

N° Order...../Faculté/UMBB/2022



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Université M'Hamed Bougara Boumerdes

Faculté des hydrocarbures et de la chimie

Département d'Automatisation des Procédés et Electrification

جامعة أمحمد بوقرة بومرداس

كلية المحروقات والكيمياء

قسم الكهرباء و آليات الطرانيق

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention
Du diplôme

MASTER

THEME :

**CONCEPTION DES CONVERTISSEURS STATIQUES
«application a la compensation des harmoniques dans les réseaux
BT»**

Présenté par:

Bouarar Adem

Ferrag Hamdi

Boumerdes 2022

Remerciements

En premier lieu, nous tenons à remercier ALLAH le tout puissant de nous avoir accordé le courage et la volonté pour accomplir ce travail.

Nous remercions, notre promoteur, Mr IDIR HABI pour nous avoir encadrés avec tant de patience, de disponibilité et de gentillesse.

Nos précieux remerciements vont également au président et membres de jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de juger ce travail.

En fin, Nous tenons à remercier les enseignants de notre département d'automatisation et électrification des procédés industrielle, qui nous ont suivis durant notre cursus, et tous ceux qui ont contribué ont contribué à ce que ce travail prenne forme.

Dédicaces

Je dédie ce projet à :

- A Ma mère qui m'a entouré d'amour, d'affection et qui fait tout pour ma réussite, que dieu la garde, tu es toujours mon bouclier
- A mon père, Tu as toujours été pour moi un exemple du père respectueux, honnête, de la personne méticuleuse, je tiens à honorer l'homme que tu es.
- Mon frère Abd-el-bari et également mon frère Amir
- A mon oncle S.Ibrahim et ma tante S.Habiba
- A mes amis(es), avec qui j'ai partagé d'agréables moments, en particulier Mouad, Hamdi, Thamer et Ahmed, Morad pour toute l'aide qui m'ont apporté

Dédicaces

Afin d'être reconnaissant envers ceux qui m'ont appuyé et encouragé à effectuer ce travail de recherche, je dédie ce mémoire :

À mon très cher père, ma très chère mère, tous les membres de ma famille sans aucune exception.

Et à tous ceux que ma réussite leur tient à cœur.

ملخص:

تحدث التيارات التوافقية بسبب الأحمال غير الخطية المتصلة بنظام التوزيع. يمكن أن تتسبب في ارتفاع درجة حرارة المحولات والكابلات والمحركات و المولدات، الأمر نفسه ينطبق على المكثفات المتصلة بنفس مصدر الطاقة مثل أجهزة التوليد التوافقي، لذلك يجب إزالتها.

يعد المرشح النشط (المتوازي) أحد أكثر الطرق استخدامًا لتقليل الاضطرابات التوافقية في الشبكات الكهربائية.

يتمثل المبدأ الأساسي لأنظمة الترشيح النشط في الحقن في مكونات شبكة إمداد الطاقة الكهربائية المساوية للاضطرابات التوافقية ولكن في معارضة الطور، يتم تنفيذ هذه العملية باستخدام محول ثابت يعدل الإشارات التي يتم حقنها من مصدر تخزين وهو بشكل عام مكثف ذو أبعاد جيدة لهذا الغرض.

في عملنا المتواضع، المقدم هنا، نقدم طريقة تسمح بتصميم المحولات الثابتة بشكل عام. تأخذ هذه الطريقة في الاعتبار توافق أنواع الأحمال والمصادر المراد توصيلها؛ كما أنه يأخذ في الاعتبار الجهد الزائد والتيارات الزائدة المرتبطة بمشاكل التبديل، مع العلم أن نظام التشغيل المعمول به للمحول الثابت هو سلسلة من الأنظمة العابرة

الكلمات الرئيسية: التوافقيات، القوة التفاعلية، المفاتيح الثابتة، التصفية النشطة، المحولات الثابتة.

Résumé :

Les courants harmoniques sont causés par des charges non linéaires connectées au système de distribution. Elles peuvent provoquer l'échauffement des transformateurs, câbles, moteurs, générateurs. Il en va de même pour les condensateurs raccordés à la même alimentation que les dispositifs générateurs d'harmoniques donc il faut les supprimer.

Une des méthodes les plus utilisées pour réduire les perturbations harmoniques dans les réseaux électriques est le filtre actif (parallèle).

Le principe de base des systèmes de filtrage actif consiste à injecter dans le réseau d'alimentation en énergie électrique des composantes égales aux perturbations harmoniques mais en opposition de phase. Cette opération est réalisée en utilisant un convertisseur statique qui module les signaux injectés à partir d'une source de stockage qui est en général un condensateur bien dimensionné à cet effet.

Dans notre modeste travail, présenté ici, nous présentons une méthode permettant la conception des convertisseurs statiques en général. Cette méthode tient compte de la compatibilité des types de charges et de sources à connecter ; elle tient compte aussi des surtensions et surintensités liés aux problèmes de commutations sachant que le régime de fonctionnement établi d'un convertisseur statique est une suite de régimes transitoires

Mot clés : Harmoniques, Puissance réactive, les interrupteurs statiques, Filtrage Actif, Convertisseurs Statiques.

Abstract:

Harmonic currents are caused by non-linear loads connected to the distribution system. They can cause overheating of transformers, cables, motors, generators. The same goes for capacitors connected to the same power supply as the harmonic-generating devices, so they must be removed.

One of the most widely used methods for reducing harmonic disturbances in electrical networks is the active (parallel) filter.

The basic principle of active filtering systems consists in injecting into the electrical power supply network components equal to the harmonic disturbances but in phase opposition. This operation is carried out using a static converter which modulates the signals injected from a storage source which is generally a capacitor well dimensioned for this purpose.

In our modest work, presented here, we present a method allowing the design of static converters in general. This method takes into account the compatibility of the types of loads and sources to be connected; it also takes into account overvoltages and overcurrents linked to switching problems knowing that the established operating regime of a static converter is a series of transient regimes

Keywords: Harmonics, Reactive power, static switches, Active Filtering, Static Converters.

Nomenclature

α_h	: Phase initiale de la tension harmonique d'ordre h,
β_h	: Phase initiale du courant harmonique d'ordre h,
φ_h	: Déphase de la tension harmonique d'ordre h sur le courant harmonique d'ordre h.
D	: Puissance déformante.
F	: Facteur de puissance.
P	: Puissance active (W).
Q	: Puissance réactive (VAR).
S	: Puissance apparente (VA).
I_h	: Courant harmonique de rang h (A).
THD	: Taux de distorsion de rang h.
f_h	: Fréquence de la composante harmonique de rang h (Hz).
f_1	: Fréquence de la composante fondamentale (Hz).
V_h	: Valeur efficace de la tension de l'harmonique de rang h (V).
V_1	: Valeur efficace de la tension du fondamental (V).
Cos	: Facteur de puissance.
L	: Inductance (H).
C	: Capacité (F).
R	: Résistance (Ω).
K	: Interrupteur K.
f	: Fréquence du réseau (50Hz)
$\bar{u}$	: Valeur moyenne de tension.
$\bar{i}$	: Valeur moyenne de courant.

Lettres Grecques

α : Rapport cyclique

ω : Pulsation du réseau = $2.\pi.f$ (rd/s)

φ : Déphasage entre la fondamentale du courant de charge et sa tension.

LISTE DES FIGURES :

Chapitre 1 :

Figure I. 1 Synthèse d'un signal à partir des harmoniques [37]	2
Figure I. 2 Structure du filtre résonant.....	11
Figure I. 3 Montage du filtre amorti	11
Figure I. 4 Structure filtres actifs parallèles	13
Figure I. 5 Structure filtres actifs série	14
Figure I. 6 Structure de filtre actif mixte (série et parallèle)	14

Chapitre 2 :

Figure II. 1 Schéma de la relation entre les convertisseurs statiques.....	17
Figure II. 2 Convertisseur Continu (DC) - Continu (DC)	17
Figure II. 3 symbole de transistor.....	18
Figure II. 4 Les deux cas du transistor.....	18
Figure II. 5 courant continu dont le modèle électrique.....	19
Figure II. 6 Figure de deux interrupteurs K1 et K2 ce qu'on demande aux semi-conducteurs de réaliser.	19
Figure II. 7 les allures de la tension et de courant (hacheur)	20
Figure II. 8 Hacheur série.....	21
Figure II. 9 Symbole d'hacheur	21
Figure II. 10 Hacheur série.....	21
Figure II. 11 hacheur série fonctionnement a courant ininterrompu dans la charge.....	22
Figure II. 12 Hacheur parallèle.....	24
Figure II. 13 Hacheur parallèle. Fonctionnement a courant ininterrompu dans la charge.	25
Figure II. 14 Convertisseur (AC) - (AC)	26
Figure II. 15 Montage à deux thyristors en « tête-bêche »	26
Figure II. 16 Montage à triac.	26
Figure II. 17 Gradateur charge résistive.....	27
Figure II. 18 Tensions des grandeurs « v » et U_c	27
Figure II. 19 Impulsions de commande « i_{G1} et i_{G2} » des thyristors Th1 et Th2	27
Figure II. 20 Courant efficace en fonction de (α)	28
Figure II. 21 Montage étoile des récepteurs.....	28
Figure II. 22 Montage triangle des récepteurs	28
Figure II. 23 Gradateur en étoile	29
Figure II. 24 Gradateur en triangle	29
Figure II. 25 Allure de la tension (v_1).....	29
Figure II. 26 Convertisseur (AC) - (AC)	30
Figure II. 27 Onduleurs en cas de fermeture de K1 et K3 (pour $0 < t < T/2$).....	31
Figure II. 28 Onduleurs en cas de fermeture de K2 et K4 (pour $T/2 < t < T$)	31
Figure II. 29 l'allure des courants.....	33
Figure II. 30 Courbe des allures de courant et de tension (charge inductive RL)	33
Figure II. 31 Convertisseur (AC) - (DC)	34
Figure II. 32 Redresser monophasé simple alternance.....	34

