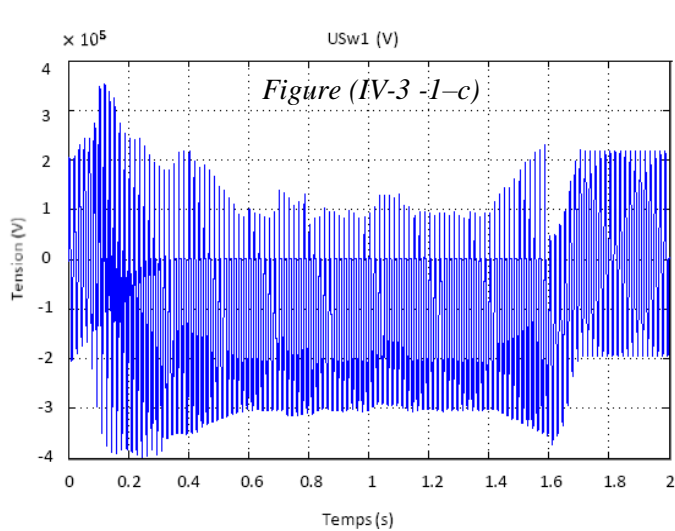
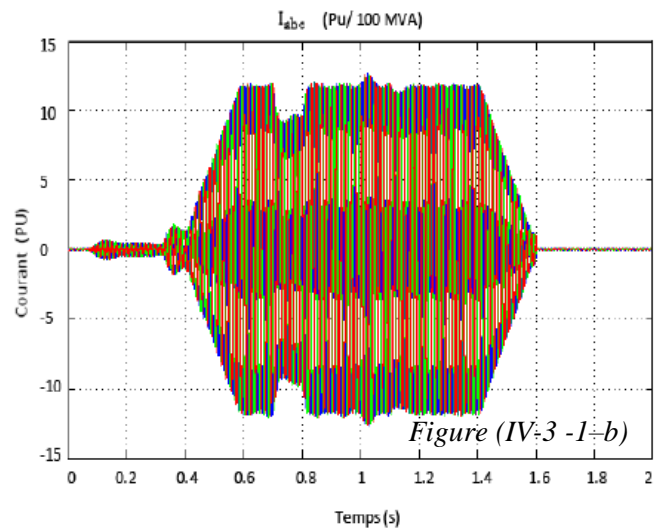
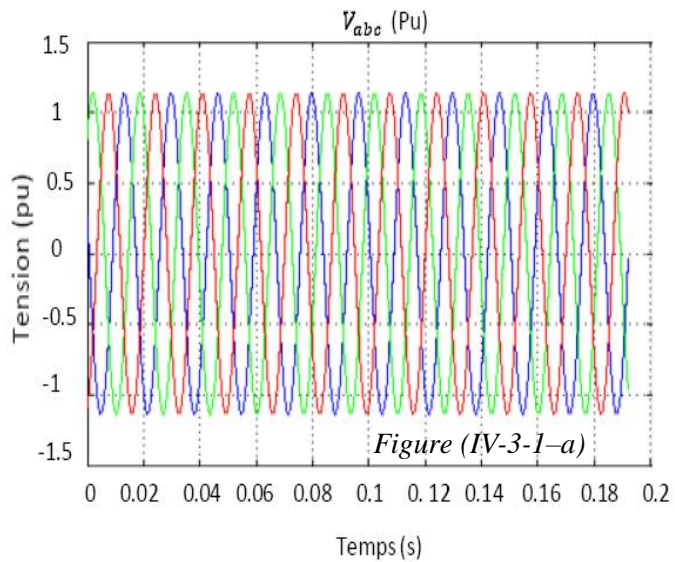
**LIAISON CCHT Biterminale de 1000 MW**  
**( 500 kV - 2 KA ) 50 / 60 Hz**

