

République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique**

CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED

INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie électrique et Electronique

Spécialité : Réseaux Electriques

Presenté par : HOUAMDI Radia

Thème

**Analyse le niveau d'influence d'un four à arc
électrique sur le réseau électrique**

Soutenu le 29 Juin 2011

Devant le jury composé de :

Mr.
Mr.
Mr.

ZELLOUMA Laid
LABDANIE Rafike
DJEGHADER Yacine

MC
MC
MC

Président
Examineur
Rapporteur

2010-2011

Remerciements

Je à remercier tout d'abord Dieu le tout puissant pour la volonté ,la santé et le patience,qu'il nous a donné durant toutes ces longues années

*Mes remerciements les plus vifs et chaleureux, vont à mon directeur de mémoire monsieur **DJEGHADER Yacine** pour son aide, son orientation judicieuse et sa disponibilité, aussi pour la confiance, la patience et la compréhension qu'il m'a toujours manifesté ...*

J'aimerais remercier du fond du coeur mes parents et mes soeurs pour leurs présence et disponibilité et pour l'appui inconditionnel qu'ils m'ont toujours apporté...

Je à remercier vivement toutes personnes qui aidé mes élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui aidés mes de prés ou de loin à accomplir ce travail.

En fin, je à exprimer ma reconnaissance à tous mon amis et collègues pour le soutien moral et matériel...

Nomenclature

EAF :	Electrical arc furnace
PCC :	Point commun coupling
HT:	High voltage
BT:	Base voltage
MT :	Moyenne voltage
THD:	Taux de distorsion harmonique
FACTS:	Système de transmission à courant alternatif Flexible
SVC:	Compensateur statique de puissance réactive
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistors
IGCT	Insulated Gate Commutated Thyristors
STATCOM:	Compensateur statique
TCSC:	Capacité série commande par thyristor
SSSC:	Compensateur série synchrone
UPFC:	Compensateur universel
RCT:	Réactance commande par thyristor
MLI:	Modulation de largeur d'impulsion
Y_h :	Valeur efficace de tension de l'harmonique de rang h,
Y_0 :	Valeur de la composante continue,
I_h :	Valeur efficace de courant de l'harmonique de rang h,
D :	Puissance déformante
F:	Facteur de puissance
P:	Puissance active
Q:	Puissance réactive
S:	Puissance appairant
V_{sh} :	Tension (shunt) injectée par le STATCOM
I_{sh} :	Courant (shunt) injecté par le STATCOM
R_{sh} :	Résistance du transformateur de couplage shunt du STATCOM

X_{sh} :	Réactance du transformateur de couplage shunt du STATCOM
P_{sh} :	Puissance active délivrée par le STATCOM
Q_{sh} :	Puissance réactive délivrée par le STATCOM
U_{dc} :	Tension continu aux bornes du condensateur
I_{dc} :	Courant dans le circuit continu
R_{arc} :	Résistance de arc
R_0 :	Résistance constante

Résumé :

Le four à arc est un système électrothermique utilisant l'énergie électrique pour chauffer une charge les four à arc sont utilisés pour la fabrication de l'acier à partir de la ferraille .

Le but de ce mémoire est d'étudier l'impact de four à arc sur les réseaux électriques ,qui est un très mauvais impact à cause de l'instabilité non linéarité et la dissymétrie l'arc électrique le fonctionnement du four génère les harmonique,le flicker,et provoque déséquilibre...

Dans la deuxième chapitre nous montrons ces phénomènes perturbation l'aide des mesures réelles (étude pratique pendant un fonctionnement à la four à arc)

Pour atténuer le perturbation générées par les four à arc plusieurs solution ont été proposées dans la chapitre III .la moderne de ce solution est un FACTS

Dans fin de ce travail ,nous avons fait une simulation avec et sans du STATCOM d'une alimentation du four à arc ,les résultats du simulation obtenus montrent l'efficacité de cet dispositif pou la minimisation du phénomène flicker

Mots clés: FAE,harmonique ,flicker ,FACTS ,STATCOM

الخلاصة :

أفران القوس الكهربائي هي أنظمة كهر وحرارية تستعمل الطاقة الكهربائية لتسخين الحمولة .كما تستغل لصناعة الفولاذ انطلاقاً من الحدائد العتيقة

الهدف من هذه المذكرة هو دراسة تأثير أفران القوس الكهربائي على الشبكة الكهربائية التي هي سيئة جداً بسبب عدم استقرار , لاختطية و لا تناظر الأقواس الكهربائية ,تعمل هذه الأفران على توليد الهارمونيك , التذبذب,و لا تناظر في الفصل الثاني منا بعرض التشويش بمساعدة قياسات حقيقية (دراسة عملية تتعلق بسير الفرن) من أجل إنقاص التشويش الكهربائي المولد من طرف الفرن هناك عدة طرق وقد قدمناها في الفصل الثالث ,و من أهم هذه الحلول هي أنظمة الخطوط المطوعة (FACTS) وفي نهاية هذا العرض قد قمنا بمحاكاة باستعمال وبدون استعمال المعوض الساكن (STATCOM) لتغذية القوس ,نتائج هذه المحاكاة المتحصل عليه تبرهن فعالية هذا النظام (STATCOM) لتقليل من ظاهرة التذبذب

الكلمات المفتاحية : أفران القوس الكهربائي,الهارمونيك, أنظمة الخطوط المطوعة (FACTS) , المعوض الساكن (STATCOM)

Introduction générale

Le four à arc est l'un des moyens les plus modernes de production d'acier en aciérie électrique, grosse consommatrice d'électricité. Le four à arc a été appliqué industriellement à la fabrication par **Hérault** au début du XX^{em} siècle. Depuis cette époque, le pourcentage d'acier électrique dans la production mondiale d'acier n'a cessé de croître, passant de 10.5% en 1960 à 18.5% en 1978.[1]

Cependant le four à arc est un grand pollueur du réseau électrique, en terme d'harmoniques et surtout de flicker.

Plusieurs solutions de dépollution des réseaux électriques ont été déjà proposées. Celles qui répondent le mieux aux contraintes industrielles ,jusqu'à la fin des années 1980, les seuls moyens permettant de remplir ces fonctions étaient des dispositifs électromécaniques, à savoir les transformateurs avec régleur en charge, les bobines d'inductance et les condensateurs commutés par disjoncteurs pour le maintien de la tension et la gestion du réactif. Toutefois, des problèmes d'usure ainsi que leur relative lenteur ne permet pas d'actionner ces dispositifs plus de quelques fois par jour ; ils sont par conséquent difficilement utilisables pour un contrôle continu des flux de puissance.

Une autre technique de réglage et de contrôle des puissances réactives, des tensions et des transits de puissance utilisant l'électronique de puissance a fait ses preuves.

La solution de ces problèmes passe par l'amélioration du contrôle des systèmes électriques déjà en place. Il est nécessaire de doter ces systèmes d'une certaine flexibilité leur permettant de mieux s'adapter aux nouvelles exigences.[2]

Les éléments proposés qui permettent ce contrôle amélioré des systèmes sont les dispositifs FACTS « *Flexible Alternating Current Transmission System* ». Les dispositifs FACTS font en général appel à de l'électronique de puissance, des microprocesseurs, de l'automatique, des télécommunications et des logiciels pour parvenir à contrôler les systèmes de puissance. Ce sont des éléments de réponse rapide. Ils donnent en principe un contrôle plus souple de l'écoulement de puissance. Ils donnent aussi la possibilité de charger les lignes de transit à des valeurs près de leur limite thermique, et augmentent la capacité de transférer de la puissance d'une région à une autre. Ils Limitent aussi les effets des défauts et des défaillances de l'équipement, et stabilisent le comportement du réseau[3].

Notre travail consiste à étudier l'analyse de l'influence du four à arc électrique sur le réseau électrique. La présentation du mémoire est structurée en une introduction et quatre chapitres suivie par une conclusion.

- ❖ Le premier chapitre : est consacré à l'histoire, différentes parties principales qui constituent les fours électriques et les principaux types des fours électriques suivis d'un avantage et des inconvénients.
- ❖ Le deuxième chapitre : est consacré à l'impact du four à arc sur le réseau électrique c-à-d étudie les phénomènes principaux qui dégradent la qualité de l'énergie électrique, leurs origines, les conséquences sur les équipements.
- ❖ Le troisième chapitre : nous avons montré dans ce chapitre les compensations des perturbations électriques :
 - Compensation dynamique (compensateur synchrone), et la compensation statique (les batteries de condensateurs).
 - Filtre passif.
 - FACTS: On dresse tout d'abord les techniques de compensation de puissance réactive classiques. Une classification des différents types de FACTS est proposée et les principaux dispositifs de chaque famille sont décrits de façon plus détaillée.
- ❖ Le quatrième chapitre : est consacré à la modélisation et application dans le logiciel MATLAB/Simulink. On commencera par la modélisation du four à arc puis la description de la structure des dispositifs (STATCOM), une explication en détail des principes de leur fonctionnement et puis la contribution de ces derniers suivie par la modélisation de ces dispositifs et différents modèles mathématiques. Les circuits sont développés séparément. La stratégie de commande Watt-Var découplé adoptée pour le contrôle des courants actifs et réactifs de ces dispositifs est expliquée ainsi que le calcul de tous les régulateurs proportionnels intégraux de chaque circuit est démontré.

Afin de valider la théorie et les modèles exposés dans ce chapitre une simulation structurée est exécutée dans l'environnement Matlab-Simulink de l'alimentation d'une charge polluante (EAF) avant et après l'implantation du STATCOM.

Les résultats obtenus montrent l'efficacité de ce dispositif surtout côté amélioration de la forme d'onde, ainsi que la minimisation du flicker.

A la fin de ce travail des conclusions sont tirées et des recommandations sont proposées.

Chapitre I : Les four à arc

I-1- Introduction

Le four à arc a été appliqué industriellement à la fabrication de l'acier au début du XX^e siècle. Sa flexibilité a permis de simplifier le processus de production des aciers courants grâce aux mini-usines. Le four à arc est aujourd'hui, dans beaucoup de cas, l'outil de fusion le mieux adapté. Aujourd'hui 35% des aciers dans le monde proviennent de fours à arc. [1]

I-2- Historique

Les premiers fours à arc électrique ont été mis au point par **Paul Héroult**, en France, près de Grenoble, qui dépose son premier brevet en 1887. Non loin de là, à Venthon, **Paul Girod** développe le four à arc pour étudier la métallurgie du vanadium et d'autres ferroalliages dès 1898. Dans la vallée de la Romanche, Keller démarre l'électrochimie à partir de 1902.

Le four électrique de Héroult va rapidement s'imposer comme outil incontournable de la fabrication de ferrochrome, en supplantant rapidement le cubilot. Son avantage décisif apparaît lorsque Héroult, en remplaçant le carbone du matériau réfractaire du creuset par de la chromite, parvient à obtenir un ferrochrome d'une teneur en carbone inférieure à 5%. La fabrication au four à arc rencontre un très grand succès, divisant le coût du ferrochrome par presque trois, et permet le développement des aciers inoxydables.

En 1907, des fours sont construits dans une usine aux États-Unis pour une utilisation industrielle. Ils produisaient initialement un « acier électrique » essentiellement destiné à fabriquer des aciers de machine-outil et destinés à fabriquer des ressorts en acier.

Au XIX^e siècle, plusieurs personnes ont utilisé un arc électrique pour fondre le fer. Sir Humphry Davy a effectué une démonstration expérimentale en 1810. Pinchon a tenté de construire un four électrothermique en 1853 ; en 1878-79, Sir William Siemens a déposé un brevet pour un type de four à arc. Le « Stessano electric furnace » est un four à arc tournant (pour mélanger le bain en fusion).

I-3- Perspectives du marché mondial d'acier

Un climat très favorable, selon les prévisions de l'IISI (International Iron and Steel Institute) devrait persister dans le marché mondial de l'acier en 2006 et 2007.

La consommation mondiale d'acier devrait augmenter en 2006 avec un taux de croissance de 4,8% et dépasser les 1052 millions de tonnes.

Pour ce qui concerne le prix des matières premières une baisse à l'exception du minerai de fer devrait être observée dès 2006. Toutefois l'importance croissante des coûts de transport dû à la hausse du pétrole continuera à pénaliser les échanges mondiaux d'acier favorisant le développement de la production d'acier là où la consommation augmente.

Dans ce contexte, l'évolution du marché de l'acier en Chine et plus particulièrement le rapport entre sa production et sa consommation, ses exportations et importations joueront de plus en plus un rôle très important dans le marché mondial de l'acier.

Lorsque le taux de croissance de la consommation d'acier en Chine n'augmentera plus que de 5%, comme dans tout cycle d'industrialisation, la sidérurgie chinoise devra se moderniser et se rationaliser. Aujourd'hui la plupart des industries sidérurgiques chinoises consomment des grosses quantités d'énergie et sont très polluantes.

Pour consolider sa place de grande nation sidérurgique la Chine sera donc obligée d'augmenter la production d'acier électrique au détriment de l'industrie sidérurgique classique trop lourde et peu flexible.

Dans le cas de l'industrie sidérurgique occidentale, qui doit faire face à un marché de l'acier plutôt calme, le schéma des mini-usines déjà répandu continuera de se développer en 2006 et 2007. Toutefois pour assurer leur compétitivité sur le plan mondial, les mini-usines devront innover et évoluer vers plus de qualité et de productivité.

I-4- Différentes technologies pour la production de l'acier

L'acier est un alliage de fer et de carbone (ce dernier à l'état de carbure de fer). La teneur en carbone variant de 0,1 à 2 % (ce qui fait varier complètement les caractéristiques), on devrait en fait parler d'aciers (au pluriel). Historiquement, sa fabrication fut longtemps un « secret » d'alchimiste, voire un secret d'Etat. L'acier possède un ensemble de propriétés mécaniques remarquables, une forte résistance à la traction et aux chocs, une bonne élasticité, une excellente dureté, qui lui assurent des emplois de plus en plus nombreux. Au cours du XX^{em} siècle, l'acier est devenu le produit phare de la grande industrie. Avant le XIII^{em} siècle, l'acier est produit artisanalement, presque par hasard, par écrouissage, à la forge, sous certaines conditions de pression et de température.

Le fer des épées est plus généralement durci par la trempe (eau ou huile) ou plongé dans des copeaux de corne. Dans le procédé des forges catalanes, le minerai de fer réduit par l'action du charbon de bois donne de la fonte, du fer et de l'acier, mais il est impossible d'isoler ces produits qui sont mélangés. L'acier est présent dans la partie la plus chaude de l'appareil, là où arrive l'air. L'acier ne se trouve pas tel quel dans la nature, il est réalisé à partir de minerai de fer que l'on trouve, lui, à l'état naturel dans le sol. Le processus de fabrication s'effectue en trois grandes étapes [4]:

1-4-1- Le passage des matières premières à l'acier liquide.

Il y a deux façons de fabriquer de l'acier liquide :

I-4-1-1- Par la filière fonte

Le minerai de fer est préparé, broyé et calibré en morceaux qui s'agglomèrent (ou s'agglutinent) entre eux. Le minerai obtenu est concassé puis chargé dans un haut fourneau avec du coke « charbon cuit à une température de 1200 °C » qui sert de combustible. L'air chaud (1200 °C) insufflé à la base du haut fourneau provoque la combustion du coke. Par réaction chimique, les matières sont complètement modifiées.

En effet, en brûlant, le coke apporte la chaleur nécessaire à la fusion du minerai et se transforme lui-même en oxyde de carbone. Cet oxyde de carbone va réduire les oxydes de fer, c'est à dire leur prendre leur oxygène et de ce fait, libérer le fer du minerai.

Ainsi, à la sortie du haut fourneau, le fer est récupéré sous la forme d'un liquide, la fonte (le métal en fusion) sortant à une température de 1400° C. On récupère également du laitier, un produit secondaire utilisé notamment pour la construction des routes. La fonte est acheminée vers l'aciérie dans des wagons.

Thermos qui maintiennent sa température. Elle est introduite dans un convertisseur à oxygène pour être transformée en acier. Il s'agit d'une énorme cuve où la fonte est mélangée avec de l'acier usagé (ferrailles). En insufflant de l'oxygène pur, les éléments indésirables (carbone et résidus) contenus dans la fonte sont brûlés. On obtient alors du fer presque pur et liquide dit « acier sauvage » car à ce stade, il est encore imparfait.

NB :

- *Le fer est l'un des métaux les plus abondants sur la planète.*
- *Avec 1 tonne de minerai de fer, on produit aujourd'hui 600 kg de fonte.*
- *Les hauts fourneaux fonctionnent 24/24h et 7/7j. Selon leurs tailles, ils peuvent produire de 2 000 à 10 000 tonnes de fonte par jour !*

I-4-1-2- Par la filière électrique

On peut également produire de l'acier liquide à partir de ferrailles usagées provenant des emballages jetés, des bâtiments démolis, des machines et véhicules démontés, des chutes de fonte ou d'acier récupérées dans la sidérurgie. Un "panier à ferrailles", chargé à l'aide d'un aimant, achemine cette matière première jusqu'à un four. La ferraille fond grâce à des arcs électriques puissants. On obtient alors de l'acier liquide. Il peut avoir différentes caractéristiques en termes de résistance, d'élasticité, de malléabilité. Il peut aussi être inoxydable ou insensible aux températures extrêmes [5].

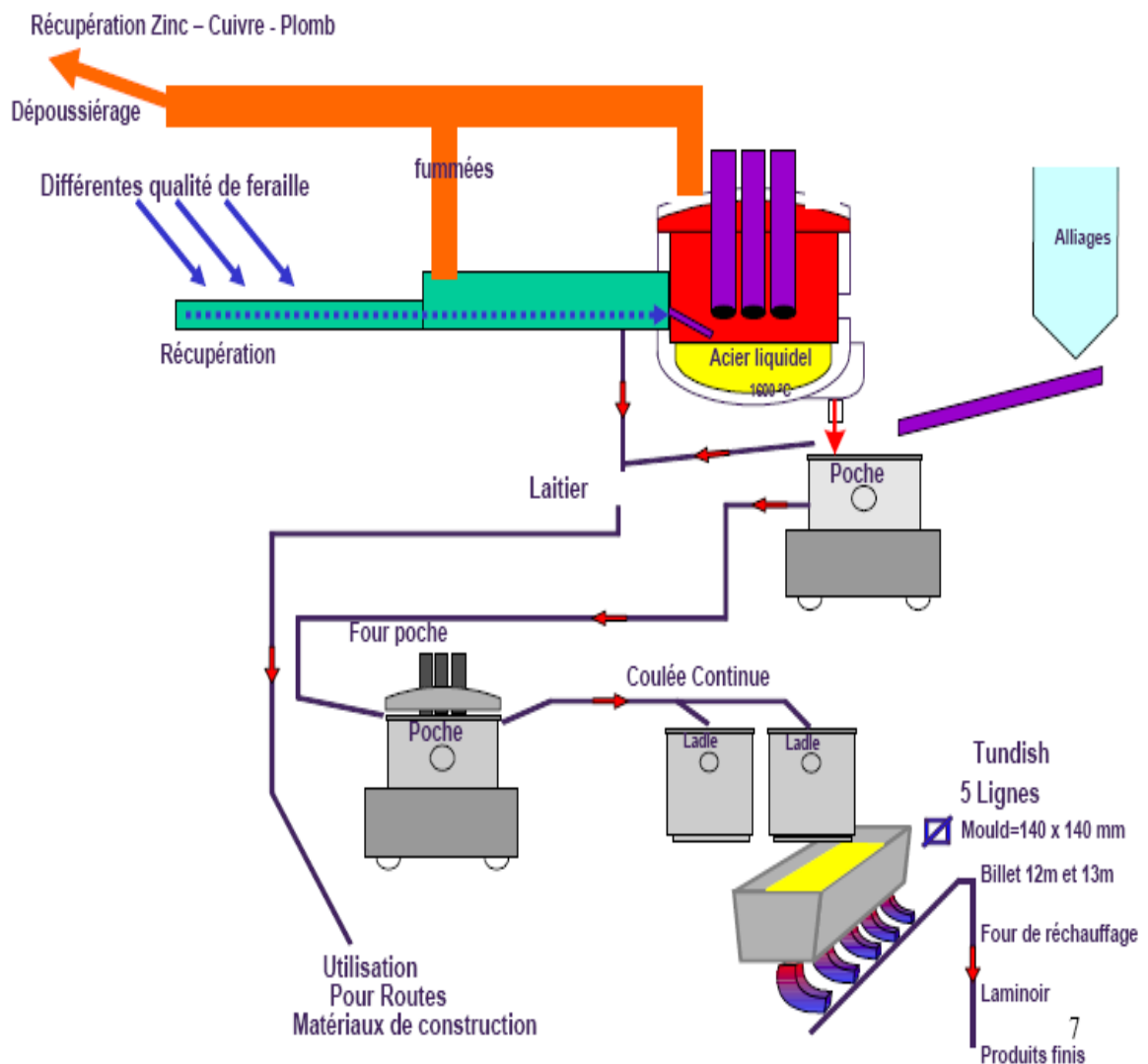


Figure I-1 L'acier par la filière électrique [6]

I-4-2- Le passage de l'acier liquide aux demi-produits

L'acier liquide est solidifié par moulage dans une machine de coulée continue. L'acier en fusion s'écoule dans un moule sans fond. En traversant ce moule, il commence à se solidifier au contact des parois refroidies à l'eau.

Le métal moulé descend. Arrivé à la sortie, il est solidifié à coeur. Il est alors coupé à la longueur voulue.

On obtient ainsi des demi-produits : des barres solides, rectangulaires ou carrées, de 25cm d'épaisseur environ, découpées en tronçons de 10 à 40 tonnes, et appelées brames ou billettes.

I-4-3- Le passage des demi-produits aux produits finis

Ces brames d'acier ne sont pas encore exploitables en l'état. Il faut les retravailler pour obtenir les nuances et les épaisseurs nécessaires à la fabrication des produits finals (appareils électroménagers, bâtiments, emballages...).

Trois étapes sont alors nécessaires

I-4-3-1- Le laminage à chaud

La brame est réchauffée dans un four à 1200 °C pour rendre le métal plus malléable. Elle est ensuite amincie et étirée par écrasements progressifs entre les cylindres d'une machine appelée « laminoir ». La bande d'acier se transforme en bobines ou en plaques de 1,2 à 20 millimètres d'épaisseur. L'acier obtenu a alors une épaisseur 180 fois plus fine que celle de la brame de départ.

I-4-3-2- Le laminage à froid

Les bobines subissent une deuxième réduction à froid afin d'obtenir un produit aussi fin qu'une feuille de papier (jusqu'à 0,1 millimètre d'épaisseur).

I-4-3-3- Le revêtement

Les bobines sont ensuite recouvertes d'un revêtement anti-corrosion qui peut être en zinc (automobile, électroménager...) ou en étain (fer blanc pour les boîtes de conserve, canettes, aérosols...) [5,7].

NB :

- *L'acier fabriqué aujourd'hui est de meilleure qualité et sa production est mieux maîtrisée.*
- *On fabrique une tonne d'acier brut en 3,7 heures, contre 9,8 heures il y a 15 ans*

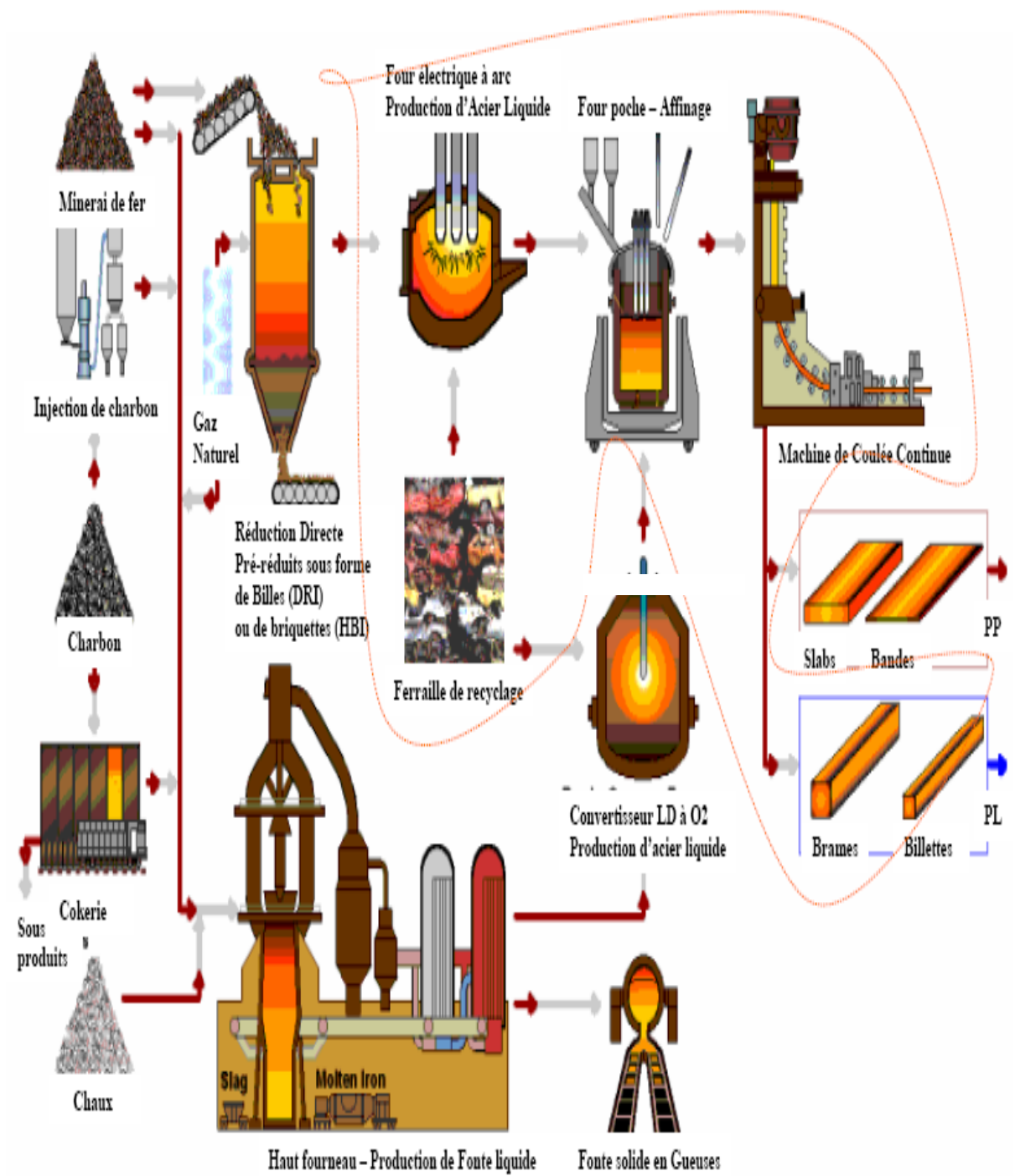


Figure I-2 L'acier par la filière

I-5- Définition et principe de fonctionnement

I-5-1- Définition

Le four à arc est un système électrothermique utilisant l'énergie fournie par un arc électrique pour chauffer une charge. Le four à arc d'aciérie est un outil de fusion destiné à fondre un métal primaire qui est, en général, de la ferraille, mais qui peut être de la fonte (solide ou liquide) ou encore des minerais pré-réduits.