Figure II. 33 Courbe de tension de la charge et de diode (redresseur monophasé simple alternance).....	34
Figure II. 34 Schéma redresseur monophasé double alternance	35
Figure II. 35 Courbe de tension de la charge et de diode (redresseur monophasé double alternance).....	35
Figure II. 36 schéma de redresseuse simple alternance triphasée	36
Figure II. 37 Courbe de tension de la charge et de diodes (redresseuse simple alternance triphasée).....	36
Figure II. 38 schéma de redresseuse double alternance triphasée.....	36
Figure II. 39 Courbe de tension de la charge et de diodes (redresseuse double alternance triphasée).....	37
Figure II. 40 Redresseur commandé simple alternance	37
Figure II. 41 Courbe de tension de la charge (Redressement commandé simple alternance).....	38
Figure II. 42 Redressement commandé double alternance	38
Figure II. 43 Courbe de tensions et de courant (cas de redressement Monophasé commandé double-alternance)	39
Figure II. 44 commandé double alternance (Pont tout thyristors)	39
Figure II. 45 Courbe de tensions et de charge et de thyristors (Cas de redressement Monophasé commandé double-alternance - Pont tout thyristors)	40
Figure II. 46 Redresseur triphasé commandé simple alternance	40
Figure II. 47 Redresseur triphasé commandé double alternance (Pont triphasé mixte). 41	
Figure II. 48 Les courbes de tension cas de Redressement triphasé commandé double alternance (Pont triphasé mixte).....	41
Figure II. 49 Symbole de diode.	42
Figure II. 50 Principe de fonctionnement de diode	42
Figure II. 51 Caractéristique Tension-Courant de diode.	43
Figure II. 52 Symbole de thyristor.....	43
Figure II. 53 Caractéristique Tension-Courant de thyristor.	44
Figure II. 54 Thyristor GTO	45
Figure II. 55 Symbole de triac.....	46
Figure II. 56 Caractéristique Tension-Courant de triac	46
Figure II. 57 Symbole de transistor MOS.	47
Figure II. 58 Symbole de transistor bipolaire de puissance.	47
Figure II. 59 Caractéristique statique d'un Transistor.	48
Figure II. 60 Caractéristique statique et dynamique d'un IGBT	48
Figure II. 61 Caractéristique statique et dynamique d'un MOSFET	49
Figure II. 62 les états stables d'interrupteurs.....	50
Figure II. 63 Fonction avec commutation commandées	50
Figure II. 64 Les quatre interrupteurs fondamentaux.	52
Figure II. 65 Source de tension	53
Figure II. 66 Condensateur	54
Figure II. 67 Source de courant	54
Figure II. 68 Inductance	54
Figure II. 69 Cellule de commutation.....	57
Figure II. 70 schéma d'un convertisseur statique.....	58
Figure II. 71 Circuit d'un hacheur	58

Figure II. 72 Chronogramme de fonctionnement d'hacheur	59
Figure II. 73 Les chronogrammes des grandeurs V_k et i_K et les points figuratif des plan V_k et i_k	60
Figure II. 74 Chronogramme des grandeur V_k et i_k des interrupteurs d'hacheur série	60
Figure II. 75 Structure générale d'un filtre actif parallèle.....	61
Figure II. 76 Filtre actif parallèle à structure de tension	62
Figure II. 77 Schéma synoptique d'un filtre actif parallèle.....	62

Chapitre 3 :

Figure III. 1 Circuit d'un hacheur	64
Figure III. 2 Le schéma de simulation d'un partie de système (filtre actif).....	66
Figure III. 3 l'évolution du courant à travers l'interrupteur K_1	66
Figure III. 4 Circuit graphe courants dans les interrupteurs et tensions à leurs bornes	67
Figure III. 5 Circuit graphe courants dans les interrupteurs et tensions à leurs bornes	67
Figure III. 6 Circuit caractéristiques statiques des interrupteurs.....	68
Figure III. 7 Schéma du filtre sans les diodes	69
Figure III. 8 Schéma du filtre avec les diodes.....	69

LISTE DE TABLEAUX :

Table 1 : Le tableau des interrupteurs statiques	52
--	----

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
I. Chapitre 1 PROBLEMATIQUE DES HARMONIQUES, ETAT DE L'ART.....	2
I.1. Introduction :	2
I.2. Définition de la pollution harmonique :	2
I.3. Caractéristiques de l'onde de tension et de courant :	3
I.3.1. Valeurs efficaces :	3
I.3.2. La puissance apparente :	3
I.3.3. Les puissances actives, réactives et déformantes :	3
I.4. Facteur de puissance :	4
I.5. Origines des harmoniques :	5
I.5.1. Exemple d'application des convertisseurs statique :	5
I.6. Conséquences de la pollution harmonique :	6
I.6.1. Effets instantanés :	6
I.6.2. Effets à terme :	7
I.7. Harmonique de rang h :	8
I.7.1. Taux de distorsion harmonique (THD) [6]:	8
I.7.2. Définition de THD avec la valeur efficace globale :	8
I.7.3. Taux de distorsion harmonique (THD) totale [6]:	9
I.8. Stratégies De Limitation Des Harmoniques :	9
I.8.1. Principe de compensation :	9
I.9. Solutions traditionnelles de la dépollution :	10
I.9.1. Filtrage passif :	10
I.9.2. Filtrage Actif :	12
I.10. Conclusion :	15
II. Chapitre 2 COMMUTATION DANS LES CONVERTISSEURS.....	16
II.1. Les convertisseurs statiques :	16
II.2. Origine des convertisseurs de puissance électrique :	16
II.3. Familles de convertisseurs statiques :	17
II.3.1. Les hacheurs :	17
II.3.2. Les Gradateurs :	25
II.3.2.1. Généralités	25
II.3.3. Les Onduleurs :	30
II.3.4. Les Redresseurs :	33

II.4. Les interrupteurs de puissance :.....	41
II.4.1. Introduction :.....	41
II.4.2. Diode de puissance :.....	42
II.4.3. Le thyristor :.....	43
II.4.4. Le thyristor GTO :.....	45
II.4.5. Le Triac :.....	45
II.4.6. Le Transistor :	47
II.5. Interrupteurs statiques :	49
II.5.1. Fonction élémentaire du travail en commutation :.....	49
II.5.2. Fonction avec commutation commandées :	50
II.5.3. Interrupteurs électroniques fondamentaux :.....	50
II.5.4. Performances des interrupteurs électroniques :.....	53
II.6. Compatibilité des Sources de tension et de courant [40] :	53
II.6.1. Source de tension parfaite :	53
II.6.2. Source de courant parfait :	54
II.6.3. Réversibilité des sources d'entrée et de sortie :	55
II.6.4. Règles d'interconnexion des sources :	56
II.6.5. Conclusion :.....	57
II.7. Méthode de travail :.....	57
II.8. Les moyens de compensation des harmoniques :.....	60
II.8.1. Le Filtre actif :.....	60
III.1. Introduction :.....	64
III.2. Description du système :.....	64
III.3. Calculer les courants dans les interrupteurs et tensions à leurs bornes :.....	66
III.4. Conclusion :	70
Conclusion Générale	71
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	63

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La présence d'harmoniques dans les systèmes électriques signifie que le courant et la tension sont déformés et s'écartent de formes d'ondes sinusoïdales ce qui est néfaste pour la majorité des appareils électriques en général.

Les courants harmoniques sont causés par des charges non linéaires connectées au système de distribution. Une charge est dite non linéaire lorsque le courant qu'elle absorbe n'a pas la même forme d'onde que la tension d'alimentation. La circulation de courants harmoniques dans les impédances du réseau crée ensuite des harmoniques de tension, qui déforment la tension d'alimentation. Ce travail s'intéresse à conception des convertisseurs (onduleurs) utilisés pour la compensation des perturbations harmoniques à l'aide d'un filtre actif.

Ce rapport de mémoire est composé de quatre chapitres qui se résument dans ce qui suit :

Dans le premier chapitre, nous abordons la pollution des réseaux par les harmoniques, leurs origines, leurs effets sur les équipements industriels. Puis, les différentes solutions et les moyens utilisés pour pallier ce problème (filtrage) sont filtrage passif, actif et hybride, on se focalisera ensuite sur le filtrage actif parallèle, en analysant les différents types de filtres, leur modélisation et leur structure.

Dans le deuxième chapitre on parle sur les convertisseurs statiques et leurs applications, les interrupteurs statiques et leurs caractéristiques statiques et on parle sur les moyens de compensation des harmoniques exactement les filtres actifs (filtre actif parallèle).

Dans le troisième chapitre, présentation de schéma du filtre puis simulation du système en utilisant le logiciel de simulation MATLAB. Calcule les courants et les tensions aux bornes des interrupteurs de filtre et déduire leurs caractéristiques statiques pour choisir les composants adéquats.

Finalement Une conclusion générale.

Chapitre 01

**Problématique des harmoniques, Etat de
l'art**

I. Chapitre 1

PROBLEMATIQUE DES HARMONIQUES, ETAT DE L'ART

I.1. Introduction :

L'énergie électrique est produite sous forme de système de tensions triphasées, sinusoïdales et équilibrées, dont les paramètres caractéristiques sont la fréquence, l'amplitude et la forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde. L'utilisation croissante de charges polluantes provoque de plus en plus des problèmes de perturbation au niveau des réseaux électriques. Ces perturbations ont des effets néfastes sur le fonctionnement et la durée de vie des équipements électriques. Donc, pour éviter le dysfonctionnement des équipements, des moyens de compensation sont utilisés tels que les filtres passifs, actifs ou hybrides.