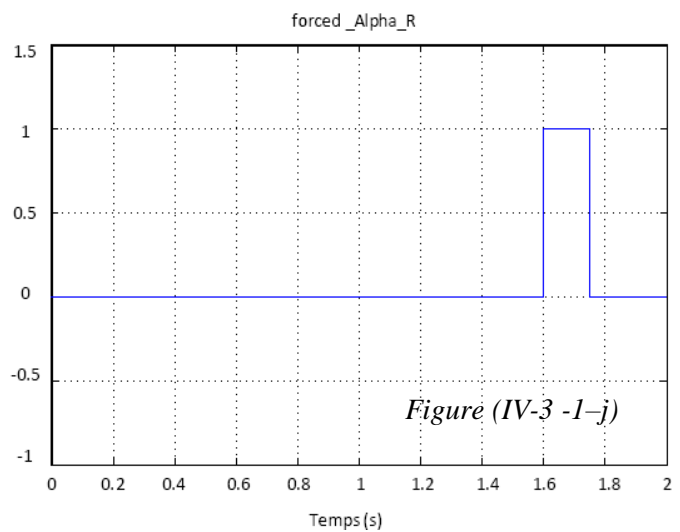
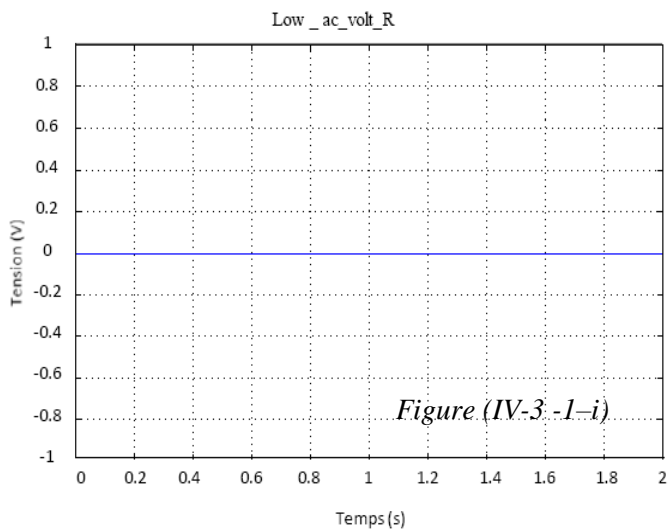
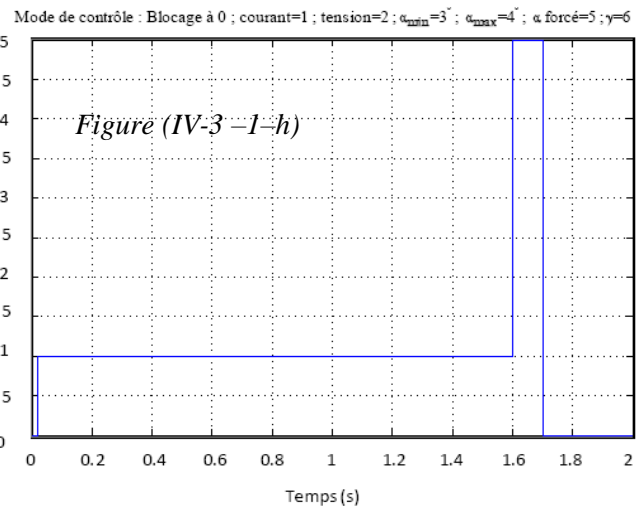
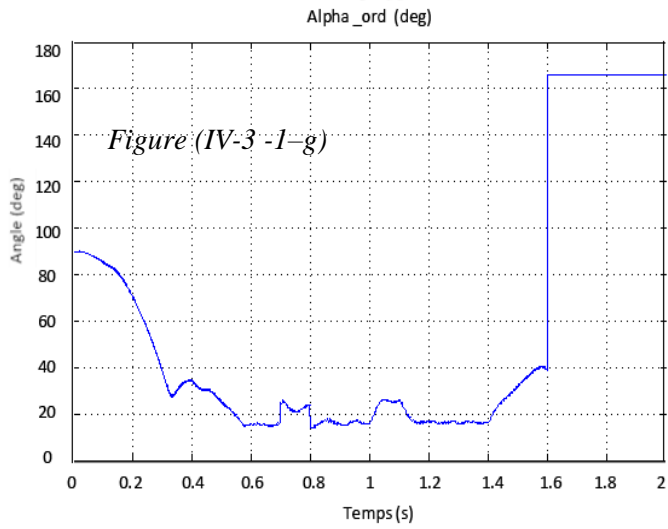
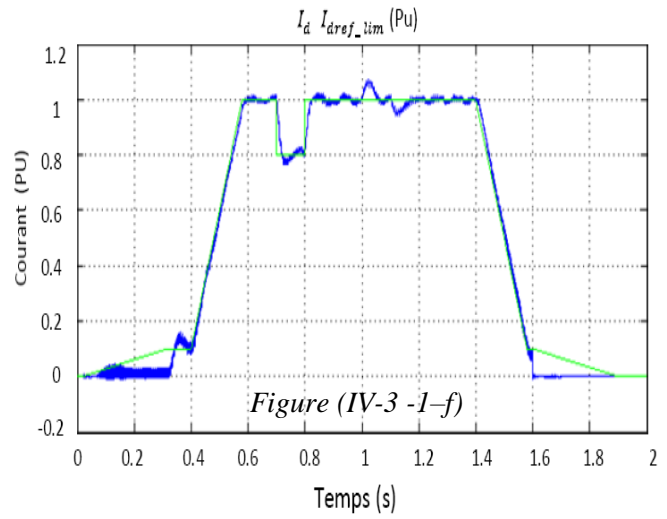
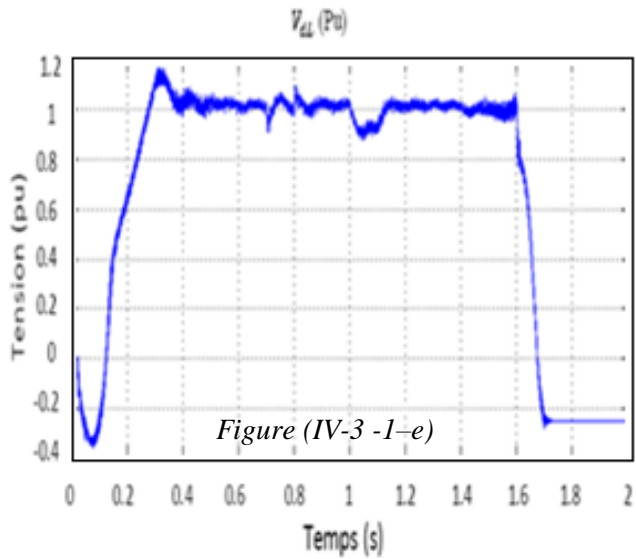
Le système est programmé pour fonctionner en régime permanent ; puis des échelons sont appliqués sur le courant de référence du redresseur et la tension de référence de l'onduleur pour observer la réponse des régulateurs.