En effet, la capacité des fours modernes avoisine les 200 tonnes avec une consommation énergétique comprise entre 400 et 500 kWh/t. Les grands fours industriels représentent une part importante de la consommation d'énergie électrique dans le domaine industriel. Selon certaines études prospectives, la filière électrique devrait continuer à croître pour couvrir, environ 50 % de la production d'acier dans le monde. [8]

I-5-2- Principe de fonctionnement

Dans une enveloppe réfractaire (non fermée pour en évacuer les vapeurs), une forte tension électrique est appliquée entre des électrodes (graphite-carbone) et le métal à faire fondre. Cette tension fait jaillir un arc électrique. Les câbles électriques, l'enveloppe, le toit (ou la coupole) et certains éléments sont refroidis à l'eau ou un autre fluide caloporteur.

La température engendrée par l'arc dépasse 1800°C et peut atteindre les 3600°C. Une zone plus froide persiste entre les électrodes, problème qui est généralement résolu par des brûleurs gaz + oxygène ou un brassage électro-magnétique du métal en fusion.

Pour une tension donnée, le seul moyen efficace de faire varier la puissance de l'arc est donc d'agir sur sa longueur. Du point de vue électrique, ce four peut être représenté par le schéma de la figure I-3. [8]

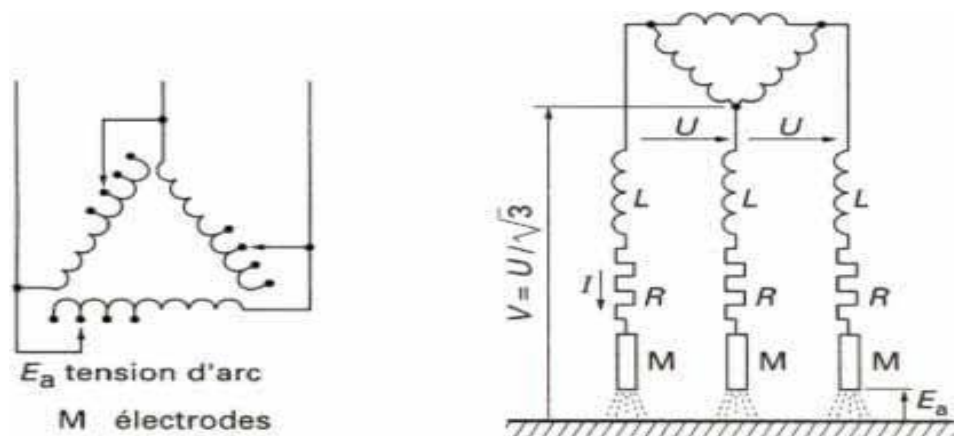


Figure I-3 Schéma de principe du four à arc

I-6- Arc électrique

L'arc électrique est la manifestation du passage du courant entre deux électrodes dans un milieu ionisé (air ou gaz particulier), il est caractérisé par une tension basse et un fort courant. Un arc électrique peut être obtenu entre deux électrodes de charbons soumises à une différence de potentiel convenable. Lorsque l'arc jaillit entre les électrodes, la différence de potentiel entre celle-ci devient faible : L'ionisation intense de l'espace inter-électrodes a rendu cet espace brutalement très conducteur alors qu'il était isolant (ou presque) avant l'amorçage.[9]



Figure I-4 Arc électrique

I-6-1- Naissance de l'arc

La naissance de l'arc peut se faire par deux méthodes :

- Par la séparation des conducteurs d'un circuit fermé sous tension ce qui provoque l'apparition d'un arc électrique.
- Par l'augmentation progressive de la tension appliquée à une fente gazeuse, un arc électrique jaillit brusquement dans cet intervalle.

I-6-2- Conditions d'établissement

L'arc électrique est établi en courant continu par :

- 1- incandescence de la cathode ;
- 2- tension cathode – anode suffisante.

Et en courant alternatif par :

- 1- incandescence de deux électrodes ;
- 2- différence de potentiel entre les électrodes plus élevée que pour le maintien de l'arc au moment du réallumage de l'arc. [10]

I-6-3- Origine de la température d'arc

En raison des collisions internes dans la colonne gazeuse, les températures d'arc peuvent atteindre 6000 °C. Cette valeur ne constitue en fait qu'une moyenne et la température peut s'élever jusqu'à 15000 °C environ dans la zone centrale de la colonne d'arc.

I-7- Composition du four à arc

Le four à arc est constitué essentiellement d'une cuve garnie de matériaux réfractaires, basculante pour la coulée et le décrassage, et destinée à recevoir la charge métallique qui est fondue au moyen d'un ou plusieurs arcs électriques jaillissant entre les électrodes en graphite et la charge.

A l'origine, le four à arc était utilisé essentiellement pour la production des aciers spéciaux, car il permet non seulement d'atteindre des températures élevées (supérieur à 1650°C), mais aussi de réaliser un affinage sur mesure en assurant au choix une atmosphère oxydante et/ou réductrice.

Les principaux éléments constitutifs du four électrique peuvent classées en deux parties :

I-7-1- Partie mécanique

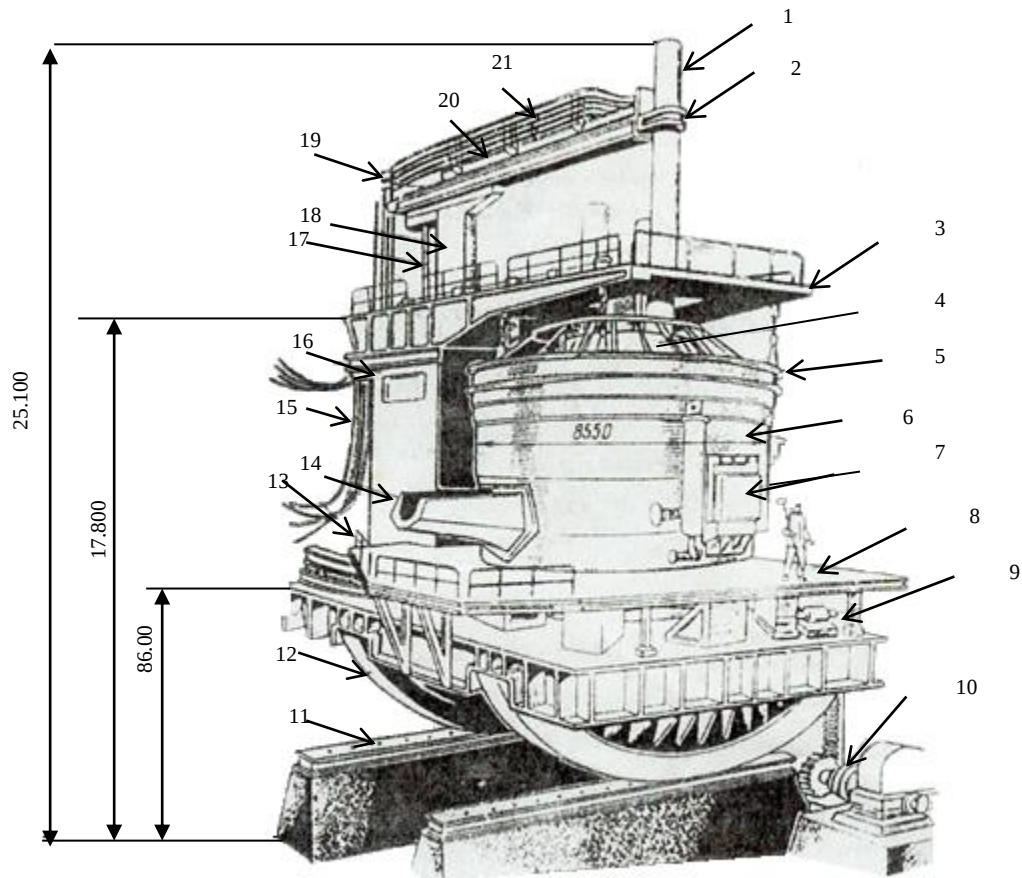
La partie mécanique d'un four à arc électrique comprend figure I-5:

- Une cuve formée d'une virole d'acier garnie de matériaux réfractaires [11] exigeant un entretien après chaque coulée et des remplacements périodiques. La tenue de ce garnissage limite le temps effectif opérationnel du four donc sa productivité.
- Une voûte couvrant la cuve comporte un paroi en briques réfractaires. Une circulation d'eau améliore la tenue de la voûte.
- Un système porte- électrodes. Les électrodes sont serrées dans des pinces qui servent aussi à leurs apporter le courant.
- Des électrodes de faible résistivité et d'une élasticité et résistance mécanique élevées.

Le four à arcs doit basculer :

- En avant pour la coulée d'un angle de 30 à 45°.
- En arrière pour le décrassage de 7.5 à 15°.

Il est important de limiter le plus possible l'angle de basculement en avant. En effet, quelques degrés de plus présentent une augmentation de longueur des câbles non négligeable, donc une réactance supplémentaire.



- | | |
|--|---|
| 1- Electrode | 9 - Mécanisme de rotation du four |
| 2- Pince d'électrode | 10- Mécanisme d'inclinaison |
| 3- Portique | 11- Appui |
| 4- Voûte | 12- Secteur support |
| 5- Bague de voûte | 13- Equipage de balancement de voûte et du pont |
| 6- Cuve de four | 14- Bec de coulée |
| 7- Porte additionnelle | 15- Câbles souples |
| 8- Etage de travail | 16- Arbre à contre poids |
| 17- Engrenage à crémaillère pour le mouvement vertical de la colonne-machine-pince | |
| 18- Appui en L | |
| 19- Console de contact | |
| 20- Manche des pinces d'électrodes | |
| 21- Conducteur de courant en cuivre à refroidissement par circulation d'eau. | |

Figure I-5 Four à arcs (type DSP-200)

I-7-2- Partie électrique

La partie électrique comprend essentiellement :

L'appareillage haut tension avec les éléments suivants figure I-6:

1. Sectionneur
2. Coupe circuit
3. Transformateur de potentiel
4. Disjoncteur de four commandé à distance
5. Transformateur d'intensité haute tension
6. Bobine de réactance
7. Interrupteur de réactance commandé à distance
8. Transformateur du four
9. Transformateur d'intensité
10. Le four

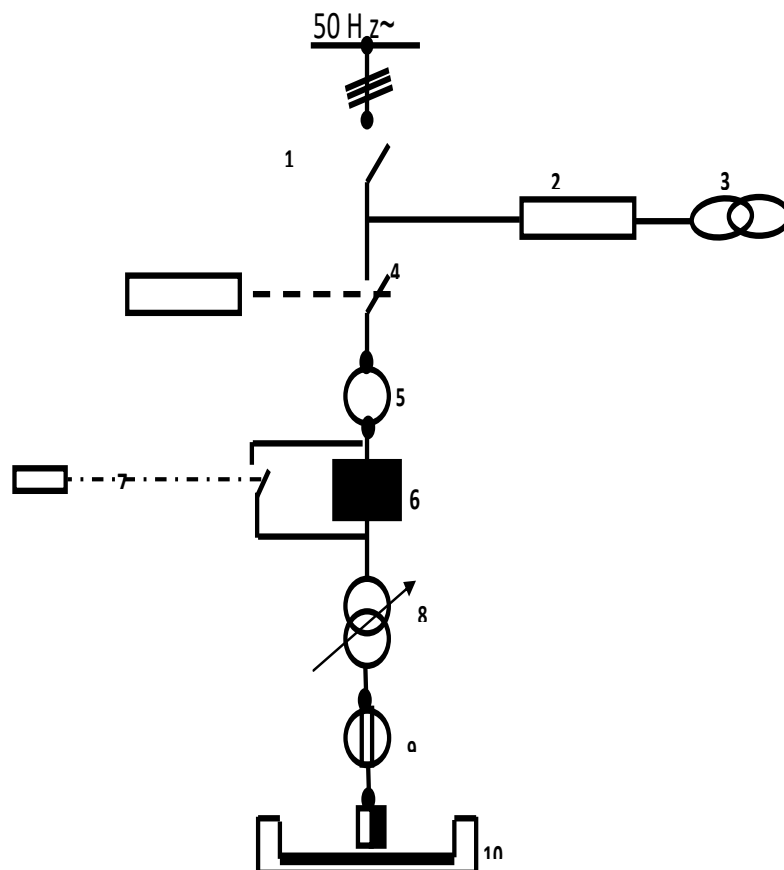


Figure I-6 Schéma électrique unifilaire du four

I-8- Conditions de fonctionnement d'un four à arc

Le processus d'élaboration d'acier au EAF a un caractère cyclique et se déroule selon les étapes suivantes [12]:

I-8-1- Amorçage

Le EAF est chargé jusqu'à la voûte, l'amorçage des arcs sur la ferraille se fait avec le forage de trois puits par la descente progressive des électrodes actionnées par régulation automatique. Cette période est la plus délicate du fait des éboulements brutaux de la ferraille risquant de casser les électrodes. C'est aussi une période de courts-circuits. Pour permettre une pénétration rapide des électrodes dans la ferraille, des arcs courts mais puissants sont utilisés.

I-8-2- Au début et en cours de fusion

Les puits percés, les murs protégés, les arcs s'amorcent sur une phase liquide dont le poids augmente progressivement, sont de plus en plus stables. La ferraille entourant encore les extrémités des électrodes forme un écran de protection des réfractaires. Ceci permet donc l'application d'une puissance élevée.

I-8-3- Achèvement de la fusion

Vers la fin de fusion, la ferraille éboulée en presque totalité laisse les réfractaires exposés aux projections des arcs et aux rayonnements directs. Des arcs de longueur et puissance réduites sont préférés.

Si la cuve n'a pas été chargée complètement, la limitation du surchauffage du garnissage impose la disjonction et le rechargement de nouveau panier.

I-8-4- Affinage

Cette phase consiste à surchauffer le bain, à éliminer les scories et à régler la composition du métal. Les besoins thermiques correspondants étant faibles par rapport à ceux de l'étape de fusion, on recherchera des réglages susceptibles de chauffer rapidement le métal sans endommagement les murs et de la voûte. Des tensions basses et des arcs courts sont utilisés

I-9- Principe de la régulation

L'étude théorique montre que le courant dans l'arc est uniquement fonction de la valeur efficace de la tension d'alimentation (tension secondaire du transformateur) et de la distance entre les électrodes. En agissant sur la tension délivrée par la source, on peut donc obtenir un même courant dans l'arc avec un arc plus ou moins long. Comment doit-on donc choisir la longueur de l'arc et la tension de la source ? En se guidant sur les principes suivants :

1. Quant rapproche les électrodes, la puissance dans l'arc augmente tant que le facteur de puissance du circuit secondaire d'alimentation reste supérieur à 0,8 environ.
2. Un arc long est économiquement (meilleur rendement) mais instable.

En conclusion, pour chaque allure de chauffe, le choix de la longueur d'arc est le résultat d'un compromis entre les conditions contradictoires de bonne stabilité et de bon rendement. Ce la conduit à l'utilisation d'une bobine de réactance d'induction ($L.\omega$) d'autant plus grande que la tension est plus élevée.

Pratiquement, le réglage du débit de chaleur se fait de manière approchée en choisissant la tension secondaire convenant pour toute une gamme de courants. Il est ensuite amélioré par le jeu du régulateur, dont le rôle est de manière le courant à la valeur optimale, en agissant sur l'écartement des électrodes.

Le transformateur qui alimente le four comporte un enroulement primaire (traversé par le courant le plus faible) avec commutateur de prise en charge ; il permet d'obtenir toute une gamme de tension secondaires. Quand à l'inductance, celle du transformateur lui-même est pratiquement suffisante pour les tensions les plus basses (couplage étoile au primaire du transformateur). Pour les grandes tensions, on introduit une inductance en série dans le circuit haute tension du transformateur. On utilise des régulateurs électriques ou hydrauliques pour commander le moteur d'électrodes. Très souvent, la régulation est dite différentielle, c'est à dire que le couple moteur du régulateur dépend de la différence entre un couple proportionnel au courant. A cette régulation, on peut associer l'équation suivant [13] :

$$U_{eff} - A.I_{eff} = 0 \quad (I.1)$$

Ou bien $\frac{U_{eff}}{I_{eff}} = A$ (A : Etant constante) ; C'est à dire à impédance constante, donc

on a les cas suivants :

- Si cette équation est satisfaite, l'électrode reste **immobile**.
- Si l'on a : $U_{eff} - A.I_{eff} > 0$, l'électrode **descend** et l'intensité efficace I_{eff} croisse.
- Si l'on a : $U_{eff} - A.I_{eff} < 0$, l'électrode **remonte** et l'intensité efficace I_{eff} diminue.

La régulation peut être manuelle, mais le plus souvent automatique. Ainsi pendant la fusion, les électrodes sont en continuel mouvement pour compenser les mouvements de la charge tendant à créer des dissymétries.

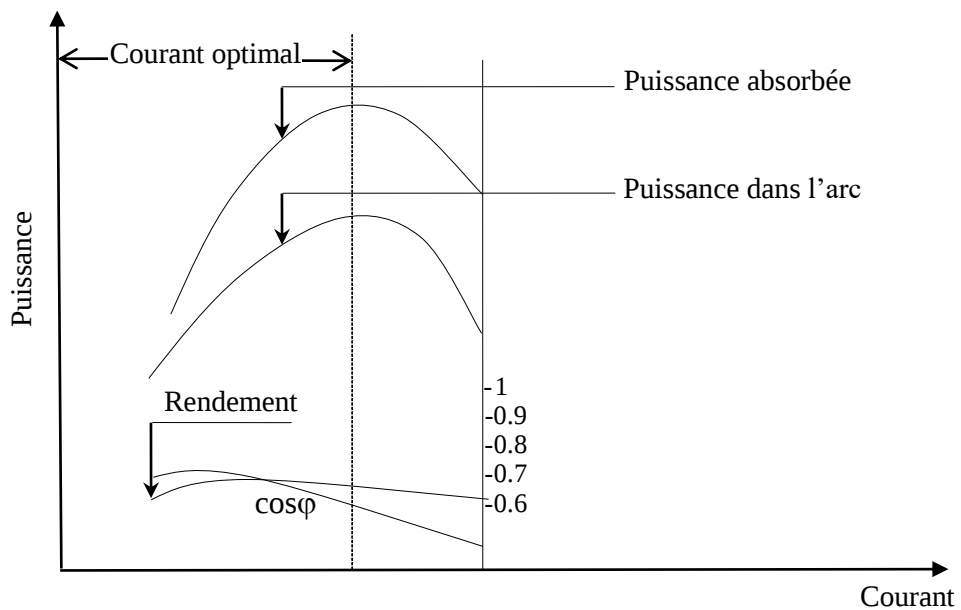


Figure I-7 Puissance absorbée par le four

I-10- Classification des fours à arc

I-10-1- Four à arc d'après leur nature d'arc

I-10-1-1- Four à arc libre

Dans le four à arc libre, ou à arc indirecte, l'arc est maintenu entre les électrodes disposées horizontalement sur la charge (dans lesquels la chaleur est produite par le passage de l'arc directement entre les électrodes). Il est généralement utilisé pour la fusion de la fonte ou l'acier.

I-10-1-2- Four à arc sur résistance

Le four à arc sur résistance, ou à arc submergé est utilisé à la fabrication des ferroalliage, ou à la réduction de certains minerais. Dans ce genre de four les électrodes sont plongées dans la charge.

I-10-1-3- Four à arc sur charge

Dans ce four l'arc est maintenu entre les électrodes et la charge. Ce type de four est presque exclusivement utilisé à la fabrication de l'acier à partir de la ferraille ou autres charges métalliques.

L'alimentation de ces types des fours peut être continue ou alternative, monophasé, biphasé ou triphasés. Généralement les fours de grande puissance sont triphasés.

I-10-2- Four à arc d'après leur nature d'alimentation**I-10-2-1- Four alimenté en courant alternatif**

Le four électrique de fusion type Héroult est triphasé. Il est constitué essentiellement d'une cuve garnie de réfractaires, basculante pour la coulée et le dégraissage, et destinée à recevoir la charge métallique qui est fondue au moyen de trois électrodes verticales en graphite.

I-10-2-2- Four alimenté en courant continu

Du point de vue descriptif, le four à courant continu est semblable au four à courant alternatif. Il s'en distingue toutefois par son alimentation électrique et par présence d'une ou de plusieurs électrodes de sole.

Autrefois, les fours à courant continu de grande puissance étaient équipés d'un système de trois électrodes alimentées chacune par un redresseur spécifique. Aujourd'hui, le système mono-électrode, alimenté par un ou plusieurs redresseurs en parallèle ou en série, équipe la grande majorité des fours à courant continu [14].

I-11- Avantages et inconvénients du four à arc**I-11-1- Avantages**

Le four à arc présente un certain nombre de qualités que n'ont pas les autres procédés :

- Souplesse et précision du réglage de la température.
- Choix et constance de l'atmosphère dans le four.
- Facilité dans la conduite et l'exploitation.
- Facilité d'automatisation.
- Minimum d'effluents gazeux.
- Possibilité de travailler avec des parois froides.
- Températures élevées.
- Souplesse de conduite.
- Maîtrise indépendante de l'intensité et de la tension.
- Possibilité de travailler avec une voûte froide (arc submergé).
- Taille modulable.
- Grande rapidité de fusion.

Utilisé à l'origine comme accessoires destiné à produire une matière première de lux, le four à arc est maintenant devenu un important outil de production lourde.

Dont on ne cesse d'augmenter la capacité et la puissance nominale pour on améliore la productivité. Cette évolution résulte non seulement de l'amélioration des données économiques liées aux progrès techniques mais aussi de la facilité d'adaptation aux fluctuations du marché ou à l'évolution d'un site sidérurgie [15].

I-11-2- Inconvénients

- Consommation d'électrodes.
- Vaporisation en surface (arc rayonnant).
- Erosion des réfractaires.
- Initier la fusion lorsque le bain n'est pas conducteur à froid.
- Influence de la résistivité du bain (arc submergé).

I-12- Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons commencé par des généralités sur les différentes méthodes utilisées pour la production de l'acier, ensuite nous avons fait aperçu général sur les fours à arcs, concernant leurs descriptions, types, rôles, avantages et inconvénients ...etc.

Dans ce contexte, l'évolution du marché de l'acier en mode et plus particulièrement le rapport entre sa production et sa consommation, ses exportations et importations joueront de plus en plus un rôle très important dans le marché mondial de l'acier.

L'utilisation des fours à arc est de plus en plus envisagée, dans les pays industrialisés (Etas Unis, l'Europe), par les sidérurgistes des usines intégrées, confrontés aux coûts élevés d'entretien des hauts fourneaux et aux problèmes environnementaux.

Chapitre II: Impacte du four à arc sur le réseau électrique

II-1- Introduction

Le four à arc est un équipement électrique très perturbateur à cause de l'instabilité de l'arc électrique. Les perturbations produites sont aléatoires et couvrent une bande de fréquences du continu jusqu'à quelques centaines de hertz. Il en résulte un bruit spectral, dont les composantes modulant la tension d'alimentation du réseau d'alimentation provoquent le phénomène de papillotement. Le four à arc produit du papillotement aléatoire qui ne peut pas être évalué par simple calcul [16].

Nous commencerons ce chapitre par un exposé des principaux défauts affectant la tension et le courant du réseau électrique. Nous parlerons également de leurs origines, des conséquences matérielles et des normes internationales imposées aux utilisateurs.

II-2- Dégradation de la qualité de la tension [17]

Les perturbations dégradant la qualité de la tension peuvent résulter de :

- Défauts dans le réseau électrique ou dans les installations des clients :
 - ❖ Court-circuit dans un poste, une ligne aérienne, un câble souterrain, etc.
 - ❖ Causes atmosphériques (foudre, givre, tempête...).
 - ❖ Matérielles (vieillissement d'isolants...).
 - ❖ Humaines (fausses manoeuvres, travaux de tiers...).
- Défauts dans le réseau électrique ou dans les installations des clients :
 - ❖ Court-circuit dans un poste, une ligne aérienne, un câble souterrain, etc.
 - ❖ Causes atmosphériques (foudre, givre, tempête...).
 - ❖ Matérielles (vieillissement d'isolants...).
 - ❖ Humaines (fausses manoeuvres, travaux de tiers...).
- Installations perturbatrices :
 - ❖ Fours à arc.
 - ❖ Soudeuses.
 - ❖ Variateurs de vitesse.
 - ❖ Toutes applications de l'électronique de puissance, téléviseurs, éclairage fluorescent, démarrage ou commutation d'appareils, etc....