I.2. Définition de la pollution harmonique :

La pollution harmonique est un problème relativement récent qui est apparu avec les progrès de l'électronique et de l'électronique de puissance [1].

La présence d'harmoniques dans les systèmes électriques signifie que le courant et la tension sont déformés et s'écartent de formes d'ondes sinusoïdales.

Les harmoniques sont les composantes sinusoïdales d'une tension ou d'un courant dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale. Ces harmoniques sont produits en grande proportion et avec des niveaux de distorsion élevés par les charges domestiques et industrielles.

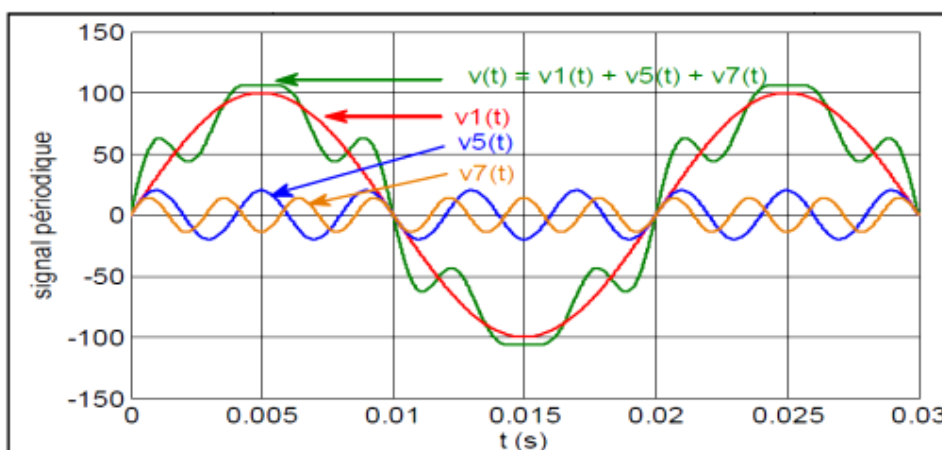


Figure I. 1 Synthèse d'un signal à partir des harmoniques [37]

Les consommateurs générateurs d'harmoniques sont présents dans tous les secteurs industriels, tertiaires et domestiques. Ceci est la conséquence de la prolifération des alimentations à découpage et des convertisseurs statiques dont le régime de fonctionnement permanent est une suite périodique de régimes transitoires. Les harmoniques sont le fait d'une charge non-linéaire (le courant qu'elle absorbe n'a pas la même forme que la tension qui l'alimente).

Ces signaux périodiques peuvent être décomposés comme suit en utilisant les séries de Fourier :

- Une valeur moyenne lorsque la grandeur n'est pas symétrique à l'axe des abscisses.
- Une composante fondamentale correspondant à la période de la grandeur considérée
- Plusieurs composantes de fréquences multiples de celle du fondamental.

Dans le cas où la tension et le courant seraient non-sinusoïdaux, ils peuvent être mis sous la forme donnée respectivement par (I.1) et (I.2) :

$$v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \sqrt{2} \sin(n \cdot \omega \cdot t - \alpha_n) + V_0 \dots\dots\dots (I.1)$$

$$i(t) = \sum_{m=1}^{\infty} I_m \sqrt{2} \sin(n \cdot \omega \cdot t - \beta_n) + I_0 \dots\dots\dots (I.2)$$

I.3. Caractéristiques de l'onde de tension et de courant :

I.3.1. Valeurs efficaces :

Les valeurs efficaces de la tension et du courant sont données respectivement par les équations [3] :

$$V = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \dots\dots\dots (I.3)$$

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_n^2} \dots\dots\dots (I.4)$$

I.3.2. La puissance apparente :

La puissance apparente est la puissance disponible, son expression est donnée par l'équation :

$$S = VI = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_k^2} \dots\dots\dots (I.5)$$

I.3.3. Les puissances actives, réactives et déformantes :

La puissance active est la puissance qui se transforme en travail, elle est mesurée en Watt, son expression est donnée par l'équation :

$$p = \frac{1}{T} \int_T v(t) \cdot i(t) dt = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cdot I_h \cos \varphi_h \dots\dots\dots (I.6)$$

$$\varphi_h = \alpha_h - \beta_h$$

α_h : Phase initiale de la tension harmonique d'ordre h.

β_h : Phase initiale du courant harmonique d'ordre h.

φ_h : Déphase de la tension harmonique d'ordre h sur le courant harmonique d'ordre h.

La puissance réactive est une puissance qui est absorbée au réseau et qui ne se transforme pas en travail. Elle est mesurée en VAR et son expression est donnée par :

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cdot I_h \cdot \sin \varphi_h \dots \dots \dots (I.7)$$

La puissance déformante est donnée par :

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2 \cdot \sum_{n \neq h}^{\infty} I_h^2} \dots \dots \dots (I.8)$$

Cette puissance est véhiculée par les tensions et les courants harmoniques de rang différents, elle est dite puissance déformante et notée D.

I.4. Facteur de puissance :

Le facteur de puissance est donné par :

$$F = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos \varphi_h}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h}} \dots \dots \dots (I.9)$$

Pour une meilleure compréhension, nous allons mettre en évidence quelques effets des harmoniques dans le cas où la tension est sinusoïdale :

- Valeur instantanée de la tension et du courant :

$$v(t) = V_1 \sqrt{2} \sin(\omega \cdot t - \alpha_1) \dots \dots \dots (I.10)$$

$$i(t) = V_1 \sqrt{2} \sin(h \cdot \omega \cdot t - \beta_h) \dots \dots \dots (I.11)$$

Avec: $\varphi_1 = \alpha_1 - \beta_1$

- Puissance active et réactive :

$$P = V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 \dots \dots \dots (I.12)$$

$$Q = V_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1 \dots \dots \dots (I.13)$$

- Facteur de puissance :

$$F = \frac{P}{S} = \frac{V_1 I_1 \cos \varphi_1}{V_1 \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}} = \cos \varphi_1 \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{D^2}{P^2 + Q^2}}} \dots \dots \dots (I.14)$$

De l'équation (I.11), nous pouvons conclure que les courants harmoniques accroissent la valeur efficace, donc il aura une augmentation des pertes par effets Joules.

Les composantes harmoniques véhiculent une puissance harmonique dite déformante, parce qu'elle est créée par les harmoniques et que ces derniers déforment l'onde sinusoïdale. [11].

De (I.14), nous pouvons aisément voir que F est inférieur à 1, les harmoniques réduisent le facteur de puissance donc réduisent la puissance disponible.

I.5. Origines des harmoniques :

La prolifération des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique des réseaux électriques. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et ainsi polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique.

I.5.1. Exemple d'application des convertisseurs statique :

Le spectre des applications des convertisseurs statiques est très varié

1. Applications domestiques :

- Eclairage,
- Petit électroménager (robot...).
- Chauffage / ventilateurs.
- Pompes.
- Réfrigérateur / congélateurs.
- Chaudière à gaz et à fioul.
- Gros électroménager (lave-linge, lave-vaisselle, aspirateur,...).
- Actionneurs domotiques (volets roulants, stores électriques, ...).
- Cuisine (plaques à induction, four à micro-ondes) : ascenseurs/ monte-charges.
- Eau chaude sanitaire (cumulus).
- Régulateur de charge pour aérogénérateur (éolienne) et / ou générateur photovoltaïque

2. Locaux commerciaux et tertiaires :

- Chauffage/ Ventilation/Climatisation.
- Caisses enregistreuses.
- Eclairage.
- Onduleur de secours.
- Ordinateurs et équipement de bureaux.
- Ascenseurs/ Monte- charges.

3. Application industrielle :

- Pompe.
- Compresseurs, souffleries.
- Lasers.
- Machine- outils /robots.
- Chauffage par induction.
- Chariots électriques.
- Générateurs à ultrasons.....

4. Société :

- Eclairage public.
- Publicité lumineuse.
- Emetteurs de radiodiffusion et télévision.
- Journaux électriques

5. Télécommunications :

- Emetteurs de radiodiffusion.
- Chargeur de batterie.
- Onduleurs de secours et alimentations secourues (en alternatif et en continu)

6. Autres applications :

Les convertisseurs statiques sont aussi utilisés dans le domaine d'aéronautique et spatial, dans les transports terrestres et marins, dans les compagnies de production et de distribution d'énergie électrique, dans les espaces culturels et de loisirs (monuments, scènes, théâtres, discothèques ...), dans les appareils de laboratoires et dans la médecine. On en trouve aussi des applications à partir de quelques watts (alimentations à découpage) et jusqu'à quelques milliers de mégawatts (liaisons haute tension en courant continu).

Source [2].

I.6. Conséquences de la pollution harmonique :

Les problèmes engendrés par la présence d'harmoniques sur le réseau sont : une augmentation de la valeur efficace du courant global consommé et une diminution du facteur de puissance entraînant deux types de nuisances :

I.6.1. Effets instantanés :

Les effets instantanés apparaissent immédiatement dans certains appareillages :

- **Défauts de fonctionnement de certains équipements électriques :** En présence d'harmoniques, la tension et le courant peuvent changer plusieurs fois de signe dans

une demi période. Les appareils dont le fonctionnement est basé sur le passage à zéro des grandeurs électriques peuvent être affectés.

- **Troubles fonctionnels des micro-ordinateurs :** Les effets sur ces équipements peuvent se manifester par la dégradation de la qualité de l'image et par des couples pulsatoires des moteurs d'entraînement de disque.
- **Erreurs dans les appareils de mesure :** Certains appareils de mesure et les compteurs d'énergie à induction présentent des dégradations de mesure des erreurs de lecture supplémentaires en présence d'harmoniques.
- **Vibrations et bruits :** Les courants harmoniques génèrent également des vibrations et des bruits acoustiques, principalement dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances et machines tournantes) [4].