#### IV-3-4 Résultats de la simulation :

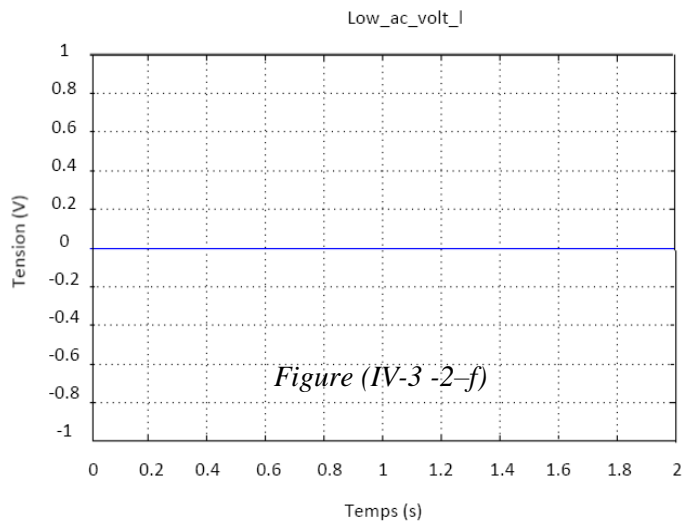
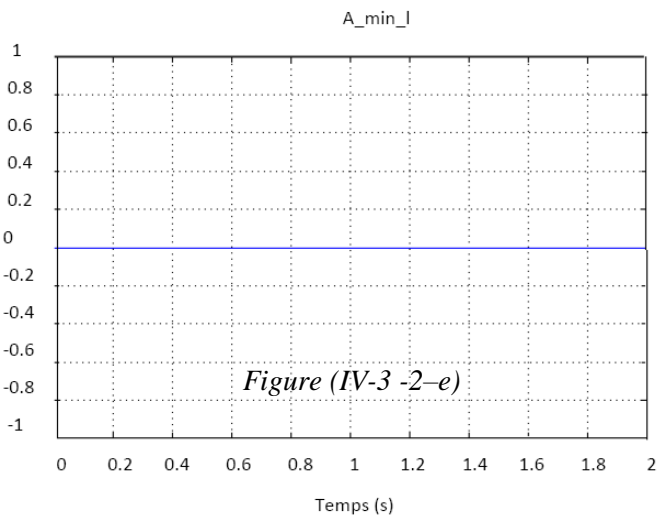
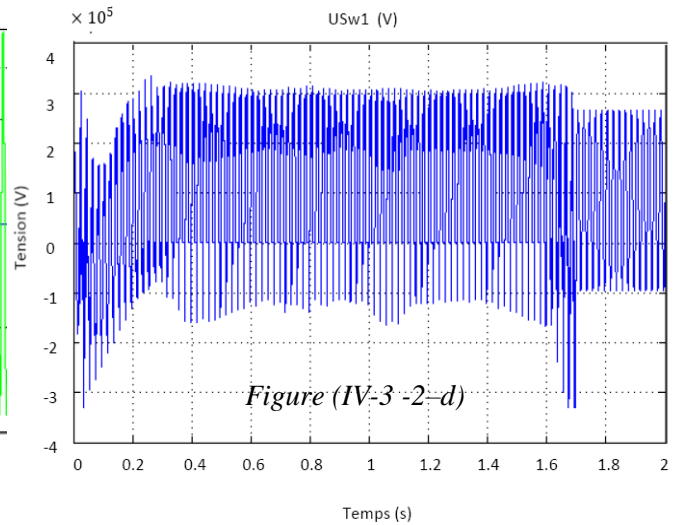
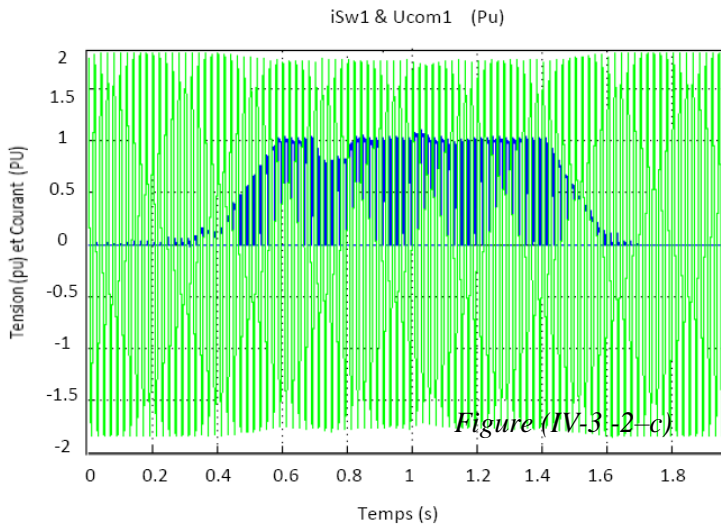