II-3- Caractéristiques des perturbations électriques

Les perturbations électromagnétiques susceptibles d'entacher le bon fonctionnement des équipements et des procédés industriels sont en général rangées en plusieurs classes appartenant aux perturbations conduites et rayonnées :

- Perturbations à basse fréquence (< 9 kHz).
- Perturbations à haute fréquence (≥ 9 kHz).
- Décharges électrostatiques.

La mesure de la qualité de l'énergie électrique consiste habituellement à caractériser les perturbations électromagnétiques conduites à basse fréquence .

Les phénomènes observés sont nombreux ; creux de tension et coupures, surtensions temporaires ou transitoires, fluctuations lentes de la tension (flicker), variations de la fréquence, non symétrie du système triphasé, harmonique et inter-harmonique. [18]

En général, il n'est pas nécessaire de mesurer l'ensemble de ces perturbations, elles peuvent être groupées en quatre catégories

- La fréquence.
- La forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde.
- L'amplitude des trois tensions.
- La symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leur déphasage relatif.

II-3-1- Variation ou fluctuation de la fréquence

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome (voir la figure II-1). Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1\%$

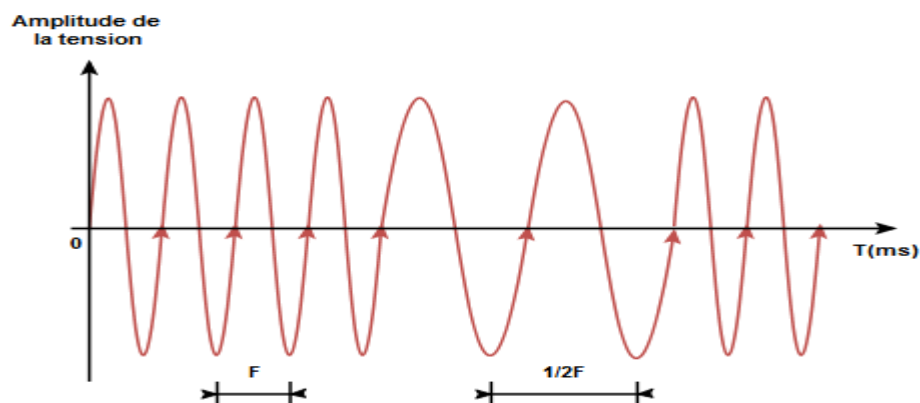


Figure II -1 Fluctuations de fréquence

II-3-2- La symétrie du système triphasé

II-3-2-1- Déséquilibre

II-3-2-1-1- Origine du non symétrie

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé [19]

Un récepteur électrique triphasé, qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau. Ceci est fréquent pour les réceptrices monophasées basses tensions. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire [18]

Le non symétrie du système triphasé de tensions est représentée sur la figure II.2

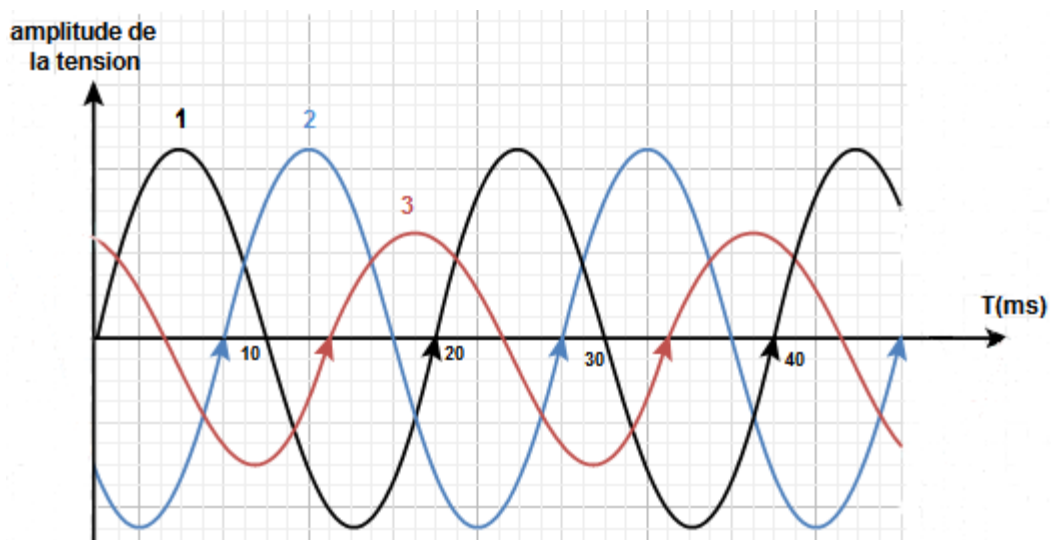


Figure II-2 Représentation du non symétrie du système triphasé de tension

II-3-2-1-2- Conséquences du non symétrie

Il est plus intéressant d'aborder le problème du non symétrie par type d'équipement.

Le non symétrie d'une installation triphasée peut entraîner un dysfonctionnement des appareils basses tensions connectés:

- Mauvais fonctionnement d'un appareil monophasé alimenté par une tension très faible (lampe à incandescence qui fournit un mauvais éclairage),

- Destruction d'un appareil monophasé alimenté par une tension trop élevée, il peut être détruit (claquage d'un filament de lampe par surtension).

Concernant les dispositifs triphasés d'électronique de puissance, principalement les ponts redresseurs, le fonctionnement en présence de la non symétrie entraîne l'apparition de composantes harmoniques non caractéristiques, notamment des harmoniques de rang multiple de 3. L'apparition de ces courants harmoniques peut poser des problèmes, comme la génération d'une anti-résonance lors du filtrage de l'harmonique de rang 5. Outre les effets classiques des harmoniques, ces fréquences non caractéristiques peuvent conduire, dans certains cas, au blocage de la commande [20]

La conséquence des composantes inverses sur les machines tournantes est la création d'un champ tournant en sens inverse du sens de rotation normal, d'où un couple de freinage parasite et des pertes supplémentaires qui provoquent l'échauffement de la machine.

Concernant l'effet du déséquilibre homopolaire, il faut signaler le risque d'échauffement du conducteur neutre dans un réseau BT qui, lorsque le conducteur est d'un diamètre trop faible, peut provoquer une rupture du conducteur ou un incendie.

Les défauts monophasés ou biphasés provoquent des déséquilibres jusqu'au fonctionnement des protections. La non symétrie en tension est caractérisée par son degré qui est défini en utilisant la méthode des composantes de Fortescue par le rapport des amplitudes des tensions inverse (V_i) et directe (V_d).

$$k_2 \% = \frac{V_i}{V_d} \times 100 \quad (\text{II.1})$$

K_2 : Coefficient de non symétrie

La compagnie d'électricité (Sonelgaz) s'engage à fournir, aux clients raccordés aux réseaux HT et BT, une tension dont le taux moyen de la non symétrie ne dépasse pas 7%.

Cependant la compagnie d'électricité (Sonelgaz) demandera aux clients qui ne sont pas couverts par ces champs de ne pas provoquer un taux de déséquilibre supérieur à 5 %.

II-3-3- Amplitude

II-3-3-1- Creux de tension et coupures

Un creux de tension est une baisse brutale de la tension en un point d'un réseau d'énergie électrique, à une valeur comprise entre 90 % et 10 % d'une tension de

référence (U_{ref}) suivie d'un rétablissement de la tension après un court laps de temps compris entre la demi-période fondamentale du réseau (10 ms à 50 Hz) et une minute.

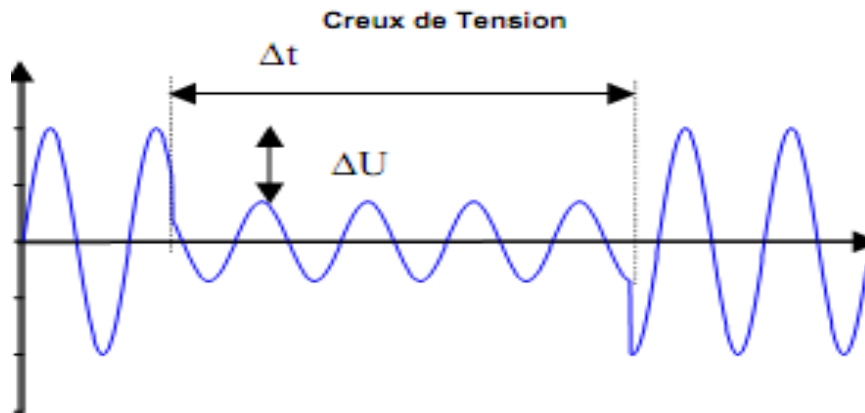


Figure II -3 Creux de tension

La tension de référence est généralement la tension nominale pour les réseaux BT et la tension déclarée pour les réseaux MT et HT.

Les paramètres caractéristiques d'un creux de tension sont la profondeur ΔU (ou son amplitude U) et la durée ΔT , définie comme le laps de temps pendant lequel la tension est inférieure à 90%.

Dans le cas d'un système triphasé, les caractéristiques ΔU et ΔT sont en général différentes sur les trois phases. C'est la raison pour laquelle un creux de tension doit être détecté et caractérisé séparément sur chacune des phases.

Les coupures représentent un cas particulier des creux de tension de profondeur supérieure à 90% ; elles sont caractérisées par un seul paramètre: la durée ; pour ce sa on distingue deux types de coupure :

- Les coupures longues (> 3 min) : problème de continuité (ou de fiabilité) de la tension : problème de continuité (ou de fiabilité) de la tension,
- les coupures brèves (< 3 min) : problème de qualité de la tension, rangé dans la même catégorie que les creux de tension

II-3-3-1-1- Origine des Creux de tension et coupures

- Les creux de tension et les coupures brèves sont principalement causés par des phénomènes conduisant à des courants élevés qui provoquent à travers les impédances des éléments du réseau une chute de tension d'amplitude d'autant plus faible que le point d'observation est électriquement éloigné de la source de la perturbation.

- Les coupures brèves sont souvent le résultat du fonctionnement des automatismes de réseau tels que les réenclencheurs rapides et/ou lents, les permutations de transformateurs ou de lignes. Les utilisateurs subissent une succession de creux de tension et/ou de coupures brèves lors de défauts à arc intermittents, de cycles de déclenchement-réenclenchement automatiques (sur réseau aérien ou mixte radial) permettant l'élimination des défauts fugitifs ou encore en cas de renvois de tension permettant la localisation du défaut.
- Les coupures longues sont le résultat de l'isolement définitif d'un défaut permanent par les dispositifs de protection ou de l'ouverture volontaire ou intempestive d'un appareil.
- La commutation de charges de puissance importante (moteurs asynchrones, fours à arc, machines à souder, chaudières...) par rapport à la puissance de court-circuit.
- Le nombre de creux de tension et de coupures est plus élevé dans les réseaux aériens soumis aux intempéries que dans les réseaux souterrains. Mais un départ souterrain issu du même jeu de barres que des départs aériens ou mixtes subira aussi des creux de tension dus aux défauts affectant les lignes aériennes.
- Ceux provenant du fonctionnement d'appareils à charge fluctuante ou de la mise en service d'appareils appelant un courant élevé au démarrage (moteurs, transformateurs...etc.),
- Ceux liés aux phénomènes aléatoires, comme la foudre ou tous les courts-circuits accidentels sur les réseaux de distribution, ou les réseaux internes des clients (défaut d'isolation, blessure de câble, projection de branches sur les lignes aériennes)

II-3-3-1-2- Conséquences des creux de tension et coupure

Les conséquences des creux de tension sont susceptibles de perturber le fonctionnement de certaines installations industrielles et tertiaires. En effet, ce type de perturbation peut causer des dégradations de fonctionnement des équipements électriques qui peuvent aller jusqu'à la destruction totale de ces équipements. Le Tableau. II-1 résume les conséquences néfastes causées par les creux de tension sur quelques matériels industriels et tertiaires sensibles.

TYPES D'APPAREIL	CONSEQUENCES NEFASTES
Eclairage	Moins de luminosité, extinction et ré allumage (lampes à arc)
Systèmes à base d'électronique de puissance	Arrêt du dispositif
Dispositifs de protection	Ouverture des contacteurs
Moteurs asynchrones	Ralentissements, décrochage, surintensité au retour de la tension
Moteurs synchrones	Perte de synchronisme, décrochage et arrêt du moteur
Variateurs de vitesse pour un moteur à courant continu	En mode onduleur : destruction des protections En mode redresseur : ralentissement de la machine
Variateurs de vitesse pour un moteur asynchrone	Ralentissement, décrochage, surintensité au retour de la tension, destruction éventuelle de matériel au niveau du convertisseur

Tableau II-1 les conséquences néfastes causées par les creux de tension

II-3-3-2- Fluctuations de tension – Flicker

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension. Ce sont des variations brutales de la valeur efficace ou de la valeur crête d'amplitude de la tension situées dans une bande de $\pm 10\%$ et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes d'une tension dont les caractéristiques sont la fréquence de la variation et l'amplitude comme illustré sur la (Figure II-4)

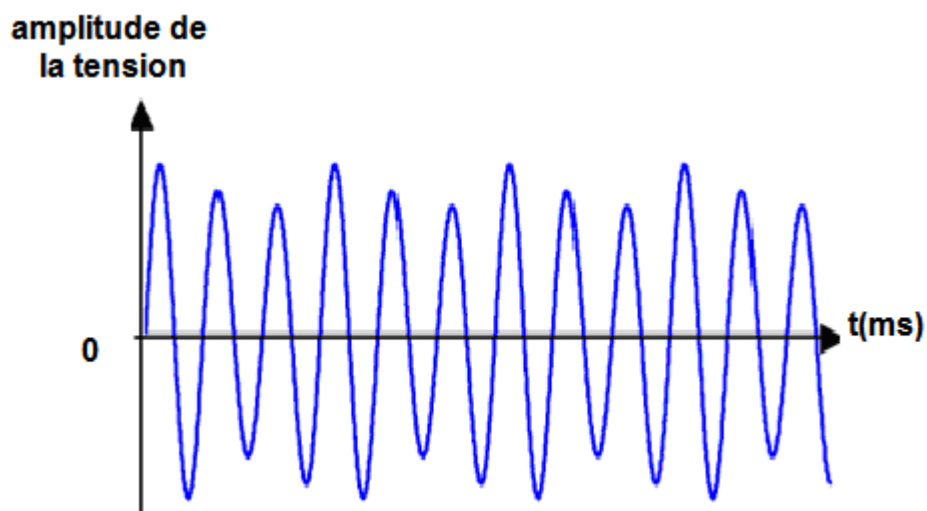


Figure II-4 Fluctuation de tension

II-3-3-2-1- Origine des fluctuations de tension

- L'origine principale de ces courants est le fonctionnement d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide, comme les fours à arc et des machines à souder.
- Les variations lentes de tension sont causées par la variation lente des charges connectées au réseau ;
- Les fluctuations de tension sont principalement dues à des charges industrielles rapidement variables comme les machines à souder, les fours à arc, les laminoirs.

II-3-3-2-2- Conséquences des fluctuations de tension

Comme les fluctuations ont une amplitude qui n'excède pas $\pm 10\%$, la plupart des appareils ne sont pas perturbés. Le principal effet des fluctuations de tension est la fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou flicker). La gêne physiologique (fatigue visuelle et nerveuse) dépend de l'amplitude des fluctuations, de la cadence de répétition des variations, de la composition spectrale et de la durée de la perturbation. [18]

Le flicker provoque une fatigue physique et psychique pour les usagers de l'éclairage raccordé à proximité de la charge perturbatrice. Il s'agit d'un phénomène complexe car il fait intervenir les caractéristiques de l'ampoule (source de lumière), de l'œil (capteur) et du cerveau (interprète).

II-3-3-2-3- L'effet de flicker dans le four à arc

Comme nous l'avons vu, les variations de la tension d'arc, les extinctions d'arc et les courts-circuits sont à l'origine de variations de puissance active et réactive qui se traduisent par une modulation très basse fréquence de l'amplitude de la tension du réseau (entre 1 et 25 Hz environ) qui provoque un scintillement des lampes à incandescence. Ce phénomène est appelé effet de flicker

La prédétermination du niveau de flicker d'un four à arc est toujours délicate. En effet, elle dépend non seulement des caractéristiques électriques de l'alimentation, mais aussi de la nature des ferrailles, de leur préchauffage éventuel, de la conduite et de la régulation du four, de la conception mécanique du four etc. Aussi, il n'existe pas actuellement de règle précise et fiable de prédétermination du flicker pour les fours à arc. Le raccordement d'un four à arc demande donc une étude dans chaque cas particulier. Toutefois, sur la base d'un certain nombre d'expérimentations menées sur des fours en service, il a été établi une relation qui détermine le niveau de flicker au point commun de couplage (Pcc) en fonction des puissances de courts-circuits du réseau

et du four et d'un coefficient caractéristique du four étudié [12]. Cette relation est la suivante:

$$P_{ST99\%} = K_{ST} \frac{S_{ccf}}{S_{ccn}} \quad (II.2)$$

Avec :

- S_{ccf} : Puissance de court-circuit du four à arc vue du P_{cc} .
- S_{ccn} : Puissance de court-circuit du réseau vue du P_{cc} .
- K_{ST} : Coefficient caractéristique variable entre 48 et 85.

Le problème de la relation (II.2) réside dans la détermination du coefficient K_{ST} . En effet, ce coefficient est variable d'un four à l'autre, notamment en fonction des ferrailles utilisées, du préchauffage, de la conduite et de la régulation du four, enfin de tout un ensemble de caractéristiques non électriques du four.

Par conséquent, lorsque l'on souhaite estimer le niveau de flicker dans le cadre d'un projet de nouveau four à arc par exemple, on peut choisir, comme paramètre K_{ST} le même que celui d'un four similaire actuellement en service. Ce coefficient est alors obtenu par les mesures de flicker et par la connaissance des puissances de courts-circuits du réseau et du four.

Voilà les allures pratiques des puissances absorbées par un four à arc « four du complexe sidérurgique de El-Hadjar » pendant la fusion d'une coulée[12]

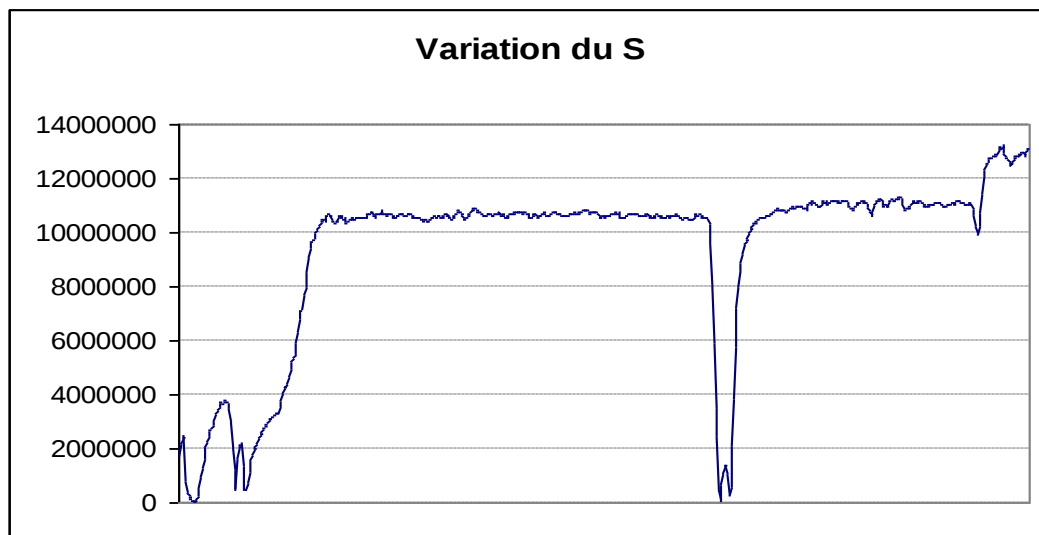


Figure II-5 Puissance apparent dans four à arc

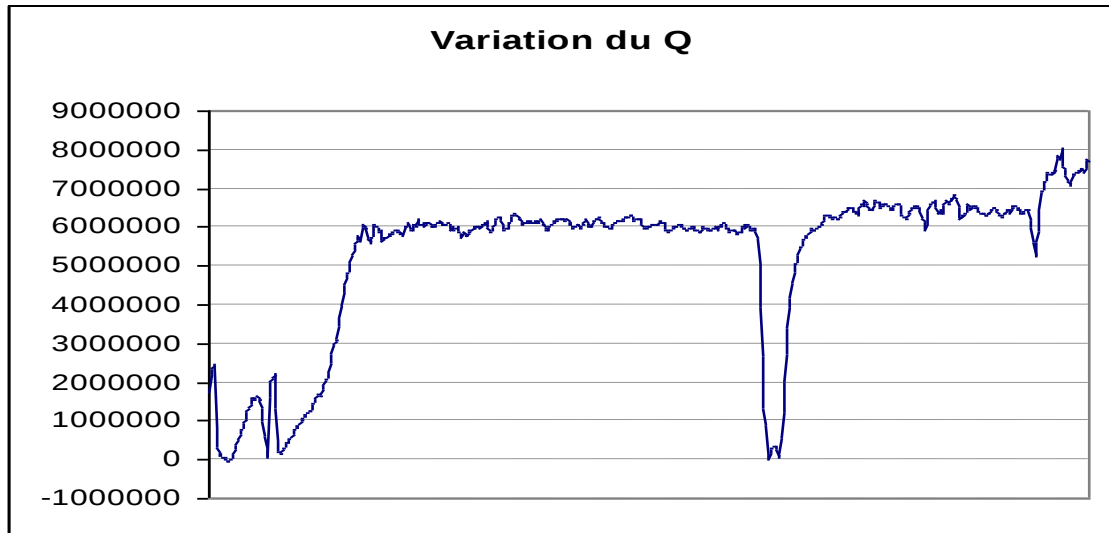


Figure II-6 Puissance réactive dans four à arc

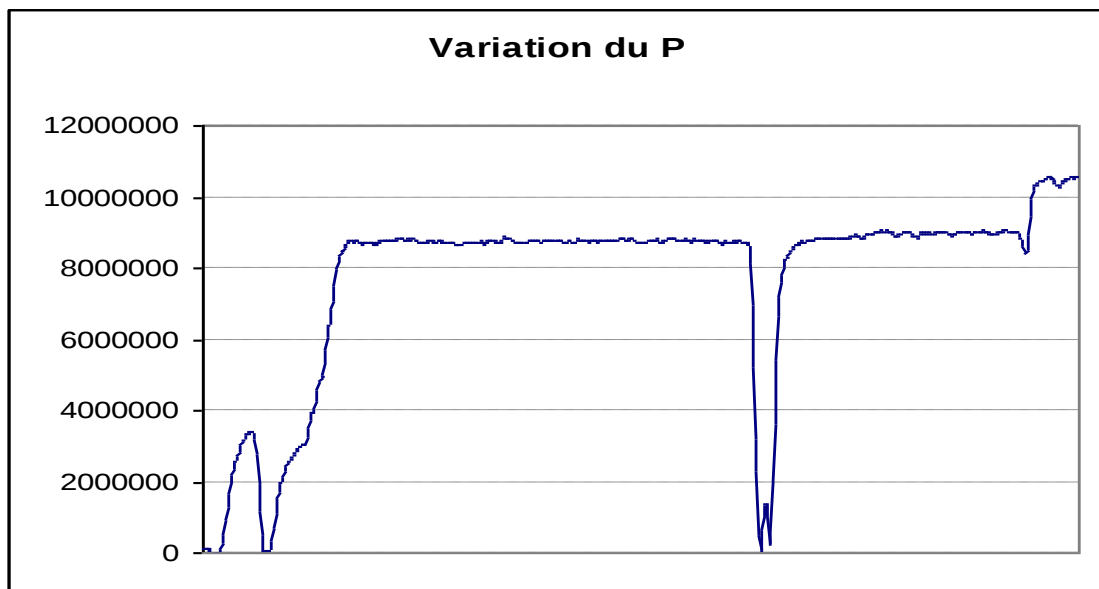


Figure II-7 Puissance active dans four à arc

II-3-4- Forme d'onde

II-3-4-1- Surtension

II-3-4-1-1- Origine des Surtension

Toute tension appliquée à un équipement dont la valeur de crête sort des limites d'un gabarit défini par une norme ou une spécification est une surtension. Les surtensions sont de trois natures :

- Temporaires à fréquence industrielle ;
- De manoeuvre ;
- D'origine atmosphérique (foudre).

Elles peuvent apparaître :

- En mode différentiel (entre conducteurs actifs ph/ph – ph/neutre) ;
- En mode commun (entre conducteurs actifs et la masse ou la terre).[18]

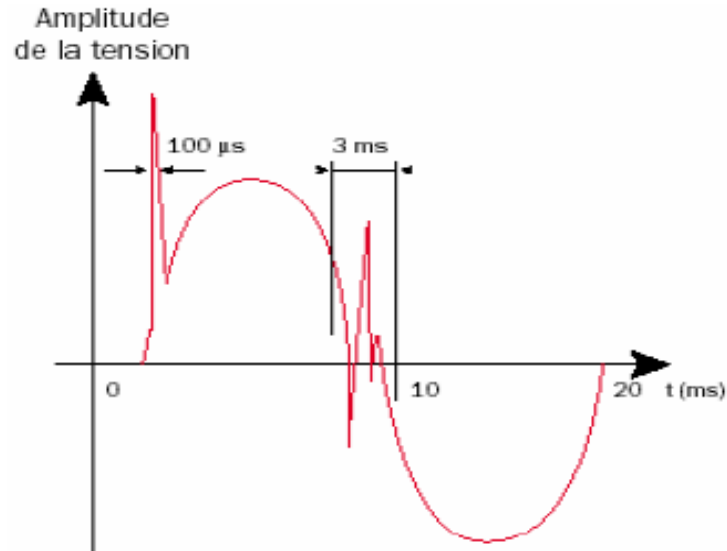


Figure II-8 Schéma surtensions transitoires

❖ Surtensions à fréquence industrielle

Par définition elles sont à la même fréquence que celle du réseau (50 Hz ou 60 Hz). Elles sont aussi causées par :

- Les défauts d'isolement ;
- Ferro résonance, Il s'agit d'un phénomène oscillatoire non linéaire rare, souvent dangereux pour le matériel, se produisant dans un circuit comportant un condensateur et une inductance saturable ;
- Rupture du conducteur de neutre ;
- Défauts du régulateur d'un alternateur ou d'un régleur en charge du transformateur ;
- Surcompensation de l'énergie réactive.