I.6.2. Effets à terme :

- **L'échauffement :** Les pertes totales par effet Joule sont la somme de celles du fondamental et des harmoniques :

$$P_{\text{pert}} = \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 R \dots \dots \dots (I.15)$$

- ✓ Echauffement des câbles et des équipements : Ces effets peuvent être à moyen terme (de quelques secondes à quelques heures) ou à long terme (de quelques heures à quelques années) et concernent les câbles qui peuvent être le siège du sur échauffement du neutre et les enroulements comme pour les transformateurs ou les moteurs.
- ✓ Echauffement des condensateurs : L'échauffement est causé par les pertes dues au phénomène d'hystérésis dans le diélectrique. Les condensateurs sont donc sensibles aux surcharges, quelles soient dues à une tension fondamentale trop élevée ou à la présence d'harmoniques. Ces échauffements peuvent conduire au claquage.
- ✓ Echauffement due aux pertes supplémentaires des machines électriques et des transformateurs : L'échauffement est causé par les pertes dans le stator des machines électriques et principalement dans leurs circuits rotoriques à cause des différences importantes de vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor.
- **L'interférence dans les systèmes de télécommunication :** Le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et de télécommunication peut provoquer des interférences. L'importance de ces interférences est fonction de l'amplitude et de la fréquence des courants électriques ainsi que de l'importance

du couplage électromagnétique entre les réseaux. Dans le cas de résonance, une partie des réseaux de télécommunication peut-être rendue inutilisable. On parle ici de compatibilité Electromagnétique (C.E.M) afin de caractériser l'aptitude d'un appareil, ou d'un dispositif, à fonctionner normalement dans un environnement électromagnétique sans produire lui-même des perturbations nuisibles aux autres appareils ou dispositifs [5].

I.7. Harmonique de rang h :

L'harmonique de rang h (communément appelé "harmonique h") d'un signal est la composante sinusoïdale dont la fréquence est h fois la fréquence fondamentale

- L'équation de la décomposition harmonique d'une fonction périodique $y(t)$ est présentée ci-dessous :

$$y(t) = Y_0 + \sum_{h=1}^{h=\infty} Y_h \sqrt{2} \sin(h\omega t - \varphi_h) \dots\dots\dots (I.16)$$

Y_0 : valeur de la composante continue généralement nulle et considère comme telle ci-après

Y_h : valeur efficace de l'harmonique de rang h.

ω : vitesse angulaire de la fréquence fondamentale.

φ_h : phase de la composante harmonique a $t = 0$.

I.7.1. Taux de distorsion harmonique (THD) [6]:

Le taux de distorsion harmonique se mesure normalement harmonique par harmonique dans les phases de conception et d'essai des matériels. L'indication de la répartition des harmoniques permet, en effet, de diagnostiquer l'origine des non-linéarités. Certaines formes de distorsion peuvent être plus indésirables que d'autres.

Dans une définition ancienne, on calcule le taux d'harmonique par rapport au fondamental (harmonique 1).

$$THD = 100 \frac{V_h}{V_1} \dots\dots\dots (I.17)$$

Où h est le rang de l'harmonique, V_h la valeur efficace de l'harmonique de rang h , V_1 étant celle de l'harmonique 1, le fondamental.

I.7.2. Définition de THD avec la valeur efficace globale :

$$THD = 100 \frac{V_h}{V} = 100 \frac{V_h}{\sum_{h=1}^H V^2_h} \dots\dots\dots (I.18)$$

I.7.3. Taux de distorsion harmonique (THD) totale [6]:

Le taux de distorsion harmonique totale ((en) THD Total Harmonic Distortion) se définit comme le rapport entre la valeur efficace de l'ensemble des composantes harmoniques et la valeur efficace globale.

$$THD = 100 \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=H} (V_h)^2}}{\sqrt{\sum_{h=1}^{h=H} (V_h)^2}} \dots\dots\dots (I.19)$$

Certains auteurs emploient les abréviations THD-G (Taux de distorsion harmonique global) pour la définition par rapport à la valeur efficace du signal de sortie et THD-F (Taux de distorsion harmonique par rapport au fondamental) pour la définition du taux par rapport à l'harmonique 1 (le fondamental), qui donne la formule suivante :

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{h=H} \left(\frac{Q_h}{Q_1}\right)^2} = \frac{\sqrt{Q_2^2 + Q_3^2 + \dots + Q_H^2}}{Q_1} = \frac{Q_{HM}}{Q_1} \dots\dots\dots (I.20)$$

Où Q_h est la valeur efficace de l'harmonique au rang h du courant / de la tension ; Q_1 est celle composante fondamentale ; Q_{HM} est la valeur efficace des courants ou tensions harmoniques ; h est le rang harmonique et H est le rang harmonique maximal, en théorie infini, en pratique, le plus élevé dans la bande passante.

I.8. Stratégies De Limitation Des Harmoniques :**I.8.1. Principe de compensation :**

Les perturbations engendrées par les charges peuvent être atténuées soit [7]:

- Avec un système auxiliaire de filtrage pour les perturbations harmoniques ;
- En limitant la consommation de puissance réactive ;
- En modifiant la topologie du convertisseur pour limiter l'amplitude des sources de courants harmoniques ;
- En augmentant la puissance de court-circuit du réseau par rapport à la puissance du générateur. L'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau est aussi une solution. En effet, l'impédance de court-circuit en un point du réseau est inversement proportionnelle à la puissance de court-circuit disponible en ce point. Donc l'impact des harmoniques sera d'autant plus réduit si la puissance de court-circuit est grande [9].

Dans la pratique, les systèmes auxiliaires de filtrage sont les plus utilisés ; selon la littérature ces techniques de dépollution des réseaux électriques peuvent être classées en deux groupes :

- Les techniques traditionnelles.
- Les techniques modernes.

I.9. Solutions traditionnelles de la dépollution :

Elles nécessitent l'utilisation de composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation [8].

L'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau est aussi une solution. En effet, l'impédance de court-circuit en un point du réseau est inversement proportionnelle à la puissance de court-circuit disponible en ce point. Donc l'impact des harmoniques sera d'autant plus réduit si la puissance de court-circuit est grande [9].

L'utilisation d'inductances anti-harmoniques est une solution qui consiste à protéger les condensateurs, destinés à améliorer le facteur de puissance, en plaçant une inductance en série. Cette inductance est calculée de façon à ce que la fréquence de résonance ne corresponde à aucun des harmoniques présents [7].

Le nombre de semi-conducteurs utilisés et le transformateur à deux enroulements au secondaire d'un pont dodécaphasé est une solution onéreuse.

I.9.1. Filtrage passif :

Les filtres passifs d'harmonique est l'une des solutions efficaces utilisées pour réduire ou empêcher la propagation des harmoniques dans le réseau électrique. Un tel filtre consiste à combiner entre des réactances capacitives et inductives afin de constituer un ou des pièges aux harmoniques dont on veut éviter la propagation [10].

Le filtrage passif se fait par la mise en parallèle avec l'impédance du réseau d'un circuit de très faible impédance devant l'impédance du réseau à la fréquence de l'harmonique que l'on veut éliminer, le courant choisit le chemin le moins résistant et de ce fait l'harmonique pour lequel le filtre a été dimensionné, sera dévié à travers ce dernier. Le facteur de qualité, le rapport de la résistance ou de la capacitance résonante par rapport à la résistance du filtre, que détermine la précision de l'accord doit être assez élevé, supérieur à 50, toutefois la bande passante étant inversement proportionnel au facteur de qualité, de forte valeur de ce dernier peut être gênante dans le cas d'un filtre même légèrement désaccordé.

Des filtres passifs dit amortis peuvent aussi être aussi utilisés. Ils sont conçus de telle sorte à filtrer une plage de fréquence, ils sont généralement utilisés avec un faible facteur de résonance car pour ce genre de filtres, ce facteur de qualité est défini comme le rapport de la résistance sur la réactance.

On distinguera deux types de filtres assurant la limitation des tensions harmoniques :

- Le filtre résonant (ou filtre de type shunt) ;
- Le filtre amorti [11].

I.9.1.1. Filtre résonant :

Il est constitué par la mise en série d'une inductance, d'une résistance, et d'un condensateur (la figure I.2. Structure du filtre résonant)

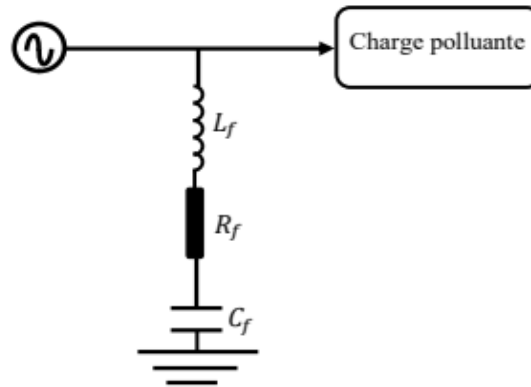


Figure I. 2 Structure du filtre résonant

I.9.1.2. Filtre amorti :

Le filtre amorti est constitué d'une structure identique au filtre résonant, avec en supplément, une résistance R branchée en parallèle sur l'inductance (la figure I.3. Montage du filtre amorti)

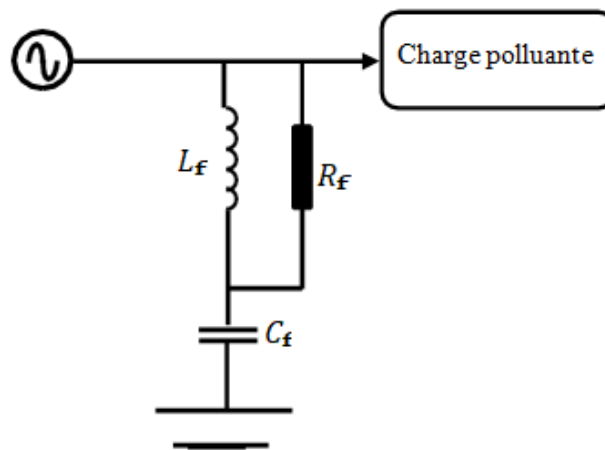


Figure I. 3 Montage du filtre amorti

Les filtres passifs sont des moyens faciles et efficaces si les harmoniques à filtrer sont localisés dans une bande de fréquence étroite et l'impédance harmonique du réseau élevée.