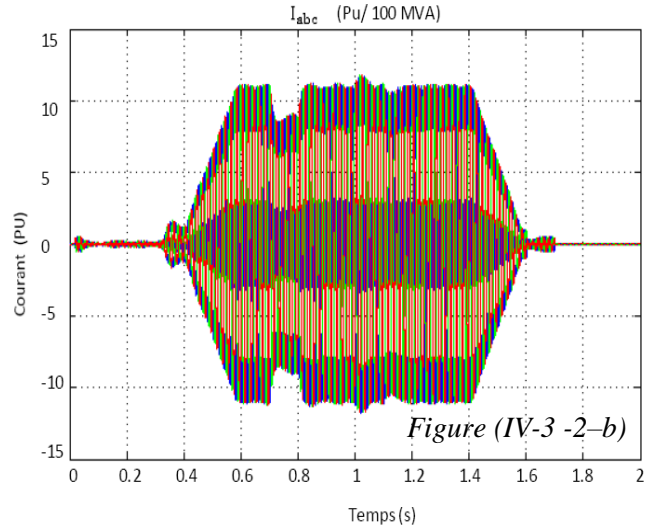
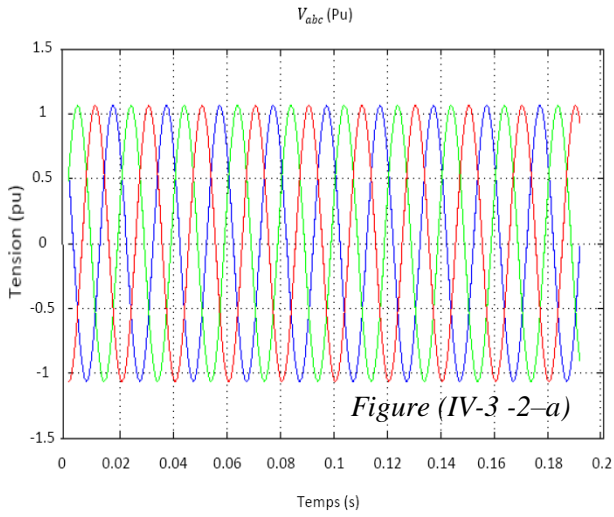
- La courbe de la tension continue 1pu =500 kV
- La courbe du courant continu (référence + valeurs mesurées) 1pu = 2 kA