❖ Surtensions de manœuvre

Elles sont provoquées par des modifications rapides de la structure du réseau (ouverture d'appareils de protection...), On distingue particulièrement trois types:

- Surtensions de commutation en charge normale ;
- Surtensions provoquées par l'établissement et l'interruption de petits courants inductifs ;

- Surtensions provoquées par la manoeuvre de circuits capacitifs (lignes ou câbles à vide, gradins de condensateurs).

❖ Surtensions atmosphériques

La foudre est un phénomène naturel apparaissant en cas d'orage. On distingue les coups de foudre directs (sur une ligne ou sur une structure) et les effets indirects d'un coup de foudre (surtensions induites et montée en potentiel de la terre).

II-3-4-1-2- Conséquences des Surtensions

Leurs conséquences sont très diverses selon le temps d'application, la répétitivité, l'amplitude, le mode (commun ou différentiel), la raideur du front de montée et la fréquence :

- Claquage diélectrique, cause de destruction de matériel sensible (composants électroniques...) ;
- Dégradation de matériel par vieillissement (surtensions non destructives mais répétées) ;
- Coupure longue entraînée par la destruction de matériel (perte de facturation pour les distributeurs, pertes de production pour les industriels) ;
- Perturbations des circuits de contrôle commande et de communication à courant faible
- Contraintes électrodynamiques et thermiques (incendie) causées par :
 - La foudre essentiellement ;
 - Les surtensions de manoeuvre qui sont répétitives et dont la probabilité d'apparition est nettement supérieure à celle de la foudre et de durée plus longue,

II-3-4-2- Harmoniques

Les harmoniques sont une superposition sur l'onde fondamentale à 50Hz, d'ondes également sinusoïdal mais de fréquences multiples entier de celle du fondamental

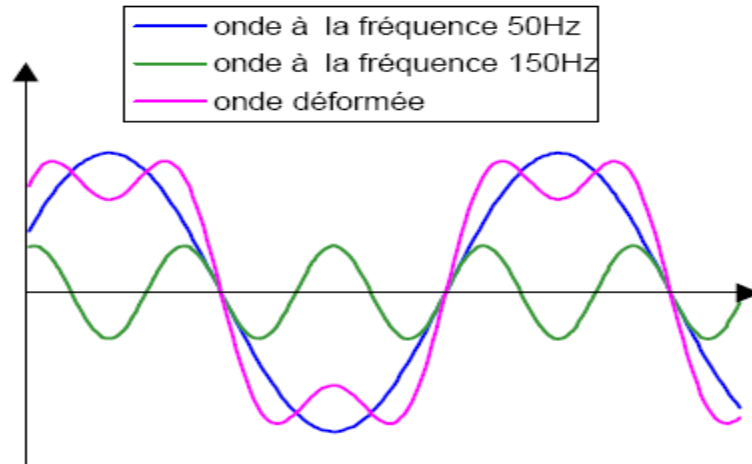


Figure II-9 Représentation de la déformation de la tension.

II-3-4-2-1- Décomposition d'un signal périodique

FOURIER a démontré, que toute fonction périodique $y(t)$ non sinusoïdale de fréquence (f) peut être représentée, selon la décomposition harmonique sous la forme d'une somme de fonction composée:

- D'un terme sinusoïdal à la fréquence (**f**) de valeur efficace (**Y_1**). Ce terme est appelé **fondamental**
- Des termes sinusoïdaux dont les fréquences sont égales à (**n**) fois la fréquence du fondamental et de valeurs efficaces (**Y_n**). Ces fréquences multiples du fondamental sont appelées **harmoniques**.
- D'une éventuelle composante continue d'amplitude (**Y_0**).
- **Inter-harmoniques** : Ce sont des composantes sinusoïdales qui ne sont pas à des fréquences multiples de celles du fondamental : 130 Hz, 170 Hz, 220 Hz..
- **Infra-harmoniques** : Ce sont des composantes sinusoïdales qui sont à des fréquences inférieures à celle du fondamental : 10 Hz, 20 Hz...

L'expression de ces grandeurs est donnée par le développement de la série de Fourier suivant:

$$y(t) = y_0 + \sum_{n=1}^{h=\infty} y_n \sqrt{2} \sin(n \cdot \omega t + \phi_n) \quad (\text{II.3})$$

avec :

y_0 : valeur de la composante continue,

y_h : valeur efficace de l'harmonique de rang h ,

$\omega = 2\pi f$: pulsation de la fréquence du fondamental

ϕ_h : déphasage de la composante harmonique de rang h.

II-3-4-2-2- Représentation spectrale

Un signal déformé se compose généralement de plusieurs harmonique. On représente souvent ce signal sous forme d'un spectre ; c'est à dire à l'aide d'un schéma où l'on porte abscisse la fréquence et en ordonnée le module (en valeur efficace ou en pour cent)

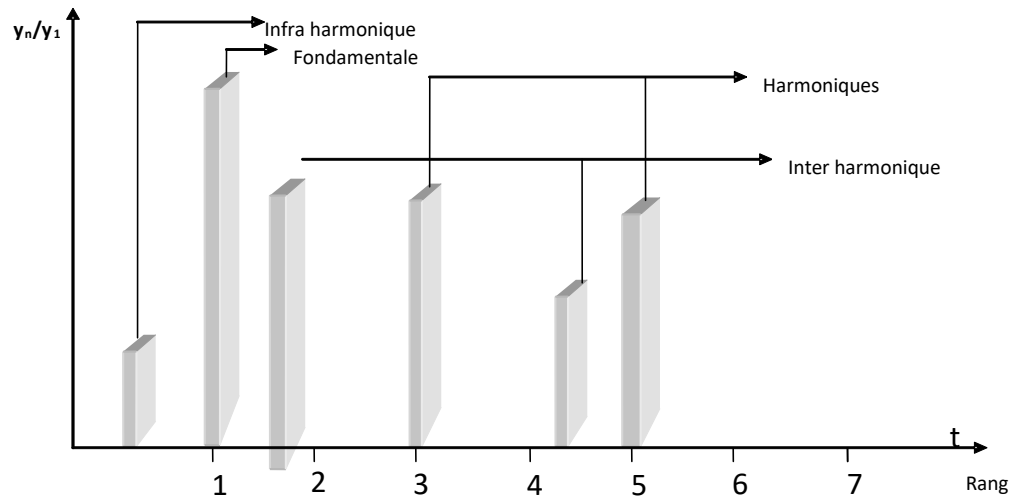


Figure II-10 Représentation spectral d'un signal périodique

II-3-4-2-3- Caractéristique des perturbations harmonique

Chacun des harmoniques est caractérisé par une amplitude généralement exprimée en pourcentage de l'amplitude du fondamental et par une phase.

Le « rang » de l'harmonique est la valeur de l'entier qui détermine sa fréquence (sur un réseau 50Hz, $I_h 7 = 350$ Hz).

- ❖ Le taux de distorsion harmonique (THD) : défini en tension ou en courant. Il nous permet de caractériser la déformation apportée par les harmoniques par rapport à une onde sinusoïdale.

$$THD = \sqrt{\sum_h^{\infty} \left(\frac{Y_h}{Y_1} \right)^2} \quad (II.4)$$

Y_1 : valeur de la composante fondamentale,

Y_h : valeur efficace de l'harmonique de rang h

❖ la puissance déformante D :

$$D = 3V_1 \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (\text{II.5})$$

❖ La puissance apparente sera donnée par :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{II.6})$$

❖ Le facteur de puissance par :

$$F = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (\text{II.7})$$

Il est bien clair que le facteur de puissance est dégradé en présence des harmoniques

II-3-4-2-4- Origine des harmoniques

Les harmoniques sont générées par des charges non linéaires absorbant un courant non sinusoïdal. Actuellement, les équipements à base de thyristors constituent la principale source de ces harmoniques. Ces appareils, dont les caractéristiques électriques varient avec la valeur de la tension, sont assimilables à des générateurs de courants harmoniques : four à arc appareils d'éclairage fluorescent, variateurs de vitesse, redresseurs, téléviseurs, ordinateurs, etc. [19]

II-3-4-2-5- Conséquences des harmoniques

Les effets des harmoniques les plus connus et les plus spectaculaires sont la destruction de condensateurs ou de disjoncteurs sous l'effet de forts courants harmoniques amplifiés par des résonances. Ce phénomène est généralement observable sur des réseaux internes d'usines alimentant des convertisseurs statiques et en présence de condensateurs installés sans précaution. Un autre phénomène de plus en plus rencontré, est l'échauffement des transformateurs et des conducteurs de neutre sous l'effet des courants harmoniques.

On rencontre le plus souvent ce type de situation en milieu tertiaire, en raison de la multiplication des matériels informatiques monophasés.

Il faut aussi remarquer que les harmoniques peuvent avoir des effets moins visibles, mais tout aussi réels, les effets à long terme, qui sont d'autant plus sournois qu'on ne peut les relier directement et de façon claire à la présence d'harmoniques sur le réseau, ils se traduisent par une fatigue accélérée du matériel.

Il est d'usage de dire que, dans les installations industrielles, les tensions harmoniques inférieur à 5% de la tension fondamentale ne produisent pas d'effets

notables. Entre 5% et 7%, on commence à observer des effets, de 7% à 10% ces effets sont fréquents, et pour plus de 10%, les effets sont quasis certains.

Ces chiffres sont admis par la plupart des experts en compatibilité électromagnétique qui interviennent sur les problèmes d'harmoniques.

Parmi les effets instantanés sur le coté réseau on peut citer :

- Perturbation des systèmes électriques, des dispositifs de mesures et de protections,
- Perturbation des lignes de téléphones proches des lignes de puissance,
- Résonance,
- Vibration et bruits,
- Surcharge des conducteurs de neutre.

En ce qui concerne les effets à long terme :

- Échauffement qui réduit la durée de vie des matériels (Condensateurs, transformateurs, machines tournantes,...).

Du coté charge l'effet harmonique se manifeste ainsi :

- Fatigue mécanique des matériaux due aux vibrations,
- Pour les machines synchrones, les tensions et les courants harmoniques provoquent des pertes et des échauffements supplémentaires dus aux flux de fuites, particulièrement dans les moteurs à induction.
- Ils réduisent le couple utile et empêchant le moteur d'atteindre sa vitesse maximale.

II-3-4-2-6- Expérimentations [14]

Pour notre étude nous avons fait une application sur le four à arc du complexe EL-Hadjar(voir annexe N°1), et pour la mesure des harmoniques nous avons utilisé un équipement de SONEGAZ appelé de « **MAP MILL** ». Cet équipement est destiné pour l'analyse des réseaux électriques triphasés, et aussi il fait la mesure des harmoniques jusqu' à la quinzième (c'est à dire de 2 à 15), mais malheureusement pas de signalisation des inter-harmoniques.

Dans les figures ci-dessous on trace la variation de courant (KA) de chaque harmonique de (2-15) pendant une période de fonctionnement du four (coulée) 90mn

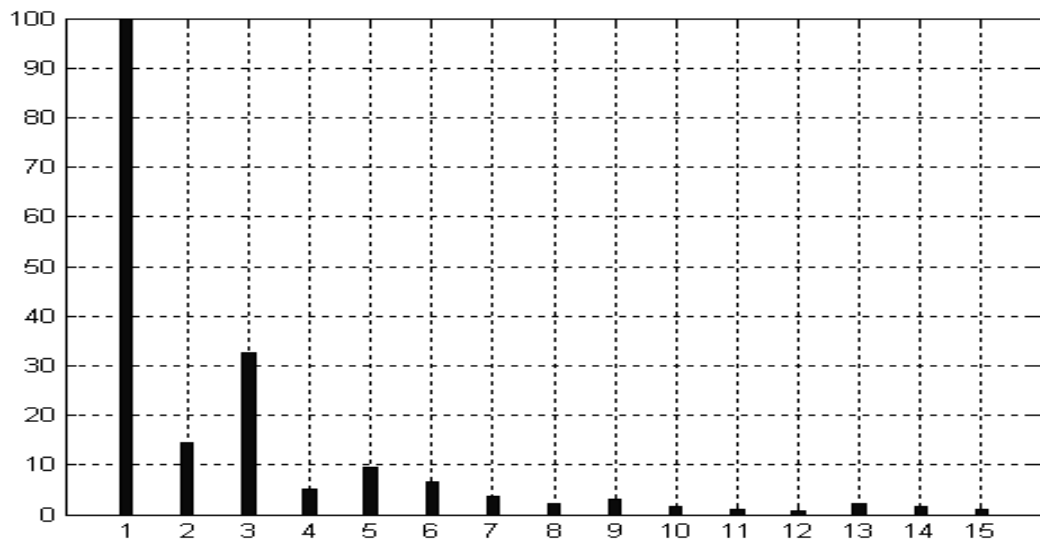


Figure II-11 Spectre d'harmonique d'un four à arc

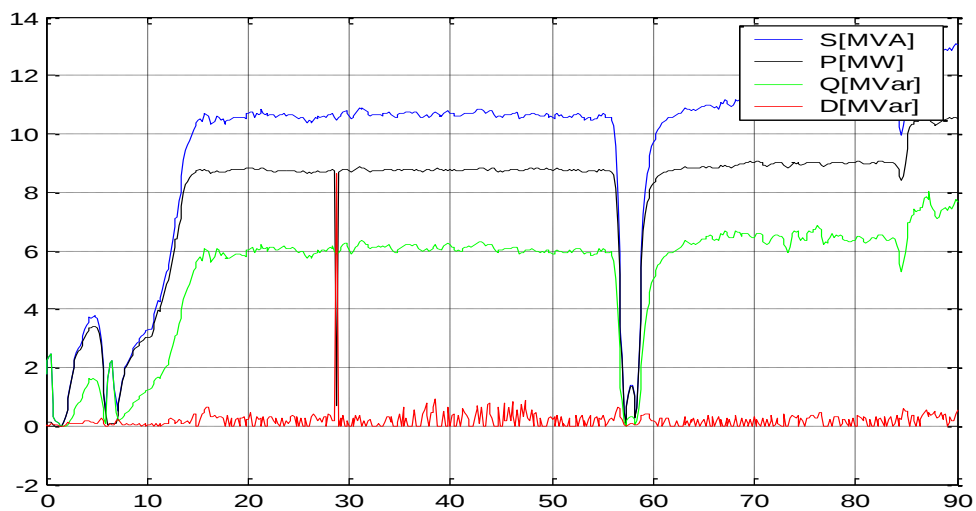


Figure II-12 Les puissances d'un four à arc

Particularités des harmoniques :

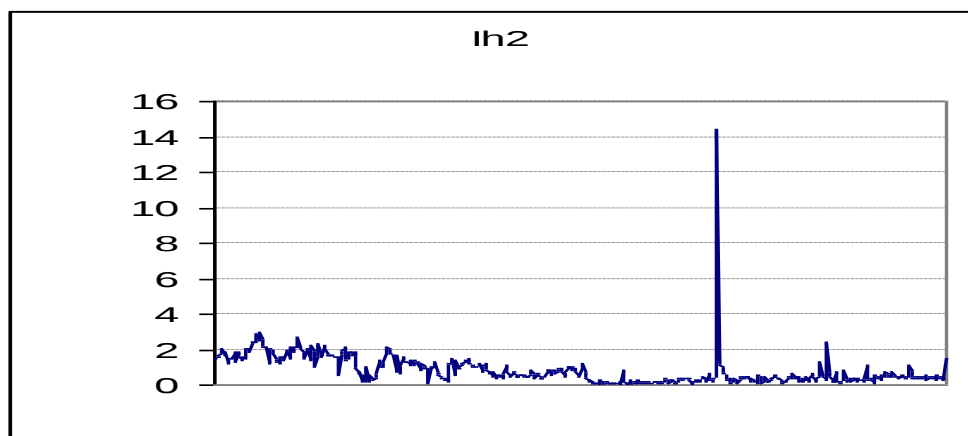
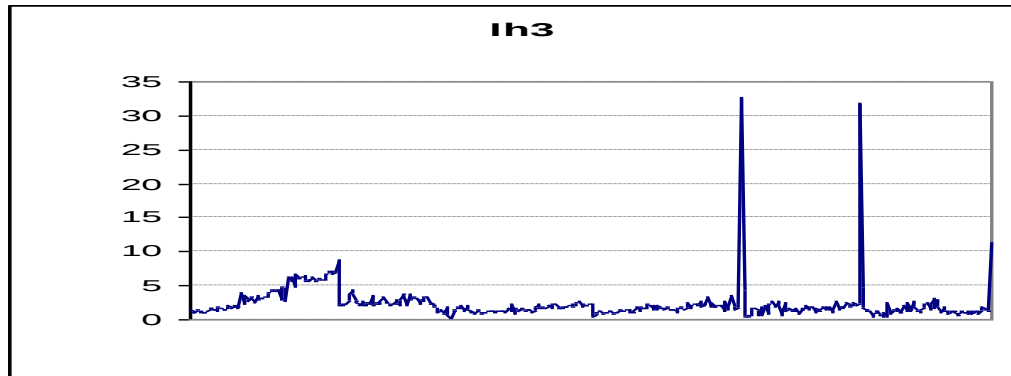
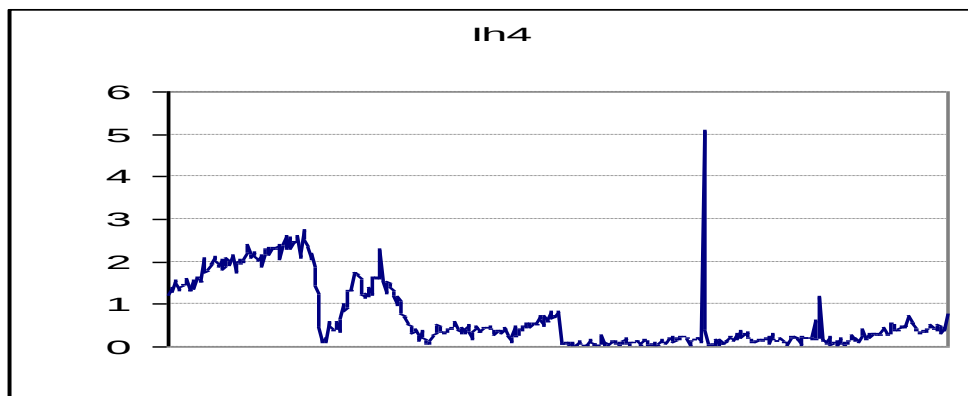
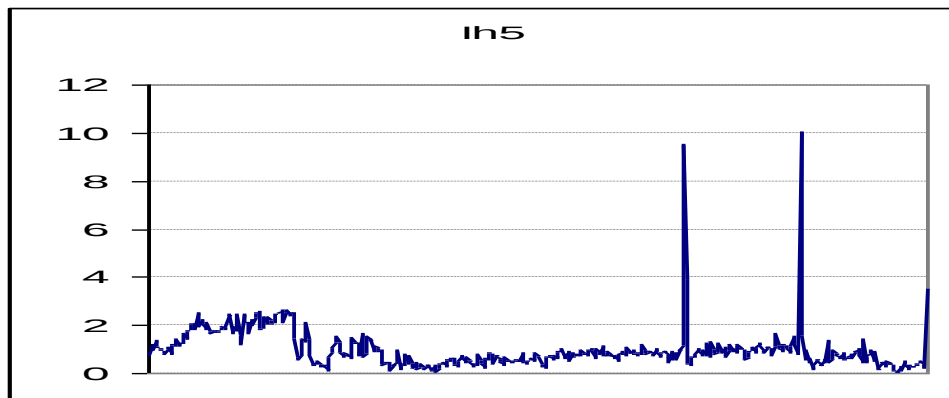
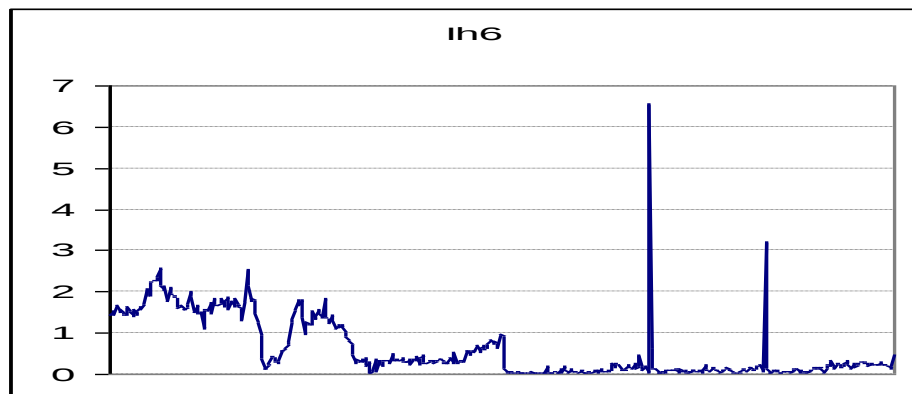
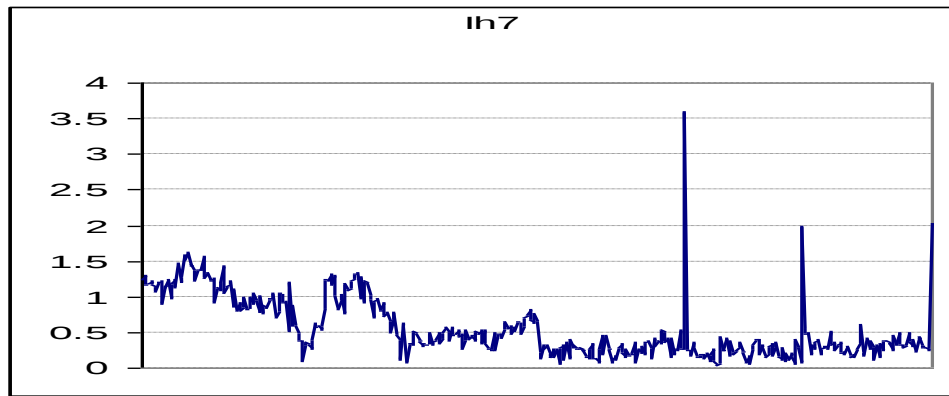
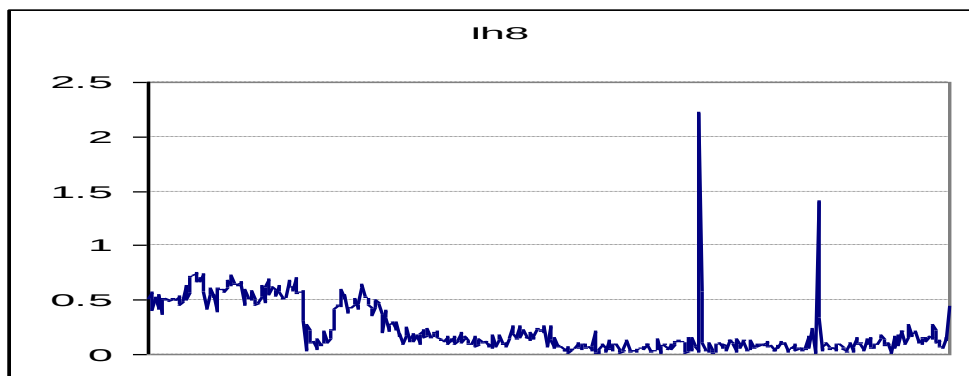
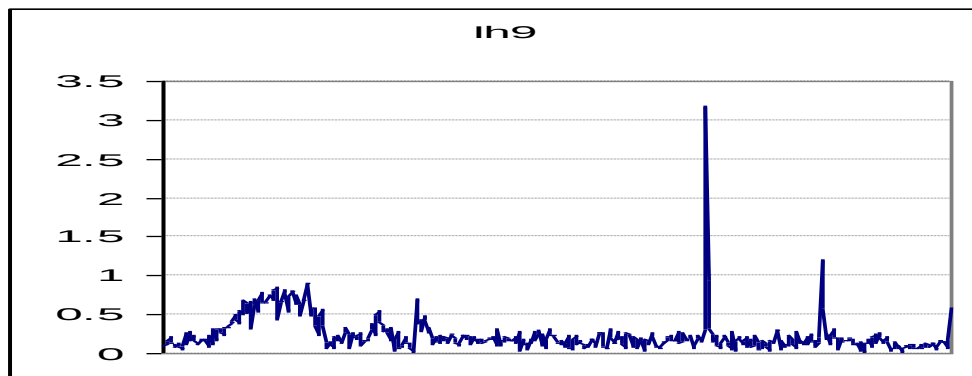
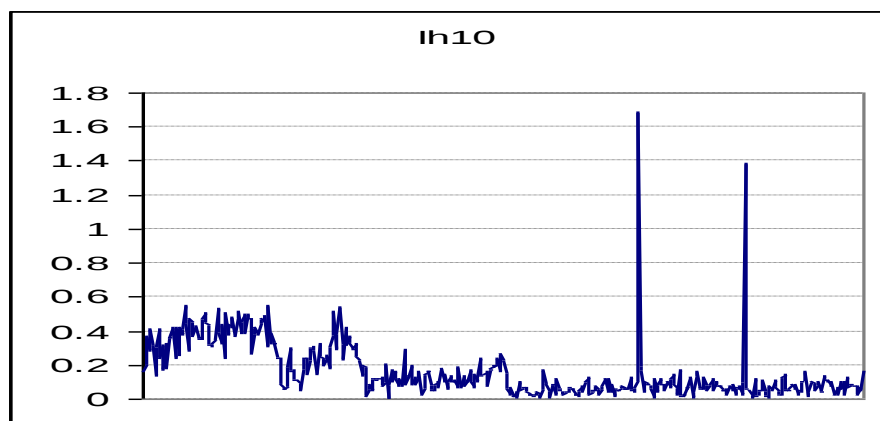
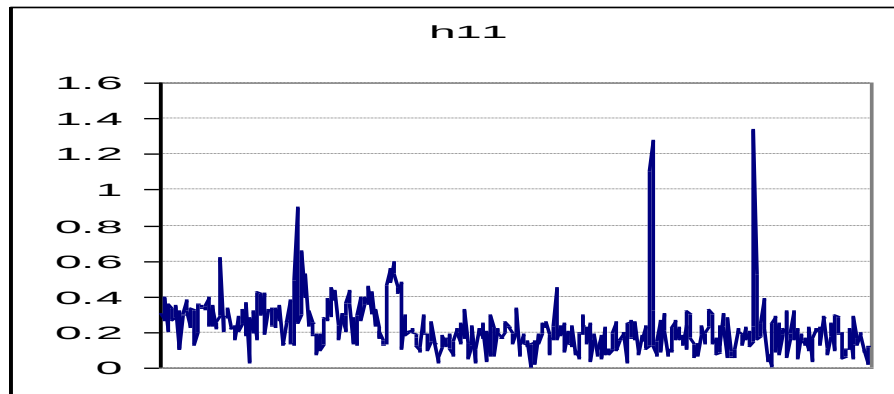
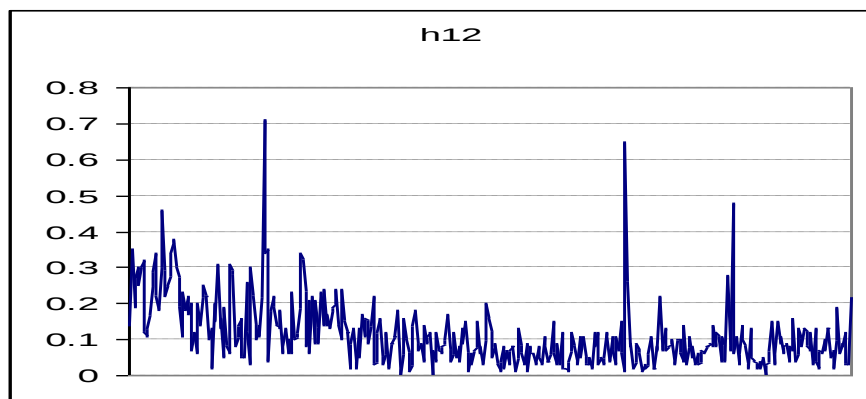
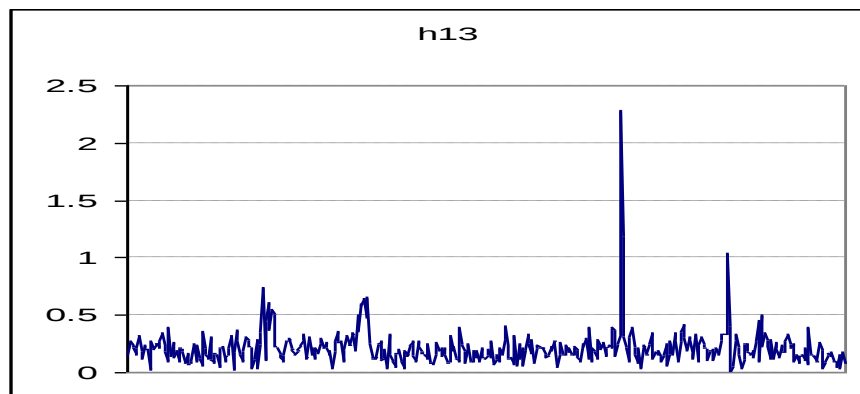
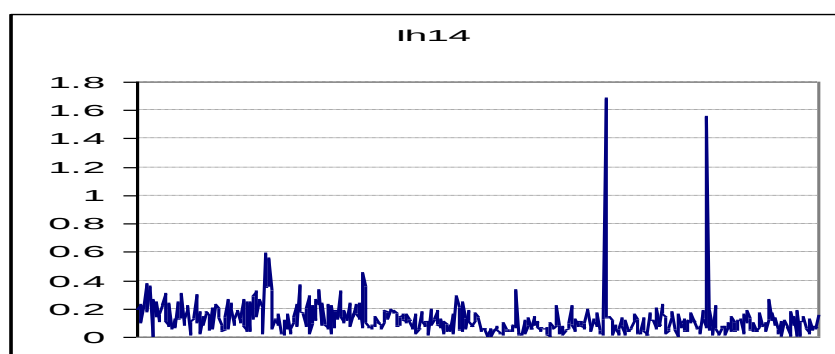