Cependant, si ces conditions favorables ne sont pas réunies ces dispositions deviennent plus complexes, onéreux et moins efficaces. Ceci est lié aux aspects suivants :

- Leur incapacité de couvrir une large bande de fréquence, d'où l'utilisation de plusieurs filtres de rang d'accord différents.

- Un changement de la fréquence d'accord même petit, dû aux variations des caractéristiques de leur élément surtout les condensateurs (température, vieillissement) peut considérablement affecter leur capacité de filtrage.
- Leur efficacité dépend de l'impédance du réseau, mal connue et susceptible de varier.
- Le caractère inductif de l'impédance du réseau peut provoquer des résonances entre celui-ci et le filtre passif [12].

Ces inconvénients et l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT, ont permis d'envisager de nouvelles solutions aux perturbations du réseaux électrique.

I.9.2. Filtrage Actif :

Le filtrage actif date du début des années 1970 et ses familles de filtres actifs parallèles et série réalise a base d'onduleurs contrôlés en modulation de largeur d'impulsion (*MLI*) datent de 1976 et son la solution adaptée à la compensation des tensions [13].

Le but de ces filtres actifs est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant ou la tension redevienne sinusoïdal [14].

Deux raisons principales ont conduit à généraliser l'utilisation des filtres actifs. La première raison est due aux inconvénients inhérents des solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent pas plus à l'évolution des charges et des réseaux électriques. En effet, les méthodes dites "classiques" de filtrage ou de dépollution des réseaux électriques présentent un certain nombre d'inconvénient énumérés ci-dessus.

La seconde raison fait suite à l'apparition de nouveau composant à commutation forcée, comme les transistors bipolaires, les thyristors GTO et les transistors IGBT qui ont permis de réaliser de nouvelles structures qui permettent le contrôle de la fore d'onde de la phase du courant d'entrée. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques. Ainsi le filtrage actif tend à annuler les courants harmoniques en injectant dans la source perturbatrice des courants harmoniques d'amplitudes identiques, mais en opposition de phase à l'aide d'un pont onduleur. A cet effet, une mesure du courant de la charge non linéaire permet de connaitre le courant à fournir.

Nous citerons configurations possibles des filtres actifs :

- Le filtre actif parallèle (FAP) : conçu pour compenses toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive.

- Le filtre actif série (FAS) : conçu pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension.
- La combinaison parallèle série actif : solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension.

I.9.2.1. Filtre actif parallèle :

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau est le plus souvent contrôlé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants harmoniques égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant coté réseaux sera ainsi sinusoïdal, cependant la tension au point de raccordement ne le sera que si la tension ne contient pas d'harmoniques. Ainsi l'objectif d'un filtre parallèle générateur de courant consiste à empêcher les courants harmoniques absorbés par la charge non linéaire de circuler à travers l'impédance du réseau située en amont du point de connexion du filtre. Le dimensionnement du filtre actif est lié au courant harmonique à générer. La majorité des filtres actifs parallèles actuellement installés sur les réseaux électriques fonctionne selon ce principe [12].

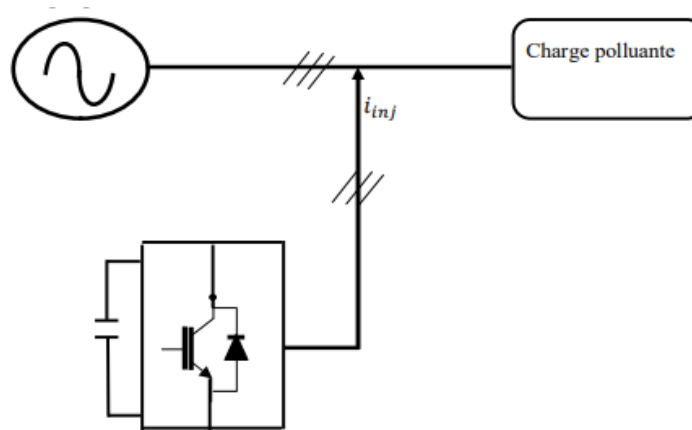


Figure I. 4 Structure filtres actifs parallèles

I.9.2.2. Filtre actif série :

Le filtre actif série se comporte comme une source de tension qui s'oppose à une éventuelle tension harmonique venant de la source et également à celle provoquée par la circulation du courant harmonique de la charge polluante à travers l'impédance du réseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge polluante est purement sinusoïdale, ce qui n'est pas le cas du courant dans le réseau car celui-ci est traversé par la totalité du courant de la charge.

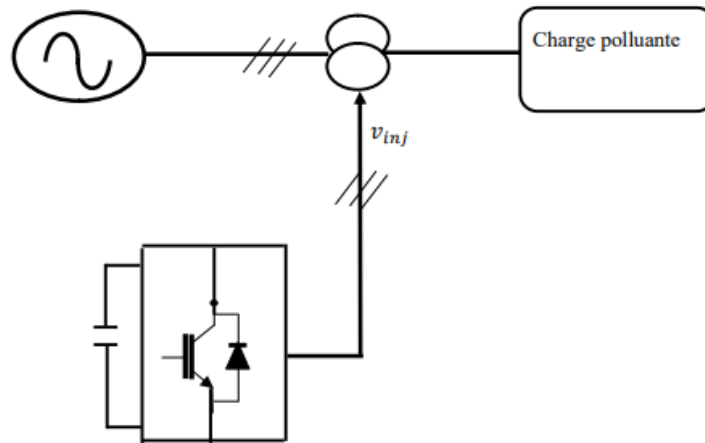


Figure I. 5 Structure filtres actifs série

I.9.2.3. Filtre actif mixte (série et parallèle) :

Cette combinaison parallèle-série actifs, aussi appelée Unified Power Quality Conditioner (UPQC), résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série.

Profitant des avantages des deux filtres actifs, l'UPQC assure un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d'un courant et d'une tension perturbés de celui-ci [11].

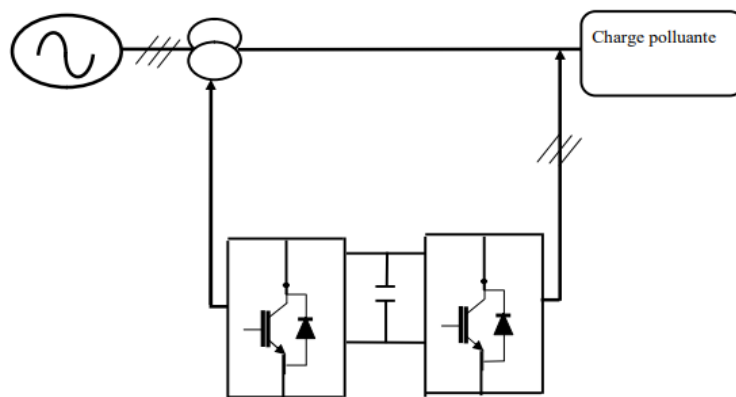


Figure I. 6 Structure de filtre actif mixte (série et parallèle)

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs et ainsi augmenter leur potentialité d'application, l'association de filtres actifs de faibles puissances à des filtres passifs semble être une solution prometteuse. Donc on peut trouver plusieurs configurations, en voici quelques-unes :

- Filtre actif série associée à un filtre passif parallèle.
- Filtre actif en série avec filtre passif parallèle.
- Filtre actif parallèle associée à un filtre passif parallèle.

I.10. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons essayée de faire la lumière sur le problème de pollution des réseaux par les harmoniques, leurs origines et leurs néfastes effets sur les équipements industriels.

Ces effets peuvent aller des échauffements et de la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

Plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées.

La solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrement et de résonance. De plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et aux charges polluantes.

La solution moderne représenté dans les filtres actifs parallèles et séries et leur combinaison, ce type de filtres sont utilisés pour la compensation de tous les types de perturbation susceptible d'apparaître dans un réseau électrique basse tension.

Elimination de la pollution harmonique et obligatoire pour protéger les installations électriques.

Chapitre 02

COMMUTATION DANS LES CONVERTISSEURS

II. Chapitre 2

COMMUTATION DANS LES CONVERTISSEURS

II.1. Les convertisseurs statiques :

Sont des circuits électriques utilisant des semi-conducteurs de puissance (diodes, thyristors, transistors ...) utilisés comme des interrupteurs, dans le but de transformer le spectre du signal (amplitudes, fréquences, valeur efficace, valeur moyenne ..) pour adapter la source à la charge. L'étude et la conception de ces dispositifs est souvent appelée électronique de puissance.

II.2. Origine des convertisseurs de puissance électrique :

Les premiers convertisseurs de puissance électrique ont été réalisés à l'aide de machines couplées mécaniquement (méthode Ward Leonard).

D'une part, une machine à courant alternatif (de type synchrone ou asynchrone) est couplée au réseau, elle peut donc convertir l'énergie électrique en énergie mécanique à vitesse fixe.

Par contre, une machine à courant continu a une excitation contrôlée qui permet d'avoir une tension continue variable en sortie.