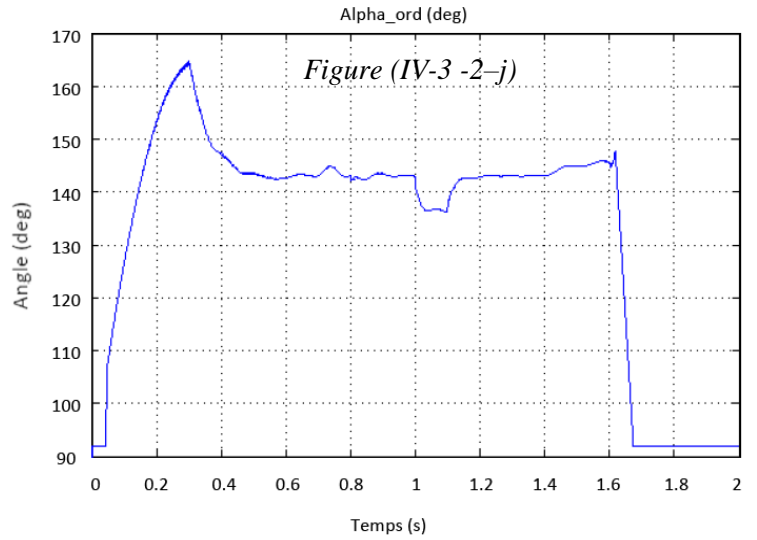
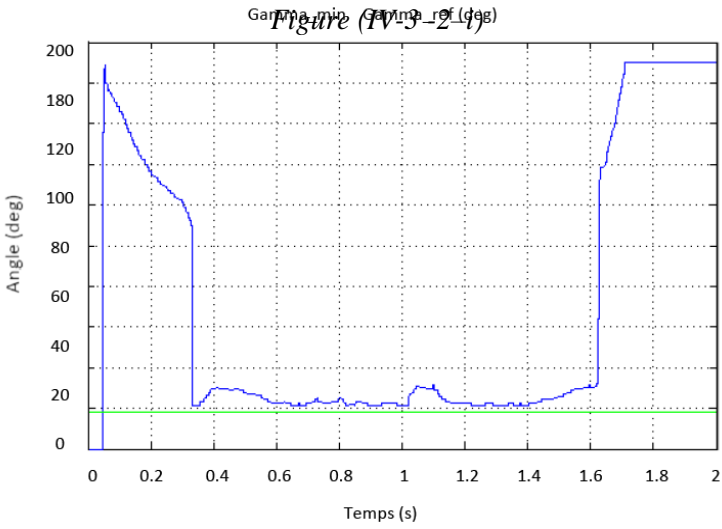
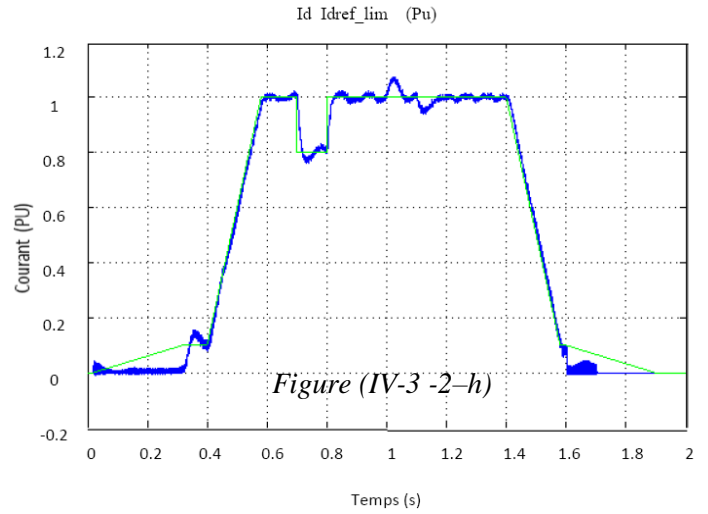
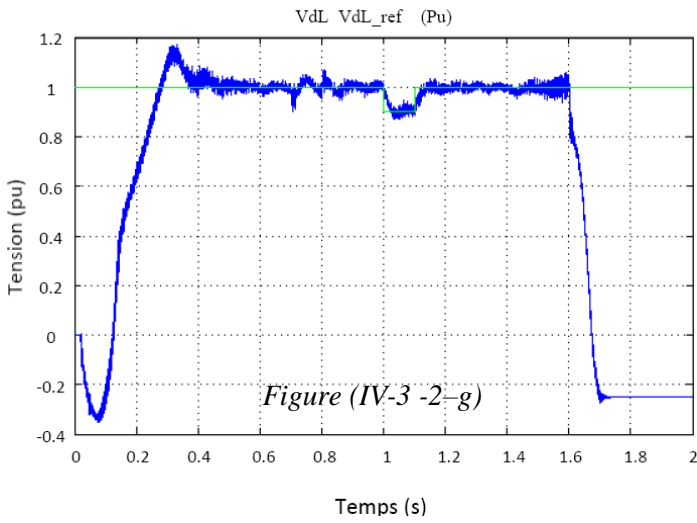
##### 1- Coté redresseur :