Figure II-13 Courant harmonique range 2

*Figure II-14 Courant harmonique range3**Figure II-15 Courant harmonique range 4**Figure II-16 Courant harmonique range 5**Figure II-17 Courant harmonique range 6*

*Figure II-18 Courant harmonique range 7**Figure II-19 Courant harmonique range 8**Figure II-20 Courant harmonique range 9**Figure II-21 Courant harmonique range 10*

*Figure II-22 Courant harmonique range 11**Figure II-23 Courant harmonique range 12**Figure II-24 Courant harmonique range 13**Figure II-25 Courant harmonique range 14*

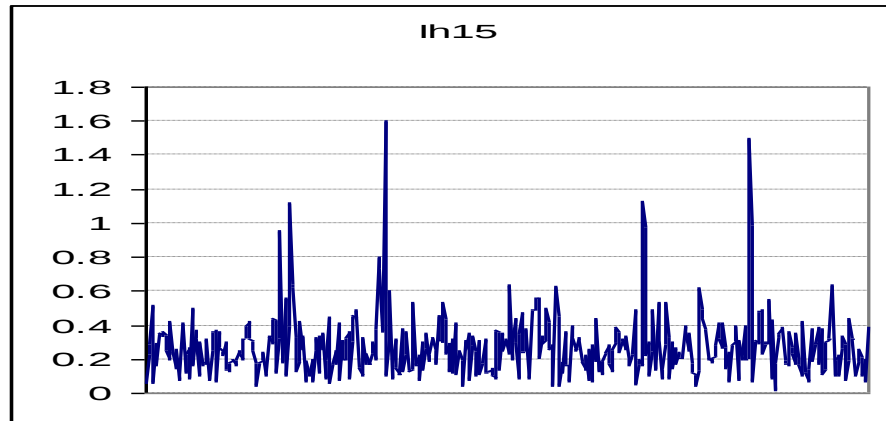


Figure II-26 Courant harmonique range 15

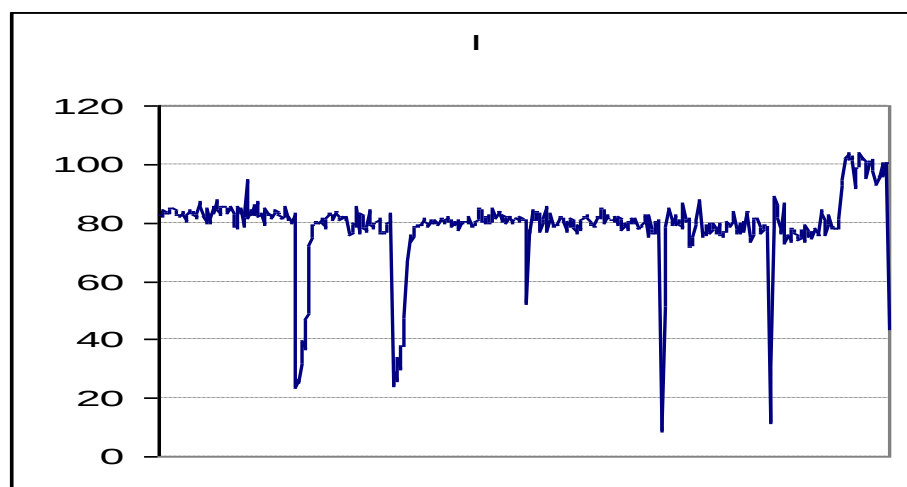


Figure II-27 courant fondamentale

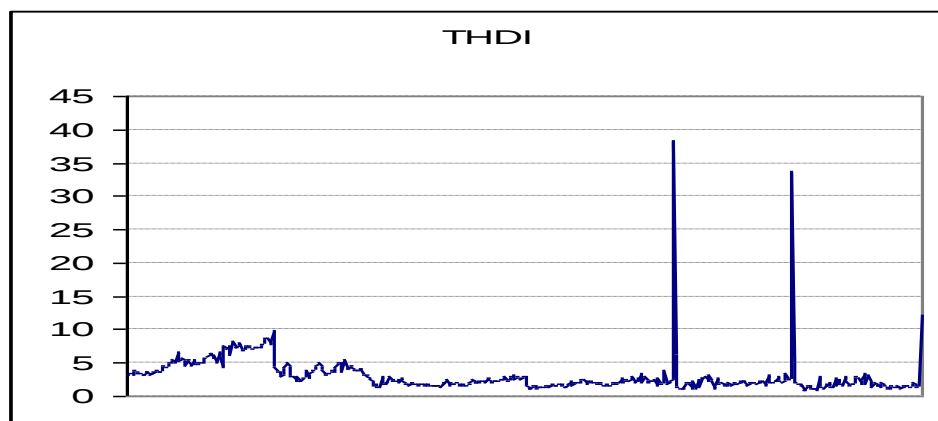


Figure II-28 THD de four à arc

II-4- Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vue :

Les différents types de perturbations affectant l'onde de tension tels que le flicker, les harmoniques, le déséquilibre ...etc.

En particulier, nous avons passé en revue d'une manière plus approfondie sur les perturbations induites par les fours à arcs et sa montre bien que il ya un impacte très néfaste du fonctionnement de four sur le réseau d'alimentation.

Vu la nature de l'arc électrique qui est non linéaire, dissymétrie et instable, les perturbations harmoniques générées par le four à arc sont de caractère stochastique.

Chapitre III : Compensations des perturbations électriques

III-1- Introduction

La part du four électrique dans la production mondiale d'acier a donc continué à progresser régulièrement. En 1993, et pour une production mondiale d'acier de 725,3 Million tonne, la part du four électrique a été de 31 %, avec des différences considérables entre les pays de quelques pour-cent (Pays Bas, Chili...) à plus de 50 % dans un certain nombre de pays industrialisés (Italie, Turquie ...), et même 100 % au Venezuela et en Arabie Saoudite [2].

Il semble donc que dans un avenir proche un pourcentage de 40 à 50 % corresponde, sur le plan mondial, à un équilibre entre acier produit par voie électrique et produit directement à partir de la filière haut fourneau et convertisseur à oxygène. Et donc, les utilisateurs professionnels de l'électricité expriment le besoin d'optimiser le fonctionnement de leurs installations électriques et sa sert pour minimiser les déferents perturbation électriques générées durant le fonctionnement des fours à arc.

III-2- La compensation classique

Il y a plusieurs sources qui sont capables de produire de l'énergie réactive, ce qui permet de les utiliser comme des moyens de compensation d'énergie réactive et peut les classer comme suit :

- Les compensateurs rotatifs : qui sont les moteurs synchrones.
- Les compensateurs statiques : qui sont les batteries de condensateurs.

III -2-1- Les moteurs synchrones

On appelle 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. Pour régulariser la tension d'un réseau, on doit lui fournir une puissance réactive pendant les heures de pointe. Inversement, pendant les périodes creuses, on doit absorber l'excès de puissance réactive générée par les lignes. Le compensateur synchrone permet de compenser ces fluctuations de puissance réactive en ajustant l'excitation selon les besoins.

Le compensateur agit alors comme une énormes capacitance ou inductance variable dont la valeur est réglable en faisant varier le courant d'excitation de son rotor.

III-2-2- Les batteries de condensateurs

La puissance réactive fournie par la batterie est constante quelles que soient les variations du facteur de puissance de la charge et de la consommation d'énergie réactive de l'installation.

III-2-2-1- La puissance réactive d'une batterie de condensateurs

Soit un condensateur de capacité C (Farad) sous une tension sinusoïdale de valeur efficace $V(V)$, et de fréquence $f(Hz)$, fournit une puissance réactive :

$$q_c = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot V^2 \quad (\text{VAR}) \quad (\text{III.1})$$

Les condensateurs de puissance sont groupés sous forme de batteries généralement triphasé, couplés au réseau en deux montage suivantes :

- montage triangle : qui est représenté par la figure (III.1)

$$\text{On a } Q_{\Delta} = 3 \cdot q_c \text{ Alors } Q_{\Delta} = 3 \cdot \omega \cdot C \cdot U^2 \quad (\text{VAR}) \quad (\text{III.2})$$

Avec :

Q_{Δ} : La puissance réactive du montage (Δ) en (VAR).

q_c : La puissance réactive d'un condensateur en (VAR).

U : Tension composée en (V).

ω : La pulsation de tension en (rad/s).

C : La capacité d'un condensateur en (farad).

- montage étoile : qui est représenté par la figure (III.2)

$$Q_Y = 3 \cdot \omega \cdot C \cdot V^2 \quad (\text{VAR}) \quad (\text{III.3})$$

Avec : Q_Y : la puissance réactive du montage étoile en (VAR).

V : la tension simple en (V) avec $U = \sqrt{3}V$ (V).

Donc on peut déduire

$$Q_{\Delta} = 3 \cdot Q_Y \quad (\text{VAR}) \quad (\text{III.4})$$

De cette dernière formule (III,4), on remarque que l'énergie réactive fournie par le montage triangle est trois fois que l'énergie réactive fournie par le montage étoile et pour ça l'utilisation du montage triangle est très vaste pour la compensation de l'énergie réactive.

III-2-2-2- Types de batteries

On distingue deux types de batteries suivant leur raccordement :

- Le branchement en dérivation pour les batteries shunt.
- Le branchement en série entre la source et la charge pour les batteries en série.

III-2-2-2-1- Batterie shunt

Une batterie de condensateurs shunt est une installation en dérivation du réseau. Elle est raccordée entre phases, ou entre phase et neutre, ou entre phase et terre.

Les batteries peuvent être installées en simple étoile ou en double étoile (figure III-2) quand elles sont raccordées entre phase et neutre ou terre. Elles sont installées en triangle (figure III-1) quand elles sont entre phases.

Les batteries shunts sont le plus souvent utilisées sur les réseaux.

Elles peuvent être :

- Uniques (figure III-3) : Lorsque leur puissance réactive est faible et la charge relativement stable.
- Multiples ou fractionnées (figure III-4) : Ce type de compensation est communément appelé en « gradins » (condensateur+disjoncteur). Ce type de batterie est très utilisé par certaines grosses industries (forte puissance installée) et les distributeurs d'énergie (dans les postes sources). Il permet une régulation pas par pas de l'énergie réactive.

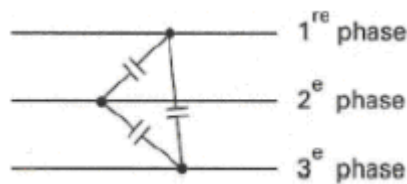


Figure III-1 Batterie shunt en triangle

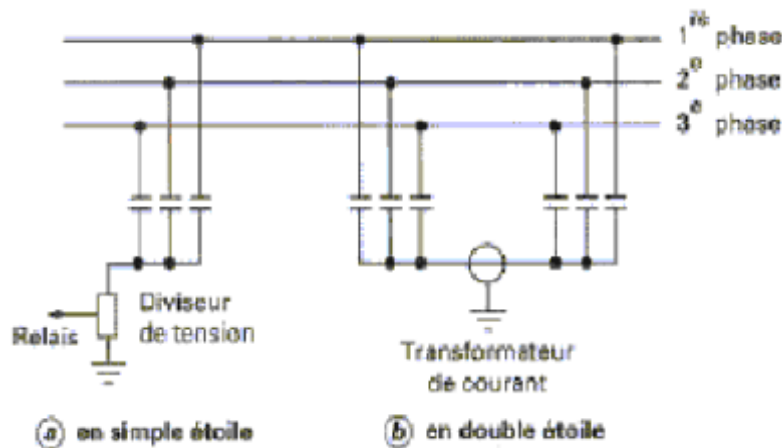


Figure III-2 Batterie shunt en étoile

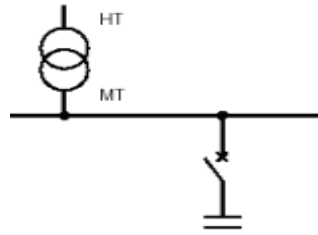


Figure III-3 Batterie de condensateur unique

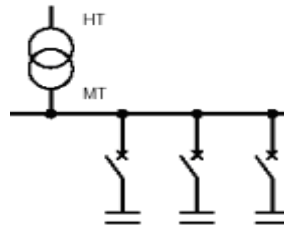


Figure III-4 Batterie de condensateur multiple

III-2-2-2- Batteries en série

On peut réduire $X = jL$, en insérant en série sur la ligne électrique une capacitance $1/C$; l'impédance de la ligne devient alors Z , d'où $Z < X$

Les batteries en série sont peu utilisées sur les réseaux, surtout à moyenne et basse tensions. Par contre, sur les lignes de transport à grande distance, sous des tensions supérieures à 220kV, leur utilisation est fréquente et leur puissance réactive est toujours importante.

Ces batteries jouent, en plus de l'amélioration de la capacité de transport d'énergie du réseau d'autres rôles :

- ☒ Maintien de la tension d'un réseau à facteur de puissance normal.
- ☒ Répartition des charges, dans le cas de lignes fonctionnant en parallèle.

Les puissances des batteries en série atteignent quelques centaines de méga vars. Elles comportent des plates-formes isolées, à la même tension que la ligne (figure III.5) .

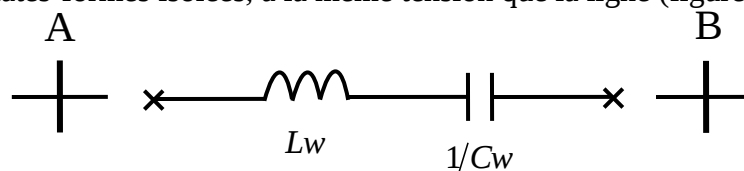


Figure III-5 Batterie série

La mise sous tension de ces batteries est assurée suivant les moyens :

- ☒ Soit manuelle par disjoncteur ou interrupteur.
- ☒ Soit semi-automatique par contacteur commandé à distance.

III-2-2-3- Les avantages compensateurs statiques

De tous les équipements statiques :

- ✓ L'absence d'usure mécanique et un entretien réduit.
- ✓ De faibles pertes.
- ✓ Un faible volume et une installation facile.
- ✓ Peuvent être fractionnés suivant les besoins.
- ✓ Soit leur prix est moins élevé que les compensateurs rotatifs, qu'elle que soit la puissance.

III-2-2-4- Les inconvénients compensateurs statiques

La puissance réactive fournie n'est pas réglable simplement.

- ✓ La puissance réactive fournie varie avec la tension d'alimentation.
- ✓ La mise sous tension provoque un violent appel de courant.
- ✓ Si la fréquence de résonance avec l'inductance de la source est proche de celle d'un harmonique existant, cet harmonique est amplifié et peut devenir gênant ou dangereux.
- ✓ L'inconvénient le plus important c'est le régime transitoire après l'enclenchement et déclenchement parce que l'enclenchement d'une batterie de condensateurs destinée à fonctionner en dérivation sur un réseau est accompagné d'un régime transitoire résultant de la charge de la batterie.

III-3- Filtrage passif [19.20]

Le principe du filtrage passif consiste à insérer en amont de la charge, un ou plusieurs circuits accordés sur les harmoniques à rejeter. Ainsi, pour filtrer un courant à une fréquence particulière, un filtre résonnant série est placé en parallèle sur le réseau (figure III-6). Cependant, ce type de filtre est très sélectif. Pour atténuer toute une bande de fréquences, un filtre passif amorti du second ordre (figure III-7) est préférable.

Le dimensionnement de ces filtres dépend des harmoniques à éliminer, des performances exigées, de la structure du réseau et de la nature des récepteurs. Par cette technique, il est en général plus aisé de rejeter les harmoniques de rang élevée que celles de rang faible.

Malgré sa large utilisation dans l'industrie, ce dispositif simple a tout de même certains inconvénients :

- ❖ Une connaissance approfondie de la configuration du réseau électrique est nécessaire.

- ❖ Les variations de l'impédance du réseau peuvent détériorer les performances du filtre.
- ❖ Le réseau peut former un système résonnant avec le filtre et les fréquences voisines de la fréquence de résonance sont amplifiées
- ❖ Equipements volumineux,
- ❖ Inadaptabilité et perte d'efficacité lorsque les caractéristiques du réseau électrique évoluent.

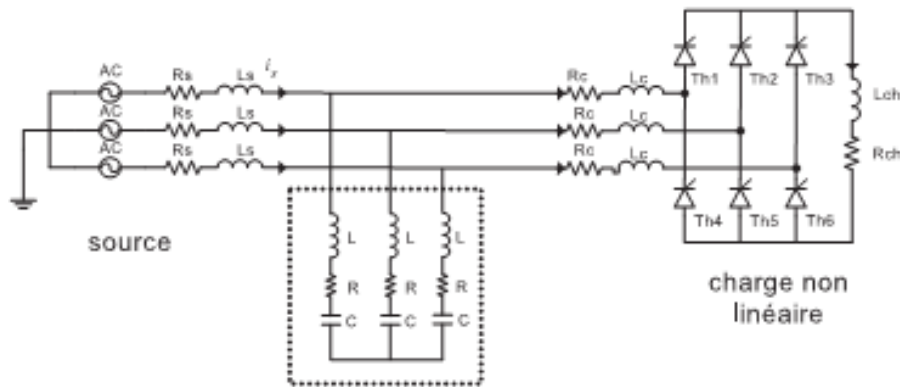


Figure III-6 Filtre passif résonnant.

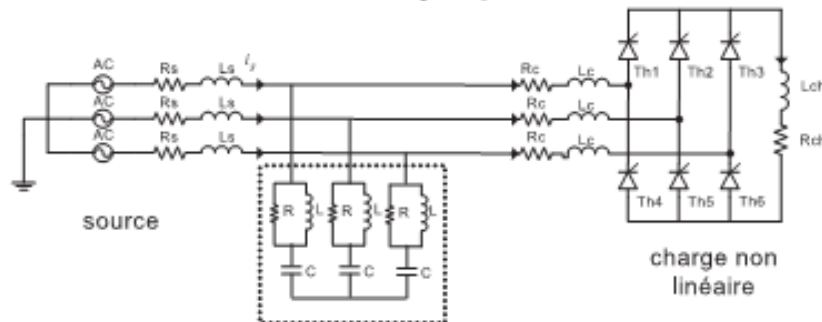


Figure III-7 Filtre passif amorti

III-4- Le system de transmissions flexibles en courant alternatif [FACTS]

Devant les problèmes de transit de puissance, la compagnie américaine EPRI (Electric Power Research Institute) a lancé, en 1988, un projet d'étude des systèmes FACTS afin de mieux maîtriser le transit de puissance dans les lignes électriques [21].

Le système de FACTS ("Flexible AC Transmission System" ou "Système de Transmission à Courant Alternatif Flexible") est né, voici plus plusieurs années, pour répondre aux difficultés rencontrées dans la gestion des flux sur le réseau et le rendre comme son nom l'indique plus flexible.

Ce terme s'applique à tous les systèmes fondés sur l'électronique de puissance et permettant de modifier d'une façon ou d'une autre les flux d'énergie sur le réseau.

III-4-1- Définition

Selon l'IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), la définition du terme *FACTS* est la suivante : «*Système de Transmission en Courant Alternatif comprenant des dispositifs basés sur l'électronique de puissance et d'autres dispositifs statiques utilisés pour accroître la contrôlabilité et augmenter la capacité de transfert de puissance du réseau*» [18]

La technologie FACTS n'est pas limitée en un seul dispositif mais elle regroupe une collection de dispositifs à base de l'électronique de puissance implantés dans les réseaux électriques afin de mieux contrôler le flux de puissance et augmenter la capacité de transit de leurs lignes. Par action de contrôle rapide de ces systèmes sur l'ensemble des paramètres du réseau: tension, impédance, déphasage ...etc. ils permettent d'améliorer les marges de stabilité et assurer une meilleure **flexibilité** du transfert d'énergie.

Flexibilité de Transmission de l'énergie: l'aptitude d'accommoder aux changements du système énergétique et aux conditions de fonctionnement en maintenant l'état stable et de suffisantes marges de stabilité transitoire[22]

III-4-2- Principes de fonctionnement des FACTS

Nous intéresserons qu'aux principaux dispositifs FACTS cités plus haut. Ces derniers sont des compensateurs shunts. Pour cela prendrons l'exemple d'une ligne de transport dans laquelle sont insérés des dispositifs.

❖ Ligne de transport seul :

On considère une ligne de transport, que l'on peut décomposer en deux demi-lignes d'impédance $X_L/2$

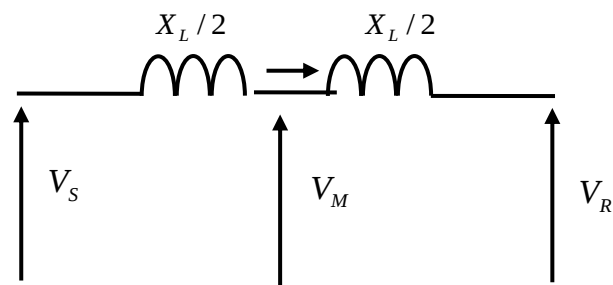


Figure III-8 Modèle simplifié de la ligne

V_S : Tension aux bornes de la source.

V_R : Tension aux bornes du récepteur.

V_M : Tension au milieu de la ligne.

X_L : Impédance (réactance) de la ligne.

I : Courant de ligne.