Le développement des composants de puissance au milieu du 20^e siècle (électronique de puissance) a permis de développer des convertisseurs de puissance électrique sans machines tournantes.

La technologie des composants utilisés (semi-conducteurs) ne cesse d'évoluer :

- Faible-coût
- Puissances et fréquence de commutation élevées.
- Facilité de contrôle.

II.3. Familles de convertisseurs statiques :

Suivant le type de machine à commander et suivant la nature de la source de puissance, on distingue plusieurs familles de convertisseurs statiques (schéma ci-dessous):

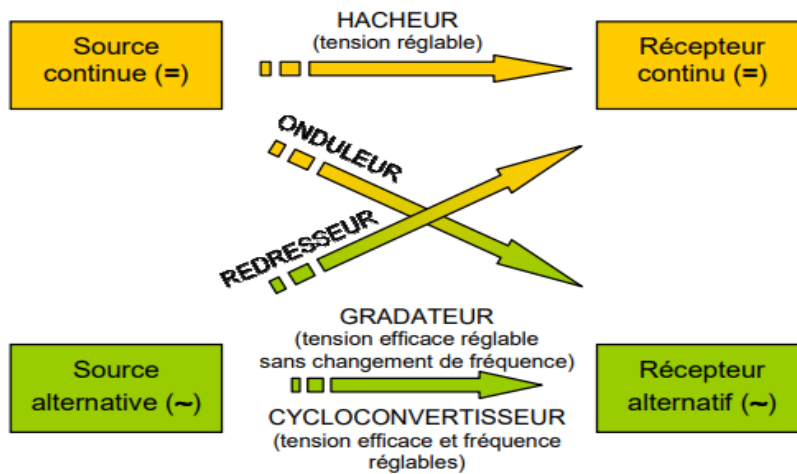


Figure II. 1 Schéma de la relation entre les convertisseurs statiques

II.3.1. Les hacheurs :

II.3.1.1. Généralités :

Les hacheurs sont des convertisseurs directs du type continu-continu, leur utilisation permet le contrôle de la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

D'un point de vue circuit, les hacheurs apparaissent comme un quadripôle Fig. (1), jouant le rôle d'organe de liaison entre deux parties d'un réseau, on peut le considérer comme un "transformateur" des grandeurs électriques continues.

Un hacheur est un montage utilisant des transistors ou thyristor qui sera coupé ou établi en courant continu en des instants prévus, (comme le fera un interrupteur manuel) mais a des fréquences très élevées alternant souvent 1 à 10 KHz [15].

Les hacheurs permettent donc d'obtenir une tension continue réglable à partir d'une tension continue constante

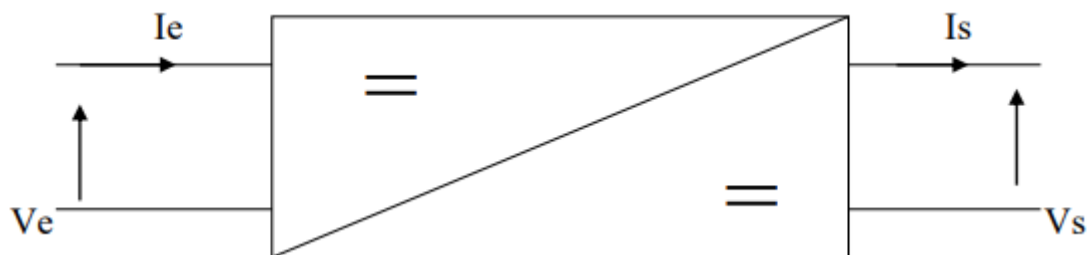


Figure II. 2 Convertisseur Continu (DC) - Continu (DC)

Les hacheurs permettent donc d'obtenir une tension continue réglable à partir d'une tension continue constante.

Suivant le composant électronique utilisé, on distingue deux types d'hacheur :

Les hacheurs à transistors : pour les petites et moyennes puissances.

Les hacheurs à thyristors pour les grandes puissances : la mise en œuvre du thyristor dans les interrupteurs lors du blocage n'est pas naturelle. Cependant aux très fortes puissances, le thyristor est irremplaçable, par composant on peut commuter 2000 A sous tension 2500 V. exemple d'application un thyristor additionnel, inductance et condensateur pour parvenir au blocage du composant principal.

II.3.1.2. Principe d'hacheur :

Le principe d'hacheur consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison source - charge à l'aide d'un interrupteur électronique.

Ce composant est le transistor de symbole :

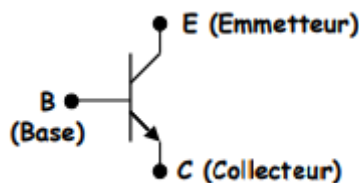


Figure II. 3 symbole de transistor

Les transistors d'électronique de puissance fonctionnent en tout ou rien : ils sont équivalents à un interrupteur fermé lorsqu'on applique une tension positive entre B et C suffisamment grande (voir données constructeur) et à un interrupteur ouvert dans le cas contraire.

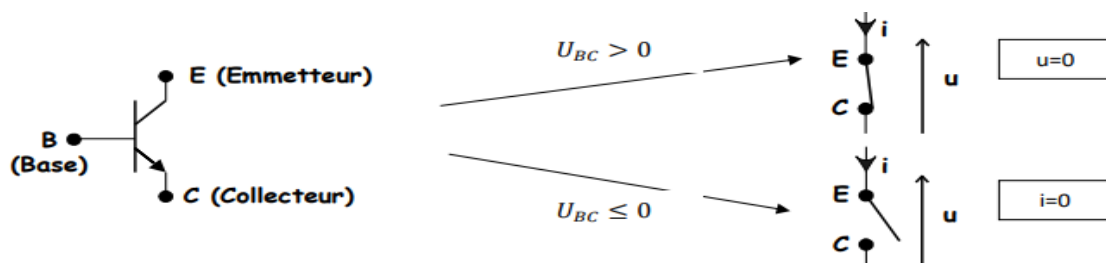


Figure II. 4 Les deux cas du transistor

La commande (ouverture et fermeture) du transistor s'effectue entre les bornes B et C. Le transfert de puissance s'effectue entre les bornes E et C [15].

II.3.1.3. Structure d'hacheur :

Les différentes structures d'hacheur dépendent du cahier des charges imposé au système dans une première approche, les caractéristiques à prendre en compte pour établir les structures sont la nature des réseaux d'entrée et de sortie identifiés comme des sources de tension ou de courant et sur les réversibilités qui peuvent être demandée à ces sources.

Dans un deuxième temps, il est possible, une fois la structure établit, de prendre comme modèle des sources, un réseau électrique présentant une inductance série préalablement identifié à une source de tension [15].

Ainsi un moteur à courant continu dont le modèle électrique est représenté par le dipôle actif de la Fig." II.2 "

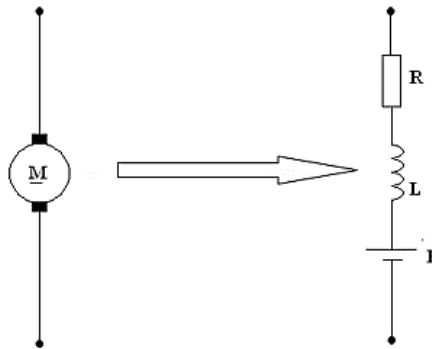


Figure II. 5 courant continu dont le modèle électrique

II.3.1.4. Le rapport cyclique :

C'est la fraction de période pendant lequel le transistor conduit. On le note α .

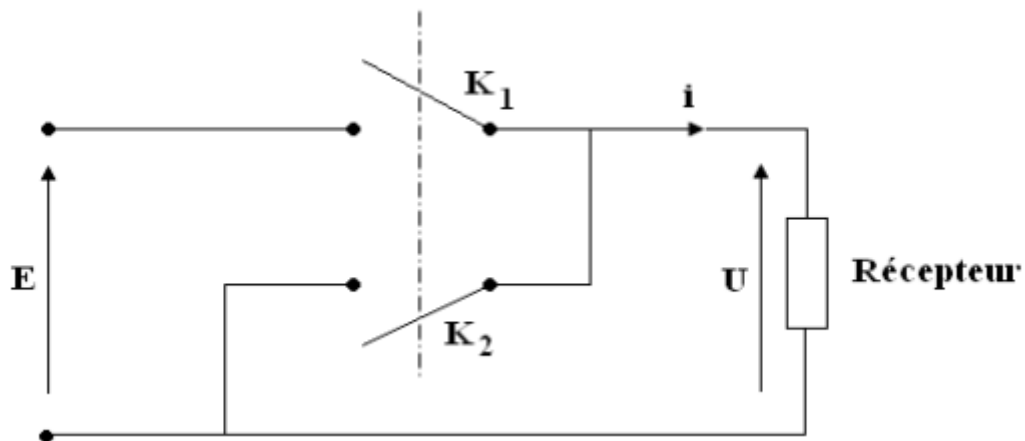


Figure II. 6 Figure de deux interrupteurs K1 et K2 ce qu'on demande aux semi-conducteurs de réaliser.

Hacheur ($f = \frac{1}{T}$ sa fréquence)

- $0 \leq t \leq \alpha T$ K1 fermé, K2 ouvert

$$\Rightarrow U = E$$

- $\alpha T \leq t \leq T$ K2 fermé, K1 ouvert

$$\Rightarrow U = 0$$

$$U_{moy} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} E dt \dots \dots \dots (II.1)$$

$$U_{moy} = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} E dt = \frac{E}{T} (t)_0^{\alpha T} \dots \dots \dots (II.2)$$

$$U_{moy} = \frac{E}{T} \alpha T = \alpha E \dots \dots \dots (II.3)$$

α : rapport cyclique $0 \leq \alpha \leq 1$

T : période de fonctionnement d'hacheur ($f = \frac{1}{T}$ sa fréquence).