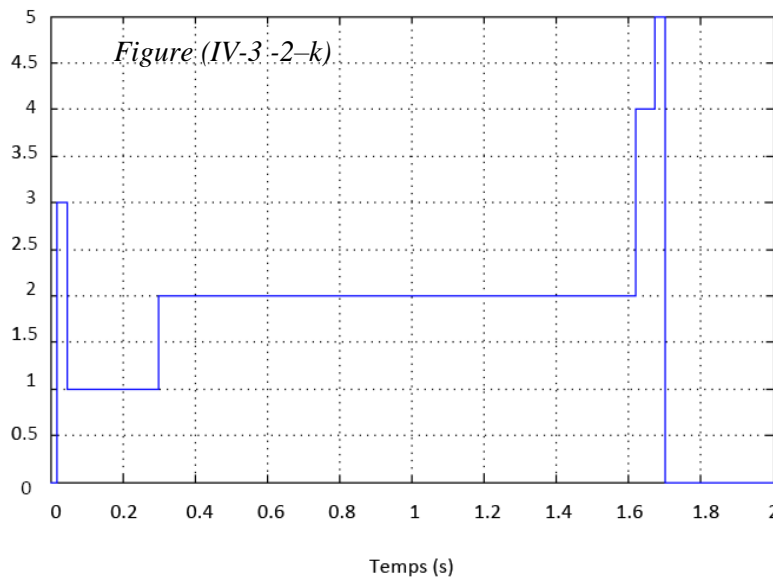


## 2- Coté onduleur :





Mode de contrôle : Blocage à 0 ; courant=1 ; tension=2 ;  $\alpha_{\min}=3^\circ$  ;  $\alpha_{\max}=4^\circ$  ;  $\alpha$  forcé=5 ;  $\gamma=6$



### IV-3-5 Interprétation des résultats :

Les tensions  $V_{a,b,c}$  des deux cotés alternatifs sont bien sinusoïdales et forment un système triphasé équilibré. (Figure IV-3-1-a), (Figure IV-3-2-a)

Les courants alternatifs  $I_{a,b,c}$  ont une forme alternative dépendant de la charge, leurs amplitudes sont limitées par le courant continu  $I_d$ . (Figure IV-3-1-b)  
(Figure IV-3-2-b)

Le système fonctionne de 0 à 2 secondes sous sept modes de contrôle.

#### Côté redresseur :

- Le redresseur fonctionne sous trois modes de contrôle (0 : mode bloqué, 1 : mode à courant continu constant et 5 : mode  $\alpha$  forcé). (Figure IV-3-1-h)
- On impose au courant  $I_d$  à suivre un courant de référence  $I_{dref}$  (Figure IV-3-1-f)

A présent on va illustrer l'effet de chaque mode de contrôle sur chacune des grandeurs caractérisant le redresseur.