On considère que les tensions à chaque extrémité de la ligne sont égales à V et que le déphasage entre elles est δ_{12} . La puissance transmise sur la ligne, est alors donnée par l'équation (III.5) :

$$P = \frac{V^2}{X_L} \sin \delta_{12} \quad (\text{III.5})$$

La puissance réactive est donnée par l'équation (III.6)

$$Q = \frac{V^2}{X_L} (1 - \cos \delta_{12}) \quad (\text{III.6})$$

III-4-3- Différentes Catégories des FACTS

Le tableau (III.1) représente les grandes catégories des dispositifs FACTS continents composants rapidement commander avec des interrupteurs statiques et convertisseurs de l'électronique de puissance

	Dispositif FACTS(Rapide, statique)	
	A base de thyristor	A base de convertisseur de tension
Dispositif Shunt	Compensateur de puissance réactive statique(SVC)	Compensateur statique synchrone STATCOM
Dispositif série	Compensateur série contrôlé par thyristor (TCSC)	Compensateur série statique synchrone SSSC
Dispositif Série-Shunt	❖ Contrôleur dynamique de flux de puissance(DFC) ❖ HVDC Back to back (HVDC B2B)	❖ Contrôleur universel de flux de puissance UPFC ❖ HVDC VSC Back to back (HVDC VSC B2B)

Tableau III-1 Principaux Dispositifs FACTS [22]

La colonne gauche des systèmes FACTS présente les contrôleurs à base des thyristors ou bien à des convertisseurs à thyristor tel que le SVC et le TCSC qui sont connus depuis

plusieurs dizaines d'années à titre de compensateurs shunt et série respectivement et qui ont prouvé leur fiabilité dans le contrôle des réseaux.

Les dispositifs dans la colonne de droite sont la technologie la plus avancée des FACTS avec des convertisseurs de sources de tension à base des interrupteurs statiques sophistiqués IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) ou bien les IGCT (Insulated Gate Commutated Thyristors) tel que le STATCOM, le SSSC et l'UPFC. Ces convertisseurs de source de tension fournissent ou injectent une tension totalement contrôlable en amplitude et en phase en série ou en parallèle dans le réseau selon les exigences de contrôle en exerçant une MLI sur les gâchettes des interrupteurs de ces convertisseurs.

- **Compensateurs séries:** Ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau comme une impédance variable (inductive ou capacitive) ou une source de tension variable. Utilisés pour la compensation série de la puissance réactive et par leur influence sur l'impédance effective des lignes ils interviennent dans le contrôle du flux de puissance et la stabilité de ce dernier. En général ces dispositifs séries injectent une tension en série avec la ligne de transmission.
- **Compensateurs shunts:** Ils consistent en une impédance variable, source variable ou une combinaison des deux. Ils injectent un courant dans le réseau à travers le point de connexion. Ils sont principalement pour la compensation de la puissance réactive et par conséquent contrôler de tension des noeuds.
- **Compensateurs hybrides série-shunt:** C'est une combinaison des dispositifs séries et shunts commandé d'une manière coordonnée afin d'accomplir un contrôle prédéfini. Ils permettent un contrôle multi variables, ils servent à contrôler le flux de puissance active et réactive, la tension et l'angle de transport de l'énergie.

III-4-4- Apports et Avantages des FACTS

L'intérêt majeur de la technologie FACTS pour les opérateurs de l'énergie électrique est d'ouvrir plus d'opportunités pour le contrôle de la puissance et d'augmenter les capacités utilisables des présentes lignes sous les conditions normales. Ces possibilités résultent par l'habileté des contrôleurs FACTS de contrôler les paramètres intervenant dans l'équation (III.7) qui gouverne l'opération de transmission de l'énergie dans une ligne tel que les impédances séries, impédances shunts, courant, tension, angle de phase.

$$P = \frac{V_r \cdot V_s}{X} \cdot \sin(\delta) \quad (\text{III.7})$$

Par cette action les contrôleurs FACTS permettent dans un système énergétique d'obtenir un sinon plusieurs des bénéfices suivants:

- Contrôle du flux de puissance qui est la principale fonction des dispositifs FACTS. ce contrôle doit être réalisé selon un chier de charge prédéfini pour satisfaire les besoins des consommateurs.
- Améliorer la stabilité dynamique du système: entre autre des fonctions des FACTS l'amélioration de la stabilité transitoire, atténuation des oscillations et le contrôle de la
- Contrôle des tensions dans les noeuds.
- Augmenter les capacités de charge des lignes vers leurs limites thermiques.
- Contrôle de la puissance réactive: Réduction de l'écoulement de la puissance réactive, donc permettre aux lignes de transmettre plus d'énergies active et par conséquence réduire les pertes de transmission.
- Amélioration de la qualité de l'énergie.

III-4-5- Applications Pratiques des Dispositifs FACTS

Les systèmes FACTS sont habituellement connus comme nouvelle technologie, mais des centaines d'installations dans le monde, plus particulièrement du SVC depuis 1970 avec une puissance totale installée de 90.000 MVAR, prouvent l'acceptation de ce genre de technologie. Le tableau de la (III.2) montre des chiffres approximatifs des dispositifs FACTS installés dans le monde avec les puissances totales installées.

Type	Nombre	Puissance installée en MVA
SVC	600	90.000
STATCOM	15	1.200
Série Compensation	700	350.000
TCSC	10	2.000
HVDC B2B	41	14.000
UPFC	2-3	250

Tableau III-2 Dispositifs FACTS installés dans le monde et leurs puissances totales

Le tableau III-3 résume d'une manière simple l'impact de l'utilisation de chaque FACTS, à la résolution des différents problèmes qui entravent le bon fonctionnement du réseau électrique [23].

	Contrôle de Charge	Contrôle de Tension	Stabilité Transitoire	Amplitude des Oscillations
SVC STATCOM	★	★★★	★	★★
TCSC	★★	★	★★★	★★
SSSC	★★★	★	★★★	★★
TCPAR	★★★	★★	★	★★
UPFC	★★★	★★★	★★★	★★★

Tableau III-3 Application des FACTS à la résolution des problèmes dans le réseau.

Influence: Petite $\rightarrow$ ★. Moyenne $\rightarrow$ ★★. Forte $\rightarrow$ ★★★.

III-4-6- Structure des Principaux Dispositifs FACTS

III-4-6-1- Dispositifs de compensation dynamique shunt

Effet tous les compensateurs parallèles injectent du courant au réseau via le point de raccordement. Quand une impédance variable est connectée en parallèle sur un réseau, elle consomme (ou injecte) un courant variable. Cette injection de courant modifie les puissances actives et réactive qui transitent dans la ligne.

III-4-6-1-1- Réactances commandées par thyristor (RCT)

$\Rightarrow$ **Définition :**

Les RCT (Réactances commandées par thyristor) ont fait leur apparition vers la fin de années soixante. Elles sont constituées d'une inductance en série avec un gradateur (deux thyristors tête-bêche). Chaque thyristor conduit pendant moins demi-période de la pulsation du réseau .Le retard à l'amorçage α permet de régler l'énergie réactive absorbée par le dispositif [24]

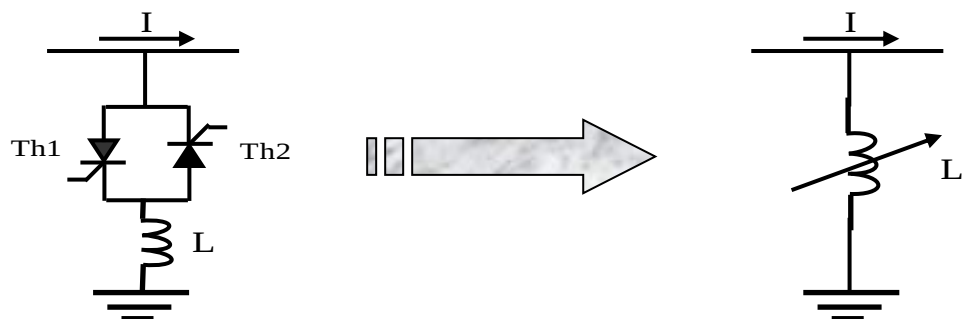


Figure III-9 Schéma du RCT

III-4-6-1-2- Compensateur statique de puissance réactive (SVC)

⇒ Définition

Compensateur statique de puissance réactive (SVC) est un dispositif de compensation shunt de la famille flexible de systèmes de transmission à courant alternatif (FACTS). Il peut fournir en continu la puissance réactive nécessaire pour contrôler les fluctuations dynamiques de la tension sous différents régimes de fonctionnement et ainsi améliorer les performances de réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique. L'installation de SVC en un ou plusieurs points spécifiques du réseau peut accroître la capacité de transit et réduire les pertes tout en maintenant un profil de tension régulier sous différents régimes. De surcroît, un compensateur statique sa puissance réactive peut atténuer les oscillations des amplitudes de tension.[25]

Les principales fonctions de SVC sont :

- Compensation de variation rapide de la charge réactive
- Amortissement de résonance subsynchrone
- Contrôle de tension
- Contrôle des oscillations de puissance

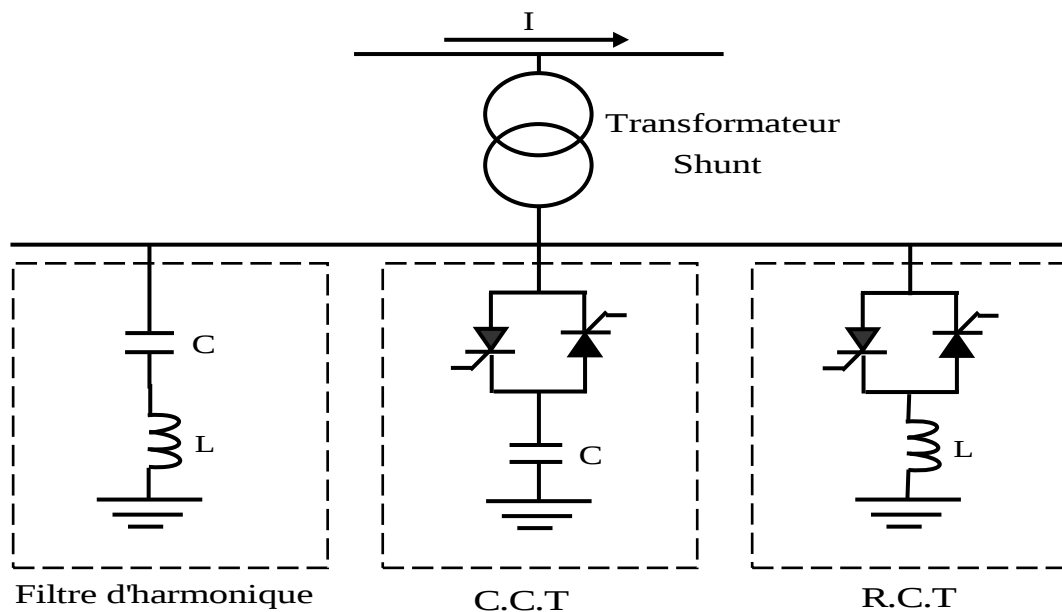


Figure III-10 Schéma du SVC

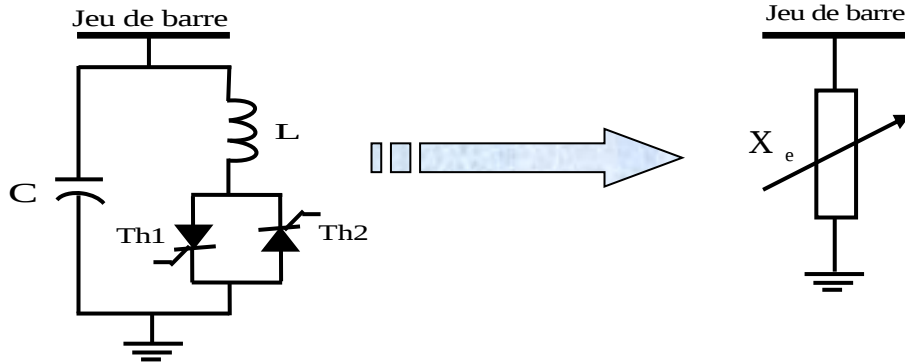


Figure III-11 Présentation d'un compensateur

Le SVC présente plusieurs avantages :

- ✓ Stabiliser la tension dans les systèmes faibles
- ✓ Réduire des pertes de transmission
- ✓ Augmenter la capacité de transmission, de ce fait retardant le besoin de nouvelles lignes
- ✓ Augmenter la limite passagère de stabilité
- ✓ Augmenter l'atténuation de petites perturbations
- ✓ Améliorer la commande et la stabilité de tension
- ✓ Atténuer des oscillations de puissance

III-4-6-1-3- Le STATCOM (Static Compensator)

⇒ **Définition** [26]

Le STATCOM (Statique Compensateur) a connu jusqu'à maintenant différentes appellations, CSERA (Compensateur statique d'énergie réactive de type avancé). ASVC (Advanced Static Var Compensator). SVG (Static Var Generator) et STATCON (Static Condenser).

Un STACOM est un système d'électronique de puissance connecté en parallèle, qui injecte dans le réseau un courant AC contrôlé en phase et en amplitude. Leur topologie est basée sur des convertisseurs de tension. Le schéma de STATCOM est donné par la figure III-12.

Le principe de fonctionnement de STATCOM est similaire à celui du compensateur synchrone. Les tensions de sortie sont générées par un onduleur au lieu d'être créées par un groupe tournant.

Ce principe a pu être mis en œuvre grâce à l'évolution des composants de l'électronique de puissance, et surtout grâce à l'apparition des GTO forte puissance. Les cellules de commutation sont bidirectionnelles, c'est-à-dire formées de GTO et de diodes en antiparallèle.

Le rôle de STATCOM est d'échanger d'énergie réactive avec le réseau

L'échange d'énergie réactive se fait par le contrôle de la tension de sortie de l'onduleur V_s , laquelle est en phase avec la tension du réseau E .

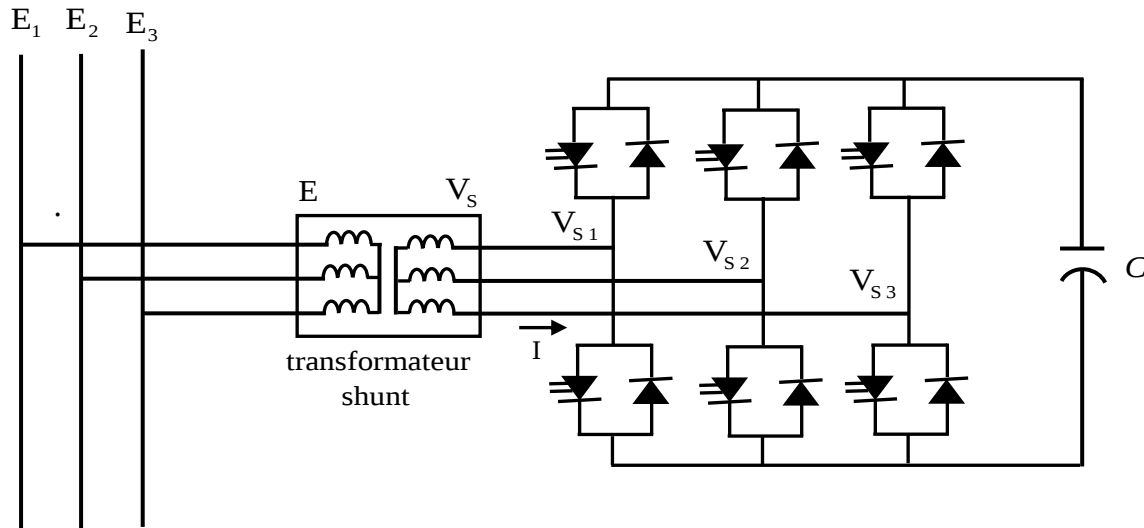


Figure III-12 Schéma de base du STATCOM

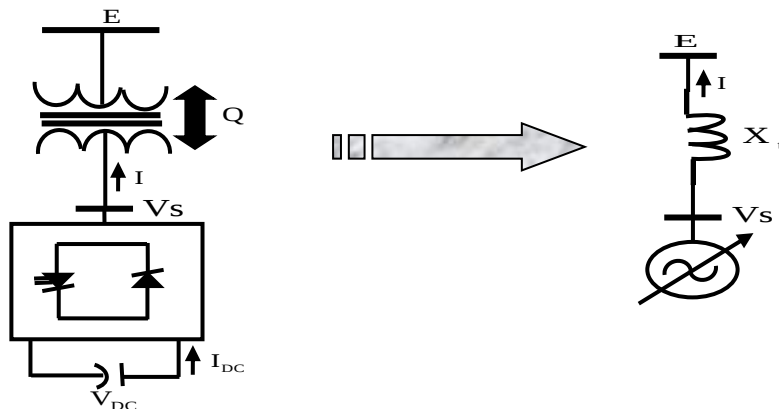


Figure III-13 Présentation d'un compensateur

Le STATCOM présente plusieurs avantages :

- ✓ Bonne réponse à faible tension : le STATCOM est capable de fournir son courant nominal, même lorsque la tension est presque nulle.
- ✓ Bonne réponse dynamique : Le système répond instantanément.
- ✓ L'étendue de la plage d'opération est plus large qu'avec un SVC classique

- ✓ Pour un contrôle optimal de la tension, les phases sont contrôlées séparément pendant les perturbations du système
- ✓ Un design modulaire du convertisseur permet une adaptation pour une grande plage de puissances nominales

III-4-6-2- dispositifs de compensation dynamique série

Ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau et peuvent être utilisés comme une impédance variable (inductive, capacitive) ou une source de tension variable. En général, ces compensateurs modifient l'impédance des lignes de transport en insérant des éléments en série avec celles-ci.

III-4-6-2-1- La capacité série commande par thyristor (TCSC)

⇒ Définition

La capacité série commande par thyristor (TCSC) est un dispositif de compensation série, elle utilise l'électronique de puissance comme élément de base. Elle connecte en série avec le réseau pour contrôler le transit de puissance, l'amortissement de résonance subsynchrone et des oscillations de puissance. Ce type de compensateur est apparu au milieu des années 80.[27]

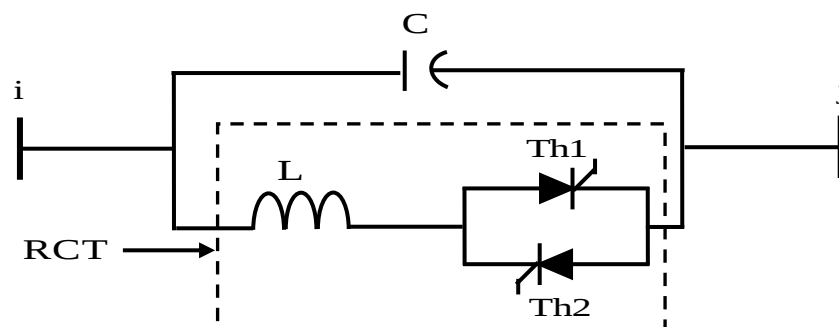


Figure III-14 Schéma du TCSC

Les principaux avantages de l'insertion de TCSC dans un réseau électrique sont :

- ❖ Compensation du déséquilibre des courants de charge.
- ❖ Amélioration de la stabilité dynamique, par l'amortissement des oscillations de puissance et de la stabilité de tension.
- ❖ Réduction des risques de résonance hypo synchrone.

Interconnexion des réseaux.

III-4-6-2-2- Compensateur statique série synchrone (SSSC)

⇒ **Définition** [22]

Le SSSC est un système d'électronique de puissance connecté en série qui injecte une tension en série avec la ligne de transmission à travers un transformateur série. Le SSSC, a une la fonction comparable au TCSC. Mais contrairement à ce dernier qui présente une zone morte à la résonance parallèle, le réglage est continu. De plus, l'introduction d'un stockage d'énergie est possible du fait de la structure des convertisseurs de tension (VSC).

Ce type de compensateur série (Compensateur Synchrone Statique Série) est le plus important dispositif de cette famille. Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne électrique à l'aide d'un transformateur (Figure III-15).

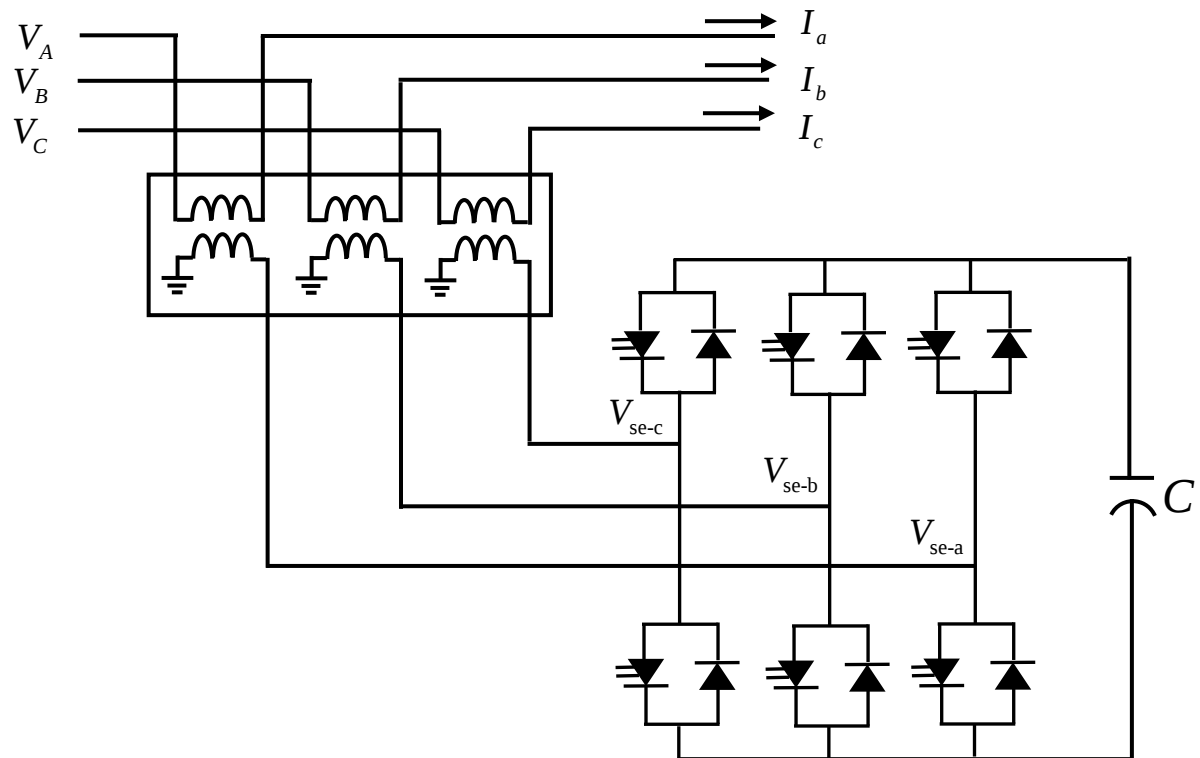


Figure III-15 Schéma de base du SSSC

III-4-6-3- dispositifs de compensation dynamique hybrides "série-parallèle"

III-4-6-3-1- Compensateur universel UPFC

⇒ **Définition** [28]

L'UPFC (Unified Power Flow Controller), appelé aussi Déphaseur Régulateur Universel (DRU) ou variateur de charge universel, est l'un des plus performants des composants FACTS. Il est capable de contrôler, simultanément et indépendamment, la puissance active et la puissance réactive de la ligne.

L'originalité de ce compensateur est de pouvoir contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance dans une ligne électrique : la tension, l'impédance de la ligne, le déphasage des tensions aux extrémités de la ligne.

En principe, l'UPFC est capable d'accomplir les fonctions des autres dispositifs FACTS à savoir le réglage de la tension, la répartition de flux d'énergie, l'amélioration de la stabilité et l'atténuation des oscillations de puissance.

Le dispositif UPFC est constitué de deux onduleurs triphasés de tension à thyristors GTO, l'un connecté en parallèle au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur triphasé et l'autre connecté en série avec le réseau via trois transformateurs monophasés dont les primaires sont reliés, entre eux, en étoile

Les deux onduleurs sont interconnectés par un bus continu et par un condensateur de filtrage comme indiqué sur la figure III-16.

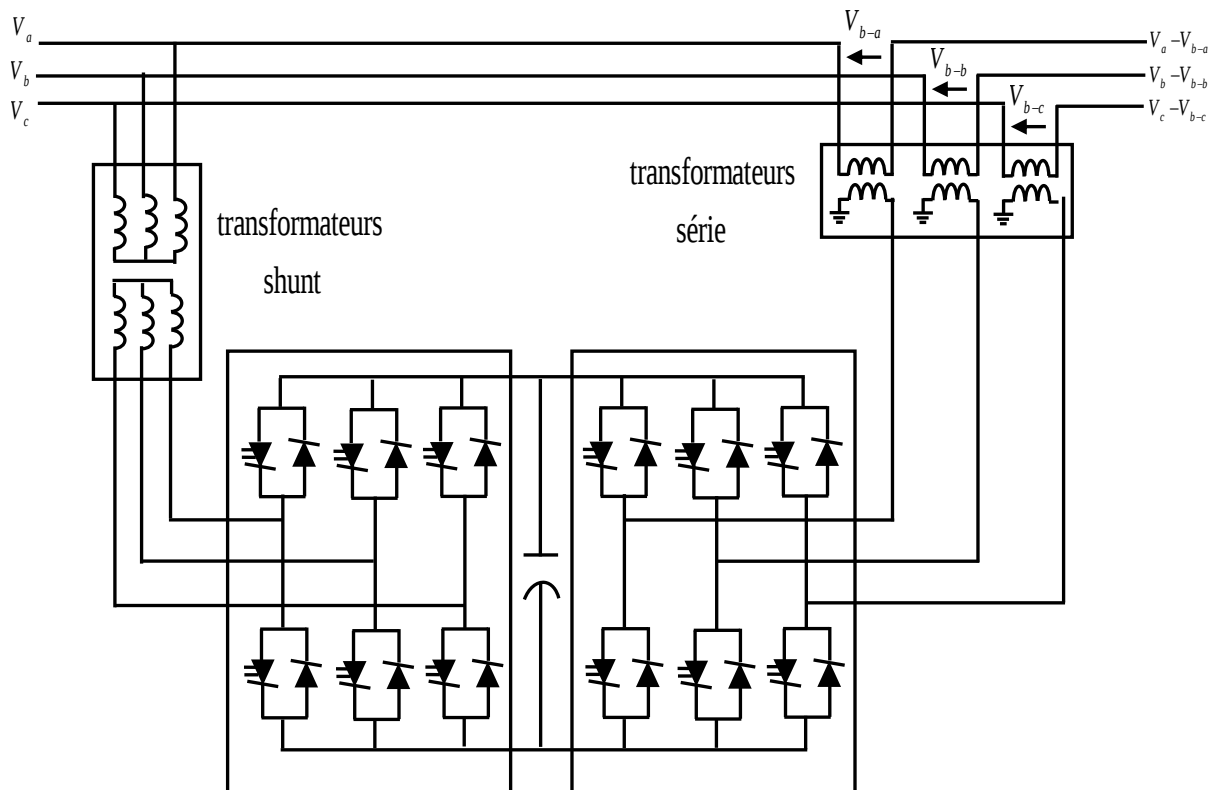


Figure III-16 Schéma simplifié d'un UPFC connecté au réseau électrique

L'onduleur série injecte une tension à la même fréquence que celle du réseau et dont l'amplitude et la phase est ajustable. Ce réglage d'amplitude et de phase permet d'obtenir trois modes de fonctionnement de la partie série :

- Contrôle de tension : la tension injectée est en phase avec celle du côté shunt.