Dans la Fig." II.6 " les interrupteurs K1, K2 doivent être de façon complémentaire.

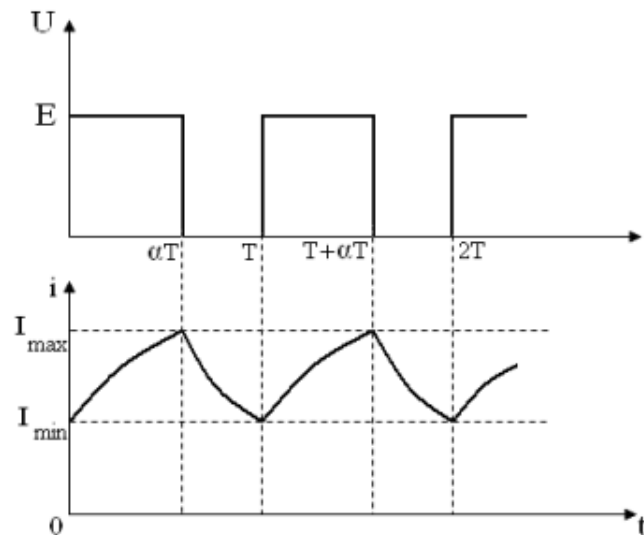


Figure II. 7 les allures de la tension et de courant (hacheur)

La présence K2 est indispensable car l'ouverture de K1, $t = \alpha T$ il faut évacuer l'énergie emmagasinée dans l'inductance du récepteur, cette inductance permet de rendre le courant « i » dans la charge constante si elle n'est pas suffisante, on doit l'augmenter par une inductance de lissage [15].

Pour réaliser les convertisseurs statiques équivalents à la Fig."II.7" on remplace K1 par un thyristor, K2 par la diode de roue libre « D ».

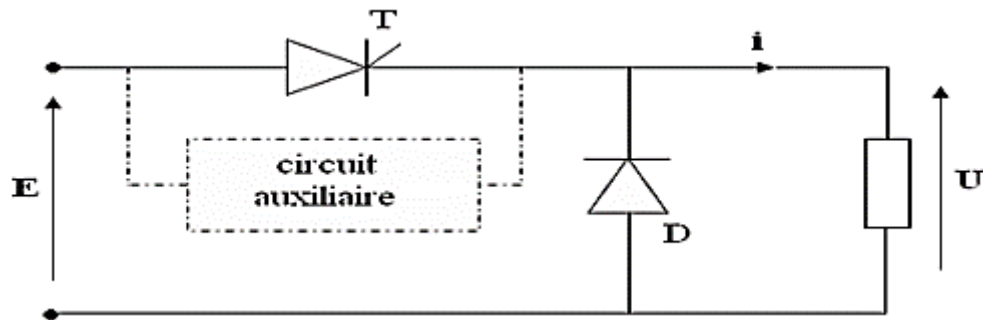


Figure II. 8 Hacheur série

On voit immédiatement la nature des deux commutations à effectuer à chaque période

- À $t = 0$ on doit amorcer K1 :

Quand la diode « D » conduisant $U_t = E$.

Il suffit d'envoyer une impulsion, d'amorçage à thyristor « T » il se ferme ce qui rend $U_D = -E$ et la diode « D » ouvre.

La commutation thyristor diode « T - D » à $t = \alpha T$ est forcée, il faut donc prévoir un circuit auxiliaire pour ouvrir le thyristor « T ».

L'ensemble formé par un thyristor et son circuit auxiliaire de blocage est interrupteur commandé à la fermeture et l'ouverture appelé thyristor commandé (TC) ou hacheur (H).

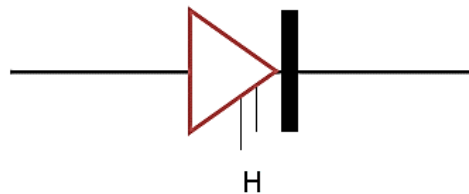


Figure II. 9 Symbole d'hacheur

II.3.1.5. L'hacheur série (Buck) :

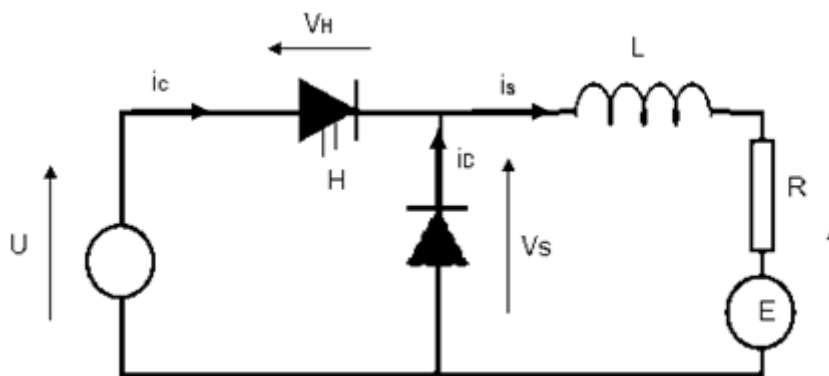


Figure II. 10 Hacheur série

Analyse du fonctionnement : [15]

$0 < t < \alpha T$: H est fermé.

$$i_e = i_s, \quad V_h = 0, \quad V_s = 0$$

- L'intensité du courant dans la charge vérifie l'équation suivante :

$$U = E + R i_s + L \frac{di_s}{dt} \dots\dots\dots (II.4)$$

$\alpha T < t < T$: H est ouvert.

Le courant imposé par la bobine pourra passer par la diode de roue libre. Donc la diode assure la continuité du courant dans la charge.

$$i_e = 0, \quad V_h = U, \quad V_s = 0$$

- L'intensité du courant dans la charge vérifie l'équation suivante :

$$0 = E + R i_s + L \frac{di_s}{dt} \dots\dots\dots (II.5)$$

Remarque : en général les résistances de l'induit et l'inductance sont très faibles, donc on suppose que la chute de tension $R \cdot i_s$.

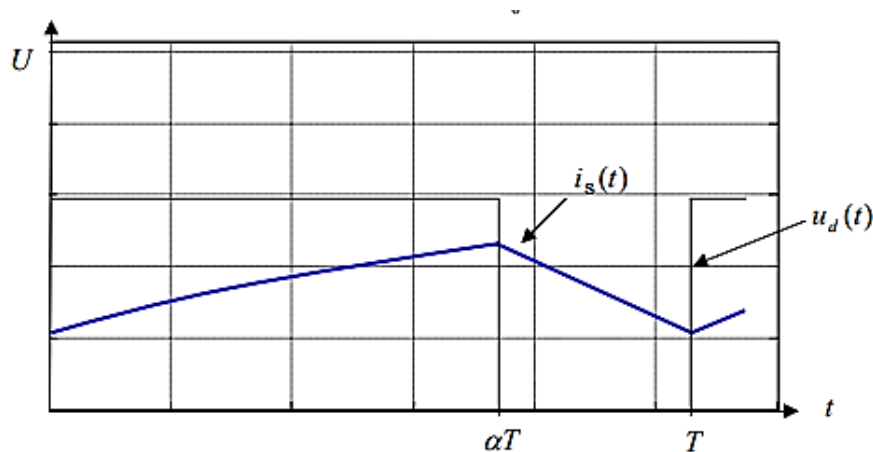


Figure II. 11 hacheur série fonctionnement à courant ininterrompu dans la charge.

*l'équation (1) devient :

$$U = E + L \frac{di_s}{dt} \Rightarrow di_s = \frac{U-E}{L} dt \dots\dots\dots (II.6)$$

Pour trouver la valeur du courant on intègre l'équation dans l'intervalle $0 < t < \alpha T$:

$$\int_0^{\alpha T} di_s = \int_0^{\alpha T} \frac{U-E}{L} dt \dots\dots\dots (II.7)$$

$$i_s(t) = \frac{U-E}{L} (t) + A \dots\dots\dots (II.8)$$

On détermine la constante d'intégration d'après les conditions initiales de cette étape :

À $t = 0$, $i_s(0) = I_{min}$ (valeur minimale).

$$I_{min} = A \quad i_s(t) = \frac{U-E}{L}(t) + I_{min} \dots \dots \dots (II.9)$$

*l'équation (2) devient :

$$0 = E + L \frac{di_s}{dt} \Rightarrow di_s = -\frac{E}{L} dt \dots \dots \dots (II.10)$$

Pour trouver la valeur du courant on intègre l'équation dans l'intervalle $\alpha T < t < T$:

$$\int_{\alpha T}^T di_s = \int_{\alpha T}^T -\frac{E}{L} dt \dots \dots \dots (II.11)$$

$$i_s(t) = -\frac{E}{L}(t) + B \dots \dots \dots (II.12)$$

On détermine « B » d'après les conditions initiales :

À $t = \alpha T$, $i_s(\alpha T) = I_{max}$ (valeur maximale)

$$I_{max} = -\frac{E}{L}(\alpha T) + B \Rightarrow B = I_{max} + \frac{E}{L}(\alpha T) \Rightarrow i_s(t) = -\frac{E}{L}(t - \alpha T) + I_{max} \dots \dots \dots (II.13)$$

Valeur moyenne du courant :

$$V_{smoy} = E + R I_{smoy} + L \frac{dI_{smoy}}{dt} \dots \dots \dots (II.14)$$

$$\text{Avec } V_{smoy} = \alpha U, \quad L \frac{dI_{smoy}}{dt} = 0$$

La valeur moyenne du courant est calculée par la formule suivante :

$$I_{smoy} = \frac{\alpha U - E}{R} = \frac{I_{max} + I_{min}}{2} \dots \dots \dots (II.15)$$

On peut déduire les valeurs moyennes des courants I_{Hmoy} et I_{Dmoy} en fonction de I_{smoy} .

Intensité moyenne dans l'hacheur : $I_{Hmoy} = \alpha I_{smoy}$

Intensité moyenne dans la diode : $I_{Dmoy} = (1 - \alpha) I_{smoy}$

Ondulation du courant dans la charge :

Elle est donnée par la relation :

$$\Delta i = I_{max} - I_{min} = \frac{\alpha(1-\alpha)U}{Lf} \dots \dots \dots (II.16)$$

L'ondulation Δi est maximale pour $\frac{d\Delta i}{d\alpha} = 0 \Rightarrow \alpha = 0.5$

$$\Delta i_{max} = \frac{U}{4Lf} \dots \dots \dots (II.17)$$

Pour diminuer Δi , il faut augmenter l'inductance L ou/et la fréquence f [16].

II.3.1.6. Hacheur parallèle (boost) :

L'hacheur parallèle est aussi appelé hacheur survolteur. Ce montage permet de fournir une tension moyenne U_{d0} à partir d'une source de tension continue $U > U_{d0}$ [11].

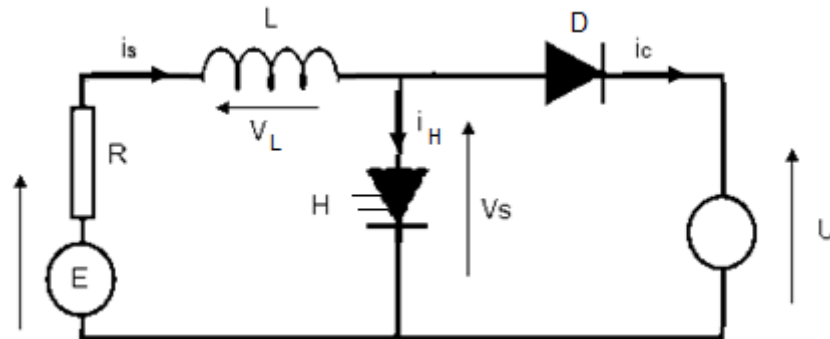


Figure II. 12 Hacheur parallèle

Analyse du fonctionnement : [16]

Les deux interrupteurs électroniques sont supposés parfaits

- $0 < t < \alpha T$: H est fermé et l'intensité $i_s(t)$ croît linéairement :

$$i_H = i_s, \quad V_S = 0, \quad i_c = 0$$

Remarque : en supposant la résistance R est négligeable.

$$V_S = E - V_R - V_L \Rightarrow V_L = E$$

L'intensité du courant vérifie l'équation suivante :

$$E = L \frac{di_s}{dt} \Rightarrow di_s = \frac{E}{L} dt \dots\dots\dots (II.18)$$

On obtient la valeur du courant par l'intégration de l'équation précédente :

$$\int_0^{\alpha T} di_s = \int_0^{\alpha T} \frac{E}{L} dt \dots\dots\dots (II.19)$$

$$i_s(t) = \frac{E}{L} t + I_{min} \dots\dots\dots (II.20)$$

- $\alpha T < t < T$: H est ouvert, l'inductance L se démagnétise et le courant $i_s(t)$ décroît :

$$i_c = i_s, \quad V_S = U, \quad i_H = 0$$

L'intensité du courant vérifie l'équation suivante :

$$V_S = U = E - L \frac{di_s}{dt} \Rightarrow di_s = \frac{E-U}{L} dt \dots\dots\dots (II.21)$$

On intègre l'équation précédente :

$$\int_{\alpha T}^T di_s = \int_{\alpha T}^T \frac{E-U}{L} dt \dots\dots\dots (II.22)$$

$$i_s(t) = \frac{E-U}{L} (t - \alpha T) + I_{max} \dots\dots\dots (II.23)$$

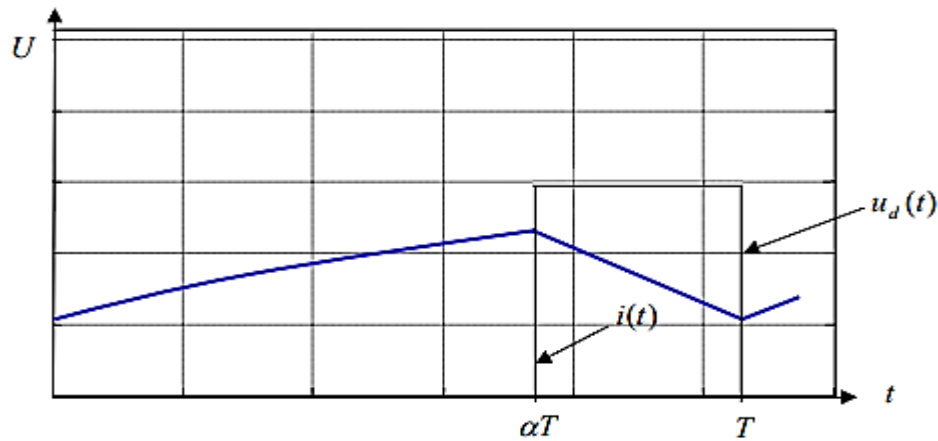


Figure II. 13 Hacheur parallèle. Fonctionnement à courant ininterrompu dans la charge.

Valeur moyenne de la tension :

$$V_s = U = E - L \frac{di}{dt} \dots \dots \dots (II.24)$$

$$V_{smoy} = E - L \frac{di_{smoy}}{dt} = E \dots \dots \dots (II.25)$$

Valeur moyenne de V_s vaut :

$$V_{smoy} = \frac{1}{T} \int_0^T V_s(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} 0 dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T U dt \dots \dots \dots (II.26)$$

On remplace V_{smoy} par E :

$$E = (1 - \alpha)U \Rightarrow U = E / (1 - \alpha) \dots \dots \dots (II.27)$$

Ondulation du courant dans la charge :

Elle est donnée par la relation [16] :

$$\Delta i = I_{max} - I_{min} = \frac{\alpha E}{Lf} = \frac{\alpha(1-\alpha)U}{Lf} \dots \dots \dots (II.28)$$

II.3.2. Les Gradateurs :

II.3.2.1. Généralités :

Un gradateur c'est un convertisseur statique qui produit un système de tension et courant alternatifs variable à partir d'une source de tension alternative, sans en modifier la fréquence

- L'intensité de courant du courant débité par la source est la même que celle absorbé par le récepteur.
- La fréquence (f) est imposée par la source.

Un gradateur est un appareil de commande qui permet de contrôler la puissance absorbée par un récepteur en régime alternatif.

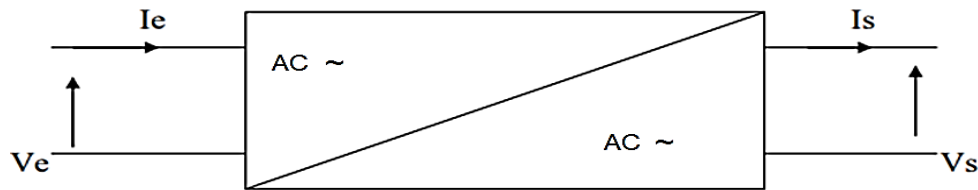


Figure II. 14 Convertisseur (AC) - (AC)

II.3.2.2. Principe de fonctionnement :

Le gradateur est un interrupteur qui permet d'établir et d'interrompre la liaison entre la source et le récepteur. La tension aux bornes du récepteur évolue en fonction de la séquence de commande de l'interrupteur [17].

II.3.2.3. Structure de Gradateur :

Généralement l'interrupteur est bidirectionnel en courant. Il se compose d'une partie puissance et d'une partie commande intégrées dans le même bloc. La partie puissance est constituée de deux thyristors montés « tête-bêche » pour les fortes puissances supérieures à 10 kW, ou d'un triac pour les puissances inférieures. La partie commande est constituée de divers circuits électroniques permettant d'élaborer les signaux de commande des thyristors à partir d'un ordre de commande extérieur. Suivant les types de gradateur, ce signal de commande sera de type tout ou rien (*TOR*) ou bien analogique [18].

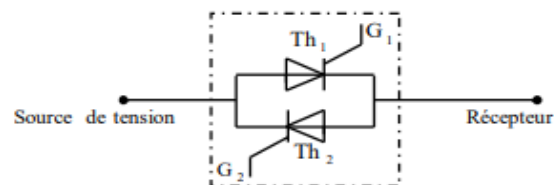


Figure II. 15 Montage à deux thyristors en « tête-bêche »

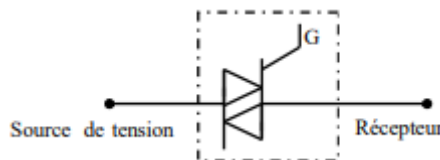


Figure II. 16 Montage à triac.

II.3.2.4. Gradateur monophasé à angle de phase :

Il est alimenté par une tension sinusoïdale de valeur efficace constante, et fournit à la charge.

Une tension alternative non sinusoïdale de même fréquence que la tension d'alimentation, mais de valeur efficace réglable [17].

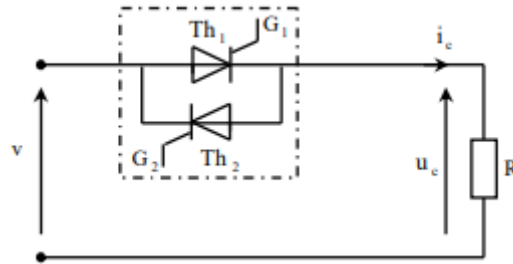
Charge résistive

Figure II. 17 Gradateur charge résistive

Les impulsions de commande des gâchettes des thyristors sont générées périodiquement aux instants successifs $t_1 = \frac{\alpha}{\omega}$ et $t_2 = \frac{\alpha + \pi}{\omega}$ comme le montre la figure ...