#### a- Tension continue $V_d$ (Figure IV-3-1-e) :

En mode bloqué, on remarque une perturbation de la tension  $V_d$  qui devient négative, puis une augmentation de cette tension est constatée dans le mode à courant continu constant, elle augmente jusqu'à atteindre sa valeur nominale de 1 pu et demeure constante pour tout ce mode. Dans le mode  $\alpha$  forcé, la tension  $V_d$  décroît subitement pour redevenir négative ; enfin en revenant au mode bloqué elle reste négative et constante jusqu'à la fin de ce mode.

#### b- L'angle de retard à l'amorçage $\alpha$ (Figure IV-3-1-g) :

En mode bloqué, l'angle de retard à l'amorçage  $\alpha$  est égal à  $90^\circ$ , ensuite on remarque une diminution de cet angle pour atteindre des valeurs minimales comprises entre  $15^\circ$  et  $40^\circ$  dans le mode à courant continu constant, puis une augmentation brusque de  $\alpha$  est constatée dans le mode  $\alpha$  forcé pour atteindre une valeur maximale de  $166^\circ$ . En

revenant au mode bloqué l'angle d'amorçage reste constant et égal à sa valeur maximale pendant tout ce mode.

### **Côté onduleur :**

L'onduleur fonctionne sous six modes de contrôle (0 : mode bloqué, 1 : mode à courant continu constant, 2 : mode à tension continue constante, 3 : mode  $\alpha_{\min}$ , 4 : mode  $\alpha_{\max}$  et mode  $\alpha$  forcé). (Figure IV-3-2-k)

On impose à la tension  $V_d$  à suivre une tension de référence  $V_{dref}$  (Figure IV-3-2-g), au courant  $I_d$  à suivre un courant de référence  $I_{dref}$  (Figure IV-3-2-h) et à l'angle de marge  $\gamma$  à ne pas décroître au dessous d'une valeur minimale égale à  $18^\circ$ . (Figure IV-3-2-c).

L'illustration de l'effet de chaque mode de contrôle sur chacune des grandeurs caractérisant l'onduleur est comme suit :

#### **a- Tension continue $V_d$ (Figure IV-3-2-g) :**

En mode bloqué, on remarque une perturbation de la tension  $V_d$  qui devient négative, et le demeure pendant tout le mode  $\alpha_{\min}$ , puis on constate une augmentation rapide de cette tension jusqu'à atteindre sa valeur nominale 1 pu dans le mode à courant continu constant, et le reste pendant tout le mode à tension continue constante. Dans les modes  $\alpha_{\max}$  et  $\alpha$  forcé, la tension  $V_d$  décroît brusquement et redevient négative, enfin en revenant au mode bloqué elle se stabilise à une valeur négative égale à -0,25 pu.

#### **b- Angle de retard à l'amorçage $\alpha$ (Figure IV-3-2-j) :**

En mode bloqué, l'angle de retard à l'amorçage est égal à  $92^\circ$ , une augmentation brusque est remarquée dans le mode  $\alpha_{\min}$  pour atteindre une valeur maximale de  $166^\circ$  dans le mode à courant continu constant, puis  $\alpha$  décroît pour se stabiliser à des valeurs comprises entre  $138^\circ$  et  $142^\circ$  dans le mode à tension continue constante. Dans les modes  $\alpha_{\max}$  et  $\alpha$  forcé on constate une diminution brusque de cet angle jusqu'à sa valeur initiale qui est de  $92^\circ$  et le demeure en revenant au mode bloqué.

**c- Angle de marge  $\gamma$  (Figure IV-3-2-i) :**

En mode bloqué, l'angle de marge est nul, il augmente brusquement jusqu'à atteindre une valeur de  $189^\circ$  en mode  $\alpha_{\min}$ , puis il décroît dans le mode à courant continu constant. Dès que le mode à tension continue constante intervient, on constate une chute brusque de  $\gamma$  pour se stabiliser à des valeurs proches de  $18^\circ$ . En mode  $\alpha_{\max}$ , l'angle  $\gamma$  augmente pour atteindre une valeur de  $140^\circ$ , puis continu à croître jusqu'à atteindre une valeur de  $189^\circ$  en mode  $\alpha$  forcé pour se stabiliser à cette valeur en revenant au mode bloqué.

**IV-4 Conclusion :**

Dans ce chapitre, afin d'estimer l'ordre de grandeur des différents paramètres mis en jeu dans une station bipolaire en régime permanent, nous avons fait une étude d'une liaison CCHT, dans laquelle nous avons calculé les différents paramètres, et analysé son mode de fonctionnement en absence de perturbation.

Puis nous avons réalisé une simulation dans laquelle on a commandé la liaison CCHT biterminale qui consiste à transmettre de la puissance électrique sous une tension de 500 kV à 60 Hz, un autre réseau de tension de 345 kV à 50 Hz à travers une ligne à courant continu de 300 km.

Afin de voir la réponse du système en régime dynamique, nous avons imposé au courant et à la tension des valeurs de référence sous forme d'échelon de différentes valeurs.

La simulation nous a permis de visualiser que le système suit les références des courant et des tensions imposés, et de conclure que les modes de contrôle et de régulations ont répondu positivement aux différentes valeurs imposées.

## **CONCLUSION GENERALE :**

Dans ce mémoire nous avons présenté une étude d'un système de puissance à liaison CCHT biterminal dont laquelle nous avons abordé la conversion de l'énergie électrique (alternative /continue), les domaines d'application du courant continu haute tension ainsi que le contrôle-commande des centrales de conversion.

Notre système de puissance consiste en une centrale de conversion comportant deux convertisseurs (redresseur et onduleur), reliés par une liaison à courant continu alimentée par deux réseaux alternatifs différents.

La possibilité de régler indépendamment l'échange de puissance active et de puissance réactive avec le réseau alternatif procure aux systèmes CCHT plusieurs domaines d'applications dans le transport de l'énergie électrique. Plusieurs modes de contrôle concourent pour la commande du transit de puissance, ce qui rend les systèmes CCHT relativement complexes, donc nécessite une bonne maîtrise de l'outil de commande et de régulation.

La commande de la puissance à courant continu peut se faire beaucoup plus rapidement. La rapidité des systèmes de commande permet aussi de limiter les courants de court-circuit à des valeurs bien inférieures à celles rencontrées sur un réseau à courant alternatif. Cette réponse rapide permet d'utiliser une ligne à courant continu pour alimenter et stabiliser un réseau à courant alternatif. Lorsque le réseau à courant alternatif est sur le point de devenir instable (à la suite d'une perturbation), on peut moduler la puissance à courant continu de façon à amortir les oscillations.

La maîtrise des convertisseurs de grandes puissances, la réduction des pertes de puissance, celle des coûts des lignes de transmission, l'augmentation de la stabilité des systèmes, un meilleur contrôle de la puissance active et le développement permanent des semi-conducteurs ont rendu les systèmes CCHT plus compétitifs que les systèmes à courant alternatif dans plusieurs domaines.

Les convertisseurs représentent l'avenir pour la conception des systèmes CCHT et ils peuvent être les candidats idéaux pour les domaines d'application suivants :

- La connexion de sources d'énergie renouvelables telles que les éoliennes ;
- L'acheminement d'électricité vers des îles ;
- L'apport d'énergie à des grandes villes qui sont soumises à des contraintes environnementales et de sécurité

Enfin, nous souhaitons que ce modeste rapport sera une référence utile pour ceux qui auront l'occasion de le consulter.

[1] : Théodore WILDI : « électrotechnique » ; Edition de Boeck Université (avec la collaboration de Gilbert Sybille).

[2] : Karim HADJ-SAID : « Etude dynamique d'un système de puissance a liaisons CCHT multi terminales ; Modélisation- Contrôle –Stabilité » [Mémoire de Magister].

[3] : Eric JONCQUEL « Transport d'énergie en courant continu à haute tension »  
[Technique d'ingénieur]. D 4761

[4] : Laurent TOPEZ « Commande d'un système de conversion de type VSC-HVDC. Stabilité- Contrôle des perturbations». [Thèse doctorat 2005 ; Institut National Polytechnique de Grenoble].

[5]: Eric JONCQUEL « Fonctionnement des liaisons à courant continu haute tension » .  
[Technique d'ingénieur].D 4762

[6]: Barry W Williams «Principles and elements of power electronics »  
Université of Strathclyde Glasgow,

[7]: GUY SEGUIER « Les convertisseur de l'électronique de puissance volume1 la conversion alternatif – continue » 2<sup>eme</sup> édition

[8] Debit Makhoulf ; Ziadi Amar « Etude d'un système de puissance à liaison CCHT monoterminale » [mémoire d'ingénieur 2008]

[9] P.Kundur « Power system stability and control » Edition McGraw-Hill