- Contrôle de l'impédance de ligne : la tension injectée est en quadrature avec le courant de ligne. Ce mode permet de faire varier l'impédance de la ligne comme un compensateur série.
- Contrôle de phase : l'amplitude et la phase de la tension injectée sont calculées de manière à obtenir le même module de la tension avant et après l'UPFC.

Le but principal de ces trois modes de fonctionnement est le contrôle des puissances active et réactive qui transitent dans la ligne. De plus, l'UPFC est capable de combiner les différentes compensations et de basculer d'un mode de fonctionnement à un autre.

La partie shunt peut être utilisée afin de compenser la puissance réactive pour le maintien du plan de la tension au nœud S et éventuellement fournir de la puissance active injectée dans le réseau par la partie série.

Le modèle mathématique de l'UPFC est établi dans le but d'étudier les relations entre le réseau électrique et l'UPFC en régime stationnaire. Le schéma de base est donné sur la figure III-17. Cette figure représente un schéma unifilaire d'un réseau électrique et d'un UPFC installé dans une ligne de transport.

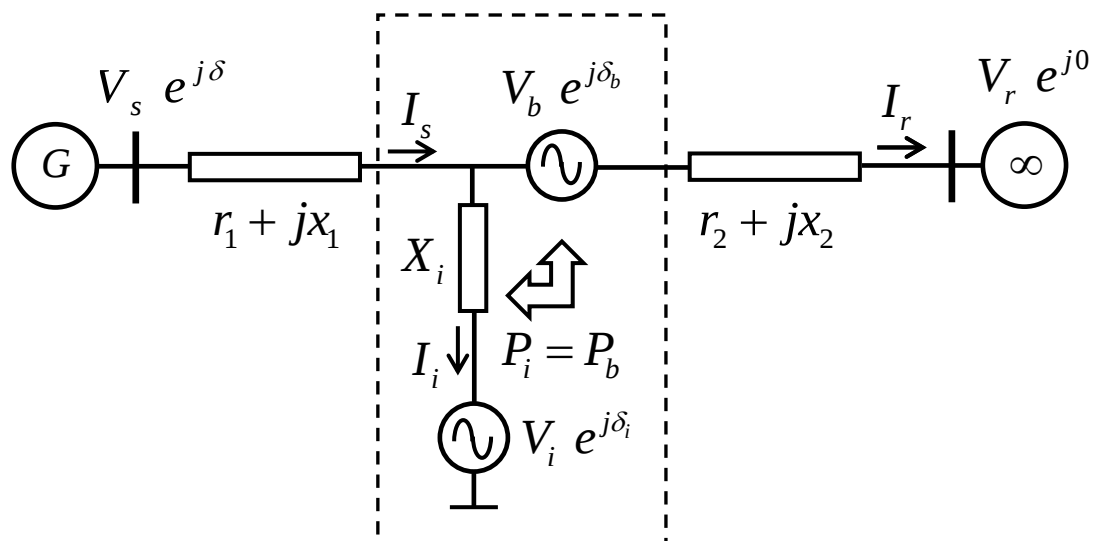


Figure III.17 Modèle mathématique de UPFC et le système de transmission

III-5- Conclusion

Dans ce chapitre, nous sommes intéressés aux méthodes utilisées pour remédier les différentes perturbations électriques induites par le four à arc, tel la compensation classiques, le filtrage passif, et on termine ce chapitre par des généralités sur les dispositifs « FACTS » et ces application dans le réseau électrique

Chapitre IV : Modélisation et Application

IV-1-Introduction :

Les performances élevées du **four électrique à arc** (passé de 4 coulées par jour avant guerre à plus de 25 coulées par jour en 1990), pour un investissement relativement modeste, et les disponibilités en ferrailles expliquent la place prépondérante prise par cet outil dans la sidérurgie moderne. Il est intéressant de constater que le four électrique moderne n'est pas tellement différent dans ses principes de celui inventé au début du siècle par Héroult.

Le four à arc est utilisé pour fournir des aciers de qualité d'une matière première de la chute en acier, donc il est indispensable actuellement de faire un modèle pour bien commander et optimiser leur fonctionnement et aussi augmenter la production, ce dernier est le but le plus demandé de tous les investisseurs en sidérurgie et dans la fabrication de l'acier [12].

IV-2- Modélisation de four à arc

Plusieurs modèles ont été proposés pendant les dernières années, surtout les modèles mathématiques avec les équations non linéaires qui représentent la nature stochastique du fonctionnement du four à arc. Mais tous ces modèles soit qui sont présentés par les électrotechniciens, les mécaniciens, les automaticiens, les métallurgistes

Sont toujours des modèles approximatifs c'est-à-dire ne donnent pas le vrai fonctionnement du four pendant ces différentes étapes, et ne tient pas compte en considérations les autres facteurs variables tel que l'humidité, la poussière, les fausses manœuvresetc.

Pour notre travail on a préféré d'utiliser un modèle qui est représenter le four par [29] :

- ⇒ Le transformateur abaisseur du four qui est représenté par la figure IV-1
- ⇒ Résistance et inductance fixe (R,L)
- ⇒ Résistance de arc: est une résistance variable par le temps est donnée par l'équation suivante :

$$R_{arc} = R_0 [1 + \sin(wt)] \quad (IV.1)$$

Avec $w = 2\pi f$.

f est la fréquence de fluctuation, qui adopte souvent la fréquence de flicker les plus sensibles (qui est 8.8Hz).

La valeur de R_0 est déterminée par la variation de la longueur de l'arc et la consommation moyenne de la puissance active de la charge. Voici la longueur de l'arc varie de 0cm à 30cm; la consommation moyenne de puissance active est 39.7MW, le résultat du calcul théorique montre que la valeur R_0 de est $3.2m\Omega$

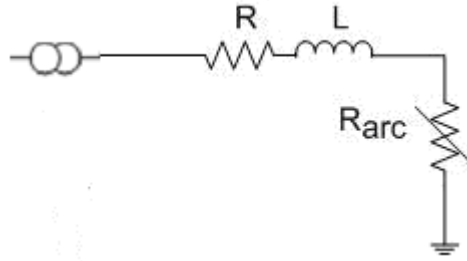


Figure IV-1 Schéma équivalent de FAE

IV-3- Modélisation de STATCOM

IV-3-1- Hypothèse simplificatrices

La modélisation de STATCOM s'appuie sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices suivant :

- Tous les interrupteurs sont supposés idéals.
- Les trois tensions de la source alternative sont équilibrées.
- Les harmoniques causées par l'action d'ouverture et de fermeture des interrupteurs sont négligées et on ne considère que le fondamentale.
- L'inductance de fuite du transformateur de couplage Parallèle du STATCOM est représentée par l'inductance L_p .

IV-3-2- Modèle Mathématique Simplifié

Le STATCOM, peut être représenté par le schéma équivalent qu'on reproduit sur la figure III.1 en tenant compte uniquement du jeu de barre où est connecte ce dispositif:

Pour le modèle simplifié du STATCOM on suppose que le circuit continu consiste en une source de tension constante, et le circuit DC ne sera pas inclus dans ce modèle. Le schéma équivalent de ce dispositif donc est une source de tension sinusoïdale connectée à un noeud du réseau par l'inductance L_{sh} du transformateur de couplage ; le circuit contient aussi une résistance en série pour représenter les pertes ohmiques du transformateur et les pertes dans les interrupteurs de l'onduleur.

Le courant du STATCOM dépend de la différence entre la tension du système V (tension au noeud) et la tension ajustable du STATCOM. On appliquant la loi d'ohm on a:

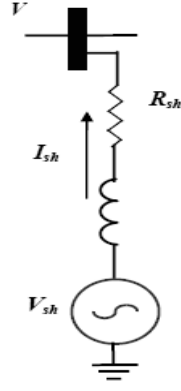


Figure IV-2 STATCOM Schéma équivalent

$$\bar{V} - \bar{V}_{sh} = R_{sh} \bar{I}_{sh} + L_{sh} \frac{d\bar{I}_{sh}}{dt} \quad (IV.2)$$

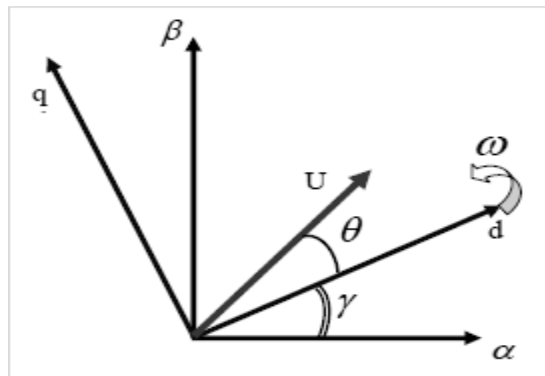
Où les grandeurs sont en triphasé :

$$\bar{V} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} ; \bar{V}_{sh} = \begin{bmatrix} V_{ash} \\ V_{bch} \\ V_{csh} \end{bmatrix} \text{ et } \bar{I}_{sh} = \begin{bmatrix} I_{ash} \\ I_{bch} \\ I_{csh} \end{bmatrix}$$

Pour simplifier ces équations on passe au repère orthogonal fixe (α, β) on multipliant l'équation (IV.1) par la matrice de la transformation de CLARK suivante:

$$T_{\alpha\beta} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{3} \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix}$$

On passe au repère tournant (d, q) , le référentiel du synchronisme, en multipliant tout les grandeurs par le phaseur $e^{-j\gamma}$ avec $\frac{d\gamma}{dt} = \omega$ la pulsation des grandeurs en question voir la (figure IV-3)

Figure IV-3 Passage du repère α, β vers le repère d, q

Donc :

$\bar{U}_{(d,q)} = \bar{U}_{(\alpha,\beta)} e^{-j\gamma}$ et inversement $\bar{U}_{(\alpha,\beta)} = \bar{U}_{(d,q)} e^{j\gamma}$ En appliquant cette écriture sur l'équation (IV.2) on aura:

$$\bar{V}^{(d,q)} \cdot e^{j\gamma} - \bar{V}_{sh}^{(d,q)} \cdot e^{j\gamma} = R_{sh} \cdot \bar{I}_{sh}^{(d,q)} \cdot e^{j\gamma} + L_{sh} \cdot \frac{d}{dt} (\bar{I}_{sh}^{(d,q)} \cdot e^{j\gamma}) \quad (IV.3)$$

Après simplification de calcul en aboutit aux équations dynamiques du STATCOM dans le repère (d,q) suivante:

$$V_d - V_{shd} = R_{sh} \cdot I_{shd} + L_{sh} \cdot \frac{dI_{shd}}{dt} - L_{sh} \cdot \omega \cdot I_{shq} \quad (IV.4)$$

$$V_q - V_{shq} = R_{sh} \cdot I_{shq} + L_{sh} \cdot \frac{dI_{shq}}{dt} + L_{sh} \cdot \omega \cdot I_{shd} \quad (IV.5)$$

Sous forme matricielle on écrit le système d'état du STATCOM comme suit:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ -\omega & -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} V_d - V_{shd} \\ V_q - V_{shq} \end{bmatrix} \quad (IV.6)$$

Où le vecteur $\begin{bmatrix} V_d - V_{shd} \\ V_q - V_{shq} \end{bmatrix}$ représente le vecteur de commande du système.

IV-3-3- Modèle Mathématique en Considérant le Circuit DC

Le modèle simplifié est dérivé sous l'hypothèse d'aucune variation de la tension continue U_{dc} durant les petites échanges de l'énergie active entre le réseau et la source DC. Lorsque la capacité de la source DC est relativement petite le modèle mathématique doit être amélioré par l'équation du circuit continu.

Le circuit continu est représenté par une source de courant connecté au condensateur C et une résistance shunt pour exprimer les pertes joules dans le circuit continue (Figure IV-4)

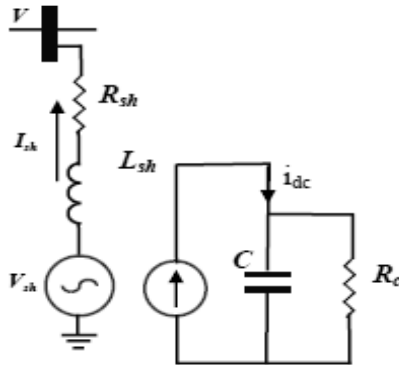


Figure IV-4 Schéma équivalent du STATCOM avec Circuit DC

On suppose que :

$$V_{sh}^{(d,q)} = V_{shd} + jV_{shq} = v \cos \theta + jv \sin \theta \quad (IV.7)$$

v : étant le module de la tension injectée qui dépend directement de la tension continue U_{dc} et peut être exprimé par:

$$v = m * U_{dc} \quad (IV.8)$$

m : est l'indice de modulation il ne dépend que du type de l'onduleur. En substituant les équations (IV.7) et (IV.8) dans les équations (IV.4) et (IV.3) on aboutit aux équations:

$$V_d - m.U_{dc} \cdot \cos \theta = R_{sh} \cdot I_{shd} + L_{sh} \cdot \frac{dI_{shd}}{dt} - L_{sh} \cdot w \cdot I_{shq} \quad (IV.9)$$

$$V_q - m.U_{dc} \cdot \sin \theta = R_{sh} \cdot I_{shq} + L_{sh} \cdot \frac{dI_{shq}}{dt} + L_{sh} \cdot w \cdot I_{shd} \quad (IV.10)$$

La puissance circulant entre le condensateur et l'onduleur de tension peut être décrite par l'équation (IV.11) et en même temps vérifie l'égalité qui suit (IV.12):

$$P_{sh} = \frac{3}{2} (V_{shd} \cdot I_{shd} + V_{shq} \cdot I_{shq}) \quad (IV.11)$$

$$U_{dc} \cdot I_{dc} = \frac{3}{2} (V_{shd} \cdot I_{shd} + V_{shq} \cdot I_{shq}) \quad (IV.12)$$

Le courant I_{dc} est défini comme étant la somme du courant capacitif " i_c " et le courant résistif " i_{rc} " dans la branche de la résistance R_{dc} .

$$I_{dc} = C \frac{dU_{dc}}{dt} + \frac{U_{dc}}{R_c} \quad (IV.13)$$

De ces équations (IV.7-8-12-13) on peut tirer l'équation dynamique du coté continue du STATCOM suivant :

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} m (I_{shd} \cos \theta - I_{shq} \sin \theta) - \frac{U_{dc}}{R_c} \quad (IV.14)$$

Les équations (IV.9-10-14) forme le système d'équation d'état du STATCOM en tenant compte des variations de la tension du circuit continu qu'on écrit sous forme matricielle suivante:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R}{L_{sh}} & w & \frac{-m}{L_{sh}} \cos \theta \\ -w & \frac{-R}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}} \sin \theta \\ \frac{3}{2} \frac{m}{C} \cos \theta & -\frac{3}{2} \frac{m}{C} \sin \theta & -\frac{1}{R_c \cdot C} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{sh}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{sh}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (IV.15)$$

On peut observer qu'il y a deux paramètres de commande dans ce système avec trois paramètres d'état à contrôler et uniquement deux grandeurs peuvent être commandées indépendamment.

Ce système qu'on doit linéariser autour d'un point de fonctionnement sera de la forme suivante :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R}{L_{sh}} & w & \frac{-m}{L_{sh}} \cos \theta_0 \\ -w & \frac{-R}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}} \sin \theta_0 \\ \frac{3m}{2C} \cos \theta_0 & -\frac{3m}{2C} \sin \theta_0 & -\frac{1}{R_c C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{sh}} & 0 & \frac{m}{L_{sh}} U_{dc0} \sin \theta_0 \\ 0 & \frac{1}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}} U_{dc0} \cos \theta_0 \\ 0 & 0 & -\frac{3m}{2C} (I_{shd} \sin \theta_0 + I_{shq} \cos \theta_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ \theta \end{bmatrix}$$

Le courant réactive est commandé indépendamment pour contrôler le flux de puissance réactive et les autres paramètres sont utilisés pour maintenir la tension continue U_{dc} constante.

IV-3-4- Contrôle du STATCOM

Dans la totalité des applications pratiques le STATCOM est utilisé principalement pour compenser la puissance réactive au jeu de barre de connexion et par conséquence maintenir la tension de ce dernier. Pour cet objectif ce dispositif injecte ou absorbe un courant I_{sh}^* , qui est l'image de la puissance à compensée. Ces courants (I_{shd}^*, I_{shq}^*) sont donc les grandeurs de références du STATOM qu'on déterminera à partir des puissances à injectées.

IV-3-4-1- Détermination des Références

Les puissances injectées par le STATCOM sont la puissance réactive Q_{sh}^* et la puissance active $P_{sh}^* \approx 0$ représentant les pertes joules dans le circuit continu et des interrupteurs dans l'onduleur.

Ces puissances qui sont les images des courants (I_{shd}^*, I_{shq}^*) active et réactive qu'on déterminer depuis le système d'équation suivant écrit dans le référentiel tournant au synchronisme (d, q) :

$$\begin{bmatrix} I_{shd}^* \\ I_{shq}^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \frac{1}{V_d^2 + V_q^2} \begin{bmatrix} V_d & -V_q \\ V_q & V_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{sh}^* \\ Q_{sh}^* \end{bmatrix} \quad (IV.16)$$

Où les tensions V_d et V_q sont les tensions du jeu de barre.

Nous pouvons résumer la méthode d'identification des courants de référence par l'algorithme de la figure IV.5 suivante:

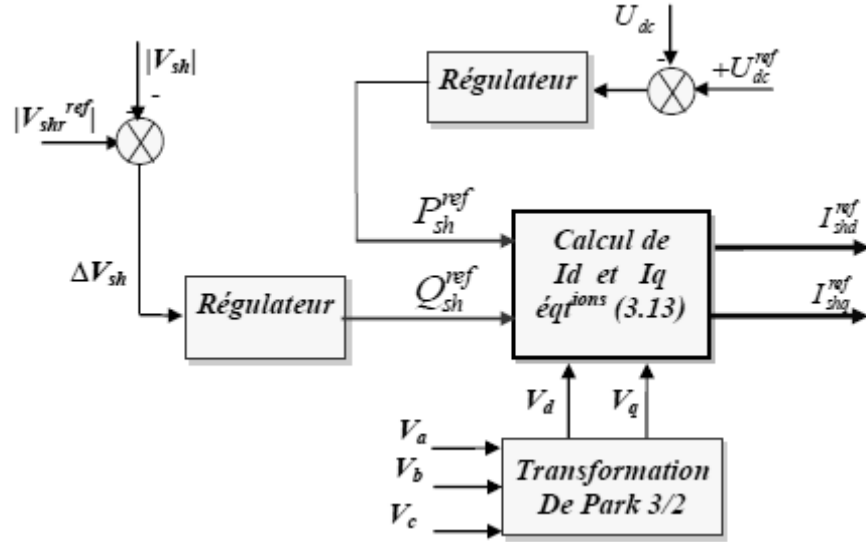


Figure. IV-5 Identification des Courants de Référence

IV-3-4-2- La méthode Watt Var découplée

Considérant le modelé simplifié représenté par le système d'équation (IV.6) précédent:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} & w \\ -w & \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} V_d - V_{shd} \\ V_q - V_{shq} \end{bmatrix}$$

Sur le vecteur de commande on effectue le changement de variable suivant :

$$\frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} V_d - V_{shd} \\ V_q - V_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \quad (IV.17)$$

Avec $X_1 = \frac{1}{L_{sh}}(V_d - V_{shd})$ et $X_2 = \frac{1}{L_{sh}}(V_q - V_{shq})$ les nouvelles grandeurs de commande.

A partir de la première équation du système (IV.6) on aura:

$$\frac{dI_{shd}}{dt} = -\frac{R_{sh}}{L_{sh}}.I_{shd} + w.I_{shq} + X_1$$

On appliquant la transformation de Laplace sur cette équation on obtient:

$$\left(S + \frac{R_{sh}}{L_{sh}} \right) . I_{shd} = w I_{shq} + X_1 = \tilde{X}_1$$

D'où on arrive au transfert I_{shd} en fonction de $\tilde{X}_1$ suivant:

$$\frac{I_{shd}}{\tilde{X}_1} = \frac{1}{S + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \quad (IV.18)$$

Notre commande en réalité est en X_1 et comme $\tilde{X}_1 = w I_{shq} + X_1$ on doit ajouter donc le terme $w I_{shq}$ pour retrouver $\tilde{X}_1$ à l'entrée de ce transfert comme l'indique le schéma de la (figure VI.6) suivante:

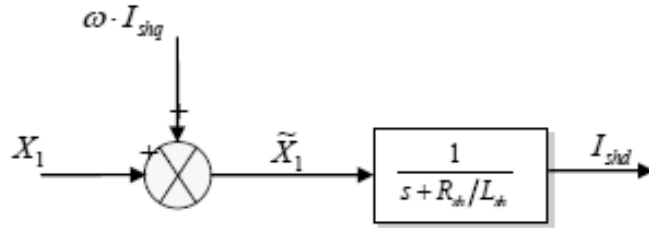


Figure IV-6 Le transfert I_{shd} en fonction de X_1

De la même manière en prenant la deuxième équation du modèle précédant on trouve le transfert I_{shq} en fonction de $\tilde{X}_2$ qui suit:

$$\frac{I_{shq}}{\tilde{X}_2} = \frac{1}{S + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \quad (IV.19)$$

$$\text{Avec } \tilde{X}_2 = -w I_{shd} + X_2$$

Le schéma suivant résume ce transfert:

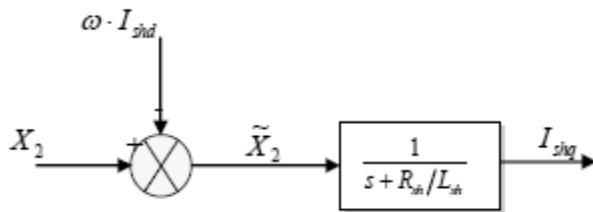


Figure IV-7 Le transfert I_{shq} en fonction de X_2

De ce qu'on vient de voir on constate qu'il y a un couplage naturelle dans les transferts des courants I_{shd} et $s I_{shq}$; pour éliminer ce couplage on utilise la méthode de compensation et avec des régulateurs PI on peut contrôler les courants de sortie du

STATCOM et les faire suivre leurs consignes I_{shd}^* et I_{shq}^* comme le représente le schéma bloc de la (figure IV-8)

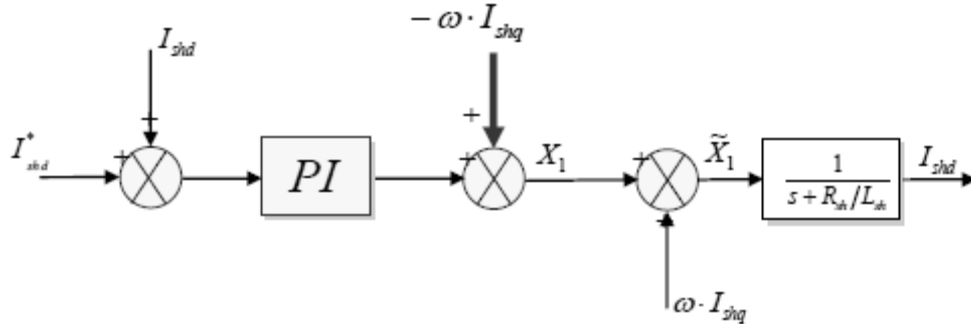


Figure IV-8 Régulation et découplage de I_{shd}

De la même pour le courant réactif on doit ajouter la composante ωI_{shd} et finalement arriver au schéma de régulation du STATCOM par la méthode Watt-Var découplée de la (figure IV-8) suivante:

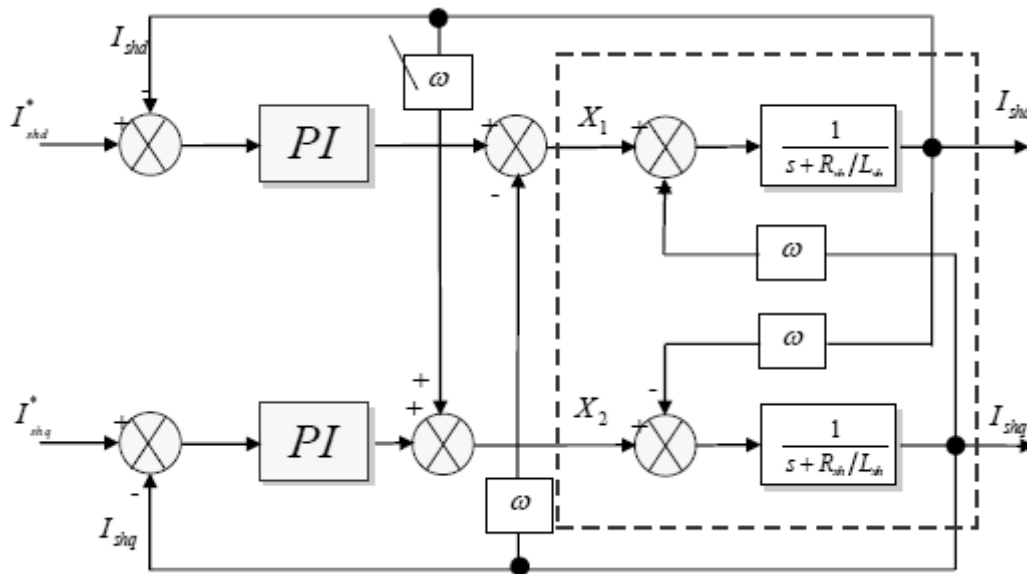


Figure IV-9 Schéma de Régulation du STATCOM (Watt-Var découplée)

IV-3-4-3- Régulateur PI avec compensation de pôles

Nous avons utilisé pour la régulation des courants du STATCOM des régulateurs proportionnels intégraux (PI) comme le montre le schéma de la figure suivante (figure IV-10):

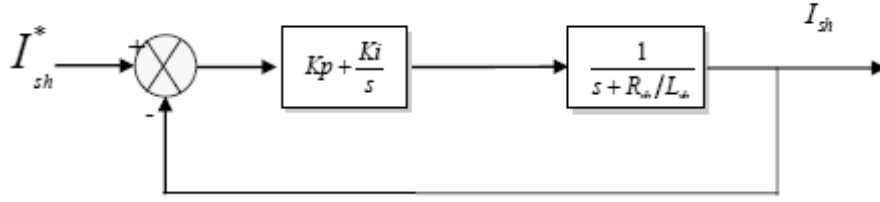


Figure IV-10 Schéma bloc de la régulation PI des courants du STATCOM

La fonction de transfert de cette régulation en boucle ouverte FTBO est:

$$G(s) = \left(Kp + \frac{Ki}{s} \right) \cdot \left(\frac{1}{s + R_{sh}/L_{sh}} \right) = Kp \left(\frac{s + Ki/Kp}{s} \right) \cdot \left(\frac{1}{s + R_{sh}/L_{sh}} \right)$$

Et par compensation du pôle on doit avoir :

$$\frac{Ki}{Kp} = \frac{R_{sh}}{L_{sh}} = \frac{1}{T_{BO}} \quad (IV.20)$$

Et $G(s)$ devient : $G(s) = Kp \left(\frac{1}{s} \right)$

T_{BO} Constante de temps en boucle ouverte.

La fonction de transfert de la régulation précédente après compensation du pôle sera de la forme qui suit:

$$F(s) = \frac{G(s)}{G(s)+1} = \frac{Kp}{s + Kp} = \frac{1}{T_{BF}s + 1}$$

$$T_{BF} = \frac{1}{Kp} \quad (IV.21)$$

Avec T_{BF} est la constante de temps de la régulation en boucle fermée.

En faisant un choix convenable du temps de réponse en boucle fermée (de l'ordre de 1/3 du temps de réponse en boucle ouverte) on déterminera à l'aide des équations (IV.20 et 21) les gains du contrôleur PI.

$$Kp = \frac{1}{3} T_{BO} = \frac{1}{3} \frac{L_{sh}}{R_{sh}} \quad \text{Et} \quad Ki = Kp * \frac{R_{sh}}{L_{sh}}$$

IV-3-4-4- Régulation de la tension continue U_{dc}

La tension continue aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur constante. La correction de cette tension doit se faire par l'adjonction d'un courant actif au courant de référence du STATCOM qui traduira l'absorption ou la fourniture d'une

puissance active sur le réseau. La puissance échangée avec le condensateur peut être exprimée par l'équation suivante:

$$P_{dc} = P_{sh} = \frac{1}{2}C \frac{dU_{dc}^2}{dt} \Rightarrow \frac{dU_{dc}^2}{dt} = \frac{2 * P_{sh}}{C} \quad (IV.22)$$

En passant au domaine fréquentiel (Laplacien) on aura :

$$\frac{U_{dc}^2}{P_{sh}} = \frac{2}{C * s} \quad (IV.23)$$

Pour obtenir le signal P_{sh} nous avons le choix entre un régulateur proportionnel et un régulateur proportionnel intégral. Ce dernier est souvent préférable du fait qu'il permet d'annuler l'erreur statique

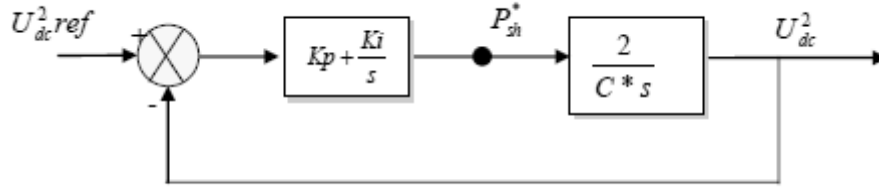


Figure IV-11 Régulation de la tension continue

La fonction de transfert en boucle fermée de ce système sous forme de Bode est

$$F(s) = \frac{U_{dc}^2}{U_{dc-ref}^2} = \frac{\frac{2Kp}{C}s + \frac{2Ki}{C}}{s^2 + \frac{2Kp}{C}s + \frac{2Ki}{C}}$$

$$\text{Avec : } w_n^2 = \frac{2Ki}{C}$$

$$\xi = Kp \cdot \sqrt{\frac{1}{2.C.Ki}} \quad (IV.24)$$

Pour avoir un bon coefficient d'amortissement du système en boucle fermée nous avons choisi $\xi = 0.7$.

Et afin d'atténuer les fluctuations à 300 Hz, et pour avoir un bon filtrage on va choisir

$$w_n = \frac{2\pi \times 300}{10} \text{ rad/sec}, \text{ et finalement on détermine à partir des équations (IV.24) les}$$

valeurs des gains Kp et Ki .

IV-3-4-5- Commande de l'Onduleur

La technique de commande appliquée sur l'onduleur de tension dans les STATCOM a pour but de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs afin que la

tension donnée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence, pour cela nous avons utilisé la méthode basée sur la MLI (modulation de largeur d'impulsion). Cette technique consiste à comparer la tension de référence de l'onduleur "Modulatrice" avec un signal en dent de scie à fréquence élevée "Porteuse", la sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs comme le montre le schéma de principe de la (Figure.IV-12)

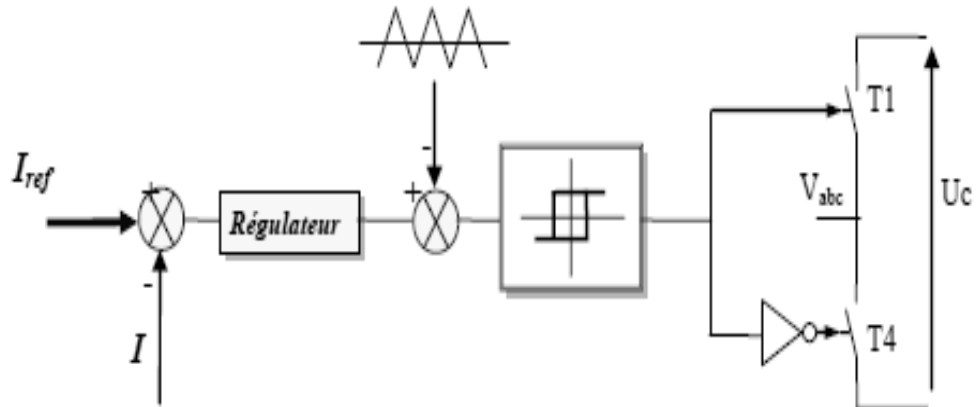


Figure IV-12 Contrôle des Onduleur par MLI

IV-4- Teste d'application

IV-4-1- Le premier teste

Alimentation du four sans STATCOM

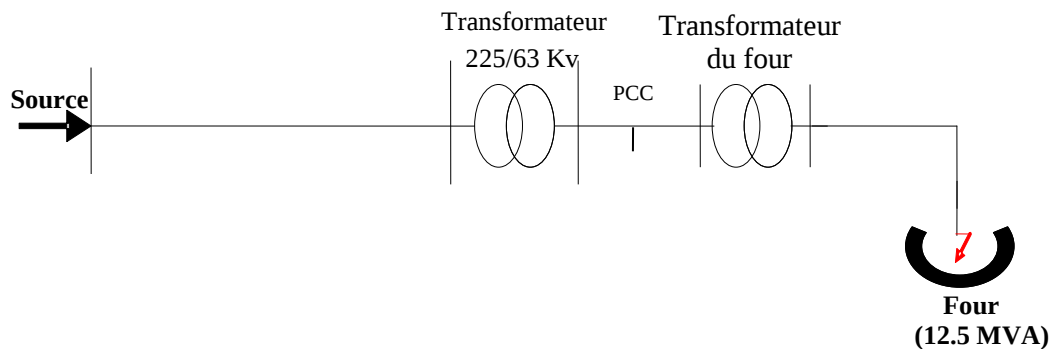


Figure IV-13 schéma de teste d'application 1(sans STATCOM)

la tension dans le point commun de couplage PCC est donne par la figure(IV14)

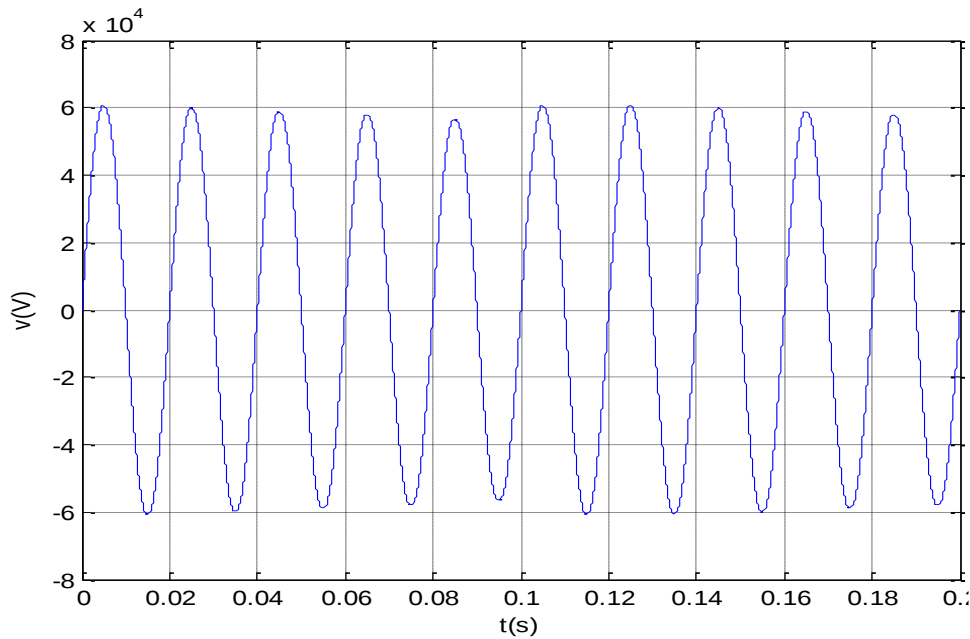


Figure IV-14 La tension de phase dans PCC (sans STATCOM)

IV-4-2- Explication du premier teste

Dans la figure (IV.13)on observe la phénomène du fluctuation dans la réponse de tension parce que les fours à arc à courant alternatif sont des grands pollueurs du réseau électrique. Ils génèrent phénomène du flicker.

Le facteur du fluctuation $\left(\frac{\Delta u}{u_n}\right)$ dans PCC il peut calcule par la relation suivant :

$$\frac{\Delta u}{u_n} = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_n} \times 100\% \quad (\text{IV.25})$$

Avec :

$U_{\max}$: valeur de tension maximum dans PCC

$U_{\min}$: valeur de tension minimum dans PCC

U_n : valeur de tension estimer dans PCC

Dans ce cas : $U_{\max} = 58681 \text{ V}$ et $U_{\min} = 54121 \text{ V}$

Le résultat du calcul théorique montre que le facteur du fluctuation de la tension dans le soit PCC est égale **7,25%**. Selon le critère de nationalité chinoise des fluctuations de tension et du flicker (GB12326-2000) le facteur de fluctuation de tension dans le PCC ne peut dépasser **2%**[29].

IV-4-3- Le deuxième teste

Alimentation du four sans STATCOM

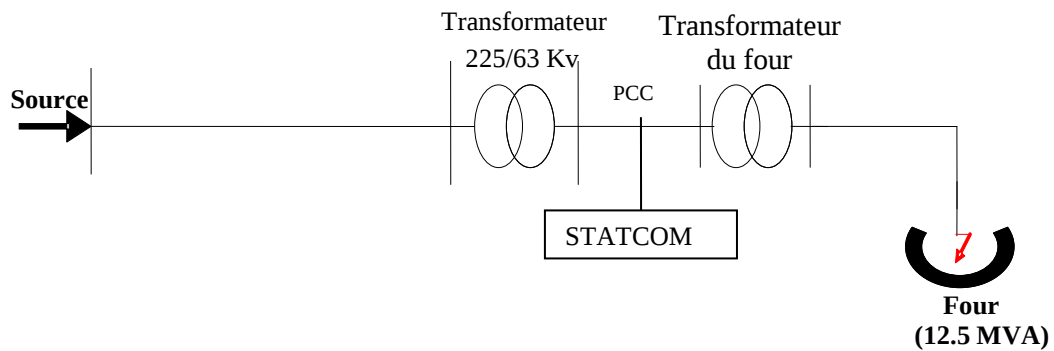


Figure IV-15 Schéma de teste d'application 2 avec STATCOM

La tension dans le point commun de couplage PCC est donnée par la figure(IV-16)

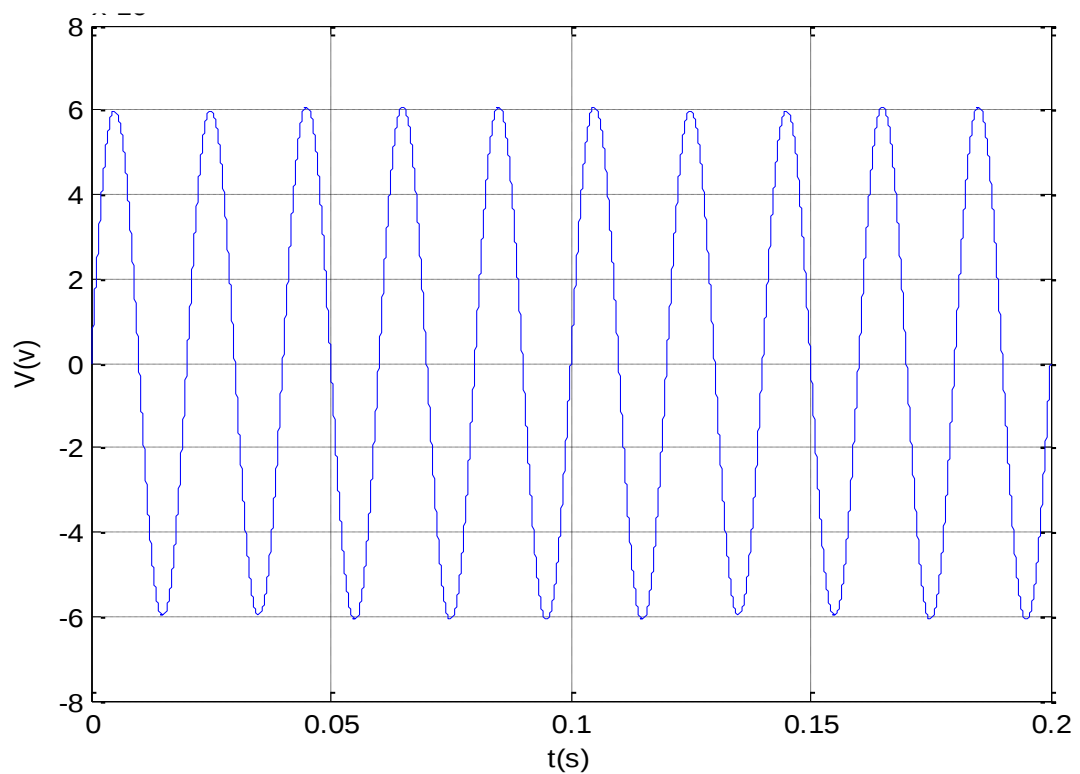


Figure IV-16 la tension de phase dans PCC avec STATCOM

IV-4-4- Explication du deuxième teste

On observe que l'onde de tension plus la idéal est obtenues, le résultat ($U_{\max} = 58736 \text{ V}$ et $U_{\min} = 57630 \text{ V}$) montre que le facteur de fluctuation de la tension est égale **1,8%** C'est dire il est conforme aux critères de nationalité chinoise.

IV-5- Conclusion

Dans ce chapitre nous présentons une stratégie alimentation flexible pour EAF qui est réalisé en utilisant un STATCOM, dans laquelle la fonction principale de STATCOM est d'atténuer la fluctuation la tension.

Les résultat , obtenus montre l'avantage de utilisation du dispositif STATCOM surtout pour la solution d' atténué le flicker génère par les fours à arc .

Conclusion Générale

Après l'étude de ce mémoire on peut conclure que:

Le four à arc est un équipement électrique très perturbateur à cause de l'instabilité de l'arc électrique. Les perturbations produites sont aléatoires et couvrent une bande de fréquence du continu jusqu'à quelques centaines de hertz. De plus, la non linéarité de l'arc produit des harmoniques (qui fluctuent aléatoirement au cours de la coulée) ainsi que des phénomènes rayonnés (bruit, champs électromagnétiques), et le déséquilibre et le flicker .

Dans le cadre de ce projet, nous avons fait une aperçue sur les perturbations induites par le four à arc, et nous validons notre théories par des études pratiques qui montrent le mauvais impacte du fonctionnement de ces fours sur le réseau électrique, surtout coté déformation de la forme d'onde « existence du phénomène du flicker ainsi que les harmoniques »

On sait que le fonctionnement du four à arc fait apparaître plusieurs perturbations telle que les harmoniques, flicker, le déséquilibre ...etc.

Plusieurs solutions d'amélioration de la qualité de l'énergie électrique, notamment la dépollution des réseaux électriques ont été déjà proposées, on peut citer le filtrage, la compensation de l'énergie réactive ...qui sont pratiquement suffisantes pour atténuer les harmoniques (rangs < 13).

On utilisé les dispositifs FACTS pour atténue les perturbations dans réseaux électrique. Ces dispositifs n'échangent pas d'énergie active avec le réseau, leur compensation n'est pas faite par des condensateurs connectées directement au réseau ce qui élimine totalement le problème de résonance synchrone qui nuit le transport électrique.

L'étude présentée dans ce mémoire s'inscrit dans ce concept et porte sur le contrôle de la tension par compensation shunt de l'énergie réactive avec un dispositif FACTS à base d'onduleur de tension STATCOM

Après l'étude accomplit dans ce mémoire concernant la compensation dynamique dans les réseaux électrique on utilisé dispositifs FACTS, on peut conclure que l'intégration de cette nouvelle technologie (FACTS) dans la structure des réseaux électriques, permet d'améliorer la qualité d'énergie électrique, et dans notre cas réduire le phénomène du flicker généré par le four à arc à courant alternatif

Annexe N° 01

❖ Caractéristiques techniques du four étudié

MODELE	80 LHF 12,5
Puissance du transformateur	12,5MVA
Tension Primaire nominale	63 KV
Fréquence	50 Hz
Diamètre des poches utilisées	Environ 3020mm
Poids nominal de coulée	80 t
Capacité de chauffage	3-4 C°/min
Diamètre cercle des électrodes	700mm
Diamètre électrode	350mm
Plage de variation de la tension secondaire à puissance apparente constante	234-265 V
Plage de variation de la tension secondaire	90-234 V
Courant secondaire maximal	31 KA
Tension de court circuit	Environ de 7%
Enroulement	Deux
Montage	Primaire : Triangle ou Etoile
	Secondaire : Triangle
Refroidissement	Circulation forcée d'huile /d'eau (OFWF)
Nombre de circulation de refroidissement	1x 100%
Nombre de niveau de tension	8
Réglage de la tension	Sélecteur entraîné par moteur et manuellement sous charge
Section de câble	4000mm ²
Section totale/phase	8000mm ²
Matière isolante	Caoutchouc
Matériaux flexibles	Caoutchouc
Matière de protection contre la chaleur	Fibre de verre
Protection anti-frottement	Anneaux en caoutchouc
Diamètre extérieur des tubes	170mm
Diamètre intérieur des tubes	146mm
Section des tubes	5956mm
Section totale par phase	5956mm
Diamètre pinces	350mm

Références bibliographique

- [1] B.Trentini , Aciéries. Évolution des procédés, Techniques de l'ingénieur, Traité Matériaux Métalliques, M 7600, pp 1-11.
- [2] M. Nadif, C. Gatellier , Influence d'une addition de (Ca ou de Mg) sur la solubilité de l'oxygène et du soufre dans l'acier liquide (étude de laboratoire), Revue de Métallurgie. CIT 83, n° 5, p. 377-394 (1986).
- [3] W.E. Schwabe, C.G. Robinson, Nouveaux développements dans l'UHP, Conférence Internationale sur le four à arcs électrique en Aciéries Cannes, 7-9 (1971).
- [4] Y .Ould Mohamed,juin (2005) , Etude de la variation de la température à l'intérieur d'un four à arc électrique, mémoire de fin d'études , université de M'sila
- [5] G. Postiglione (2006), Nouvelle alimentation pour les fours à arc à courant alternatif, thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse
- [6] Journée nationale de la sécurité, TEMOIGNAGE –SONASID-, Société nationale de l'investissement du Maroc, (2006)
- [7] C. Bas (2002) ,Nouvelle alimentation de four à arc,Thèse de docteur, Institut national polytechnique de Toulouse
- [8] P. Ayed, C. Ouvradou, J.Astier ,Aciérie électrique , Techniques de l'ingénieur, Traité Matériaux Métalliques, M 7 700, pp.1-24.
- [9] K.Tseng, Y. Wang and D. Vilathgamuwa ,An experimentally verified hybrid Cassie-Mayr Electric arc model for power electronics simulations ,IEEE, trans. Vol.12, No 3 (1997).
- [10] A. Akdag, I. Cadirci, E. Nalçaci, M. Ermis, S. Tadakuma,,Effect of Main Transformer Replacement on the Performance of an Electric Arc Furnace System, IEEE transaction on Industry applications, Vol.36, No.2 (2000).
- [11] P.Ladoux, G. Postiglione, H. Foch and J. Nuns , Comparative Study of AC/DC converters for High Power DC arc Furnace ,IEEE, trans. On Industrial Electronics Vol 52, No 3 (2005)
- [12] Y. Djeghader (2011), Étude de la propagation et caractéristiques des harmoniques stochastiques générées par un four à arc , thèse de Doctorat, université d'Annaba

- [13] P. Nyssen & al , Contrôle du four électrique grâce à un nouveau modèle métallurgique ,La Revue de Métallurgie, (1999).
- [14] H. Sticker, S.E. Stenkvis (ABB),The DC Arc Furnace: An important tool in modern Steelmaking , 4th European Electric Steel Congress, Madrid ,(1992).
- [15] P.Bianchi & al ,Optimisation de la technologie et de l'environnement du four UHP de l'usine de CAMPI de la Nuova ITALSIDER, La Revue de Métallurgie,(1985).
- [16] Roger C. Dugan , "Simulation of Arc Furnace Power System" ,IEEE, trans. On Industry Application, Vol. 16 No. 6 pp 813-18 (1980).
- [17] H. Kouara (2006) , Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension , mémoire de magister, Université de Batna
- [18] R. BENABID (2007) , optimisation multiobjectif de la synthèse des FACTS par les particules en essaim pour le contrôle de la stabilité de tension des réseaux électriques, Mémoire de Magister , Université de Laghouat
- [19] D. Ould Abdeslam (2005) , Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension , thèse de Doctorat, Université de Haute-Alsa
- [20] M. Alali (2002) , Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension, thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur – Strasbourg
- [21] L. Kartobi (2006), Optimisation de la Synthèse des FACTS par les Algorithmes Génétiques et les Essaims Particulaires pour le contrôle des Réseaux Electriques , Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique
- [22] A. ALIBI (2009) , Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS: (Flexible AC Transmission Systems), Mémoire de Magister , Université de Batna
- [23] E. Gholipour Shahraki, (2003) ,Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques, thèse de doctorat, Université de Henri Poincaré
- [24] M. Thakur (2003) ,Unified power flow controller (UPFC) development of mathematical framework and design of a transient model, thèse de magistère ,Université de Manitoba – Canada.
- [25] R. HAIMOUR (2009) , Contrôle des puissances réactives et des tensions par les dispositifs FACTS dans un réseau électrique , Mémoire de Magister, Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique d'Oran
- [26] S. Siriroj (2004),The Modeling and Control of a Cascaded-Multilevel Converter-Based STATCOM, Thèse de doctorat , Université de Blacksburg, Virginia.

- [27] J. Ndayizamba (1996) , Contribution à l'analyse de la compensation série avancée dans les réseaux de transport d'énergie électrique, Thèse de doctorat, Université de Montréal.
- [28] D. Louardi (2009) , Contrôle de l'écoulement de puissance active par système FACTS , Mémoire de Magister, Université de Batna
- [29] Y.F. Wang, J.G. Jiang, L.S. Ge et X.J. Yang , Mitigation of electric arc voltage Flicker using static synchronous compensator , IEEE ,vol 06,N 4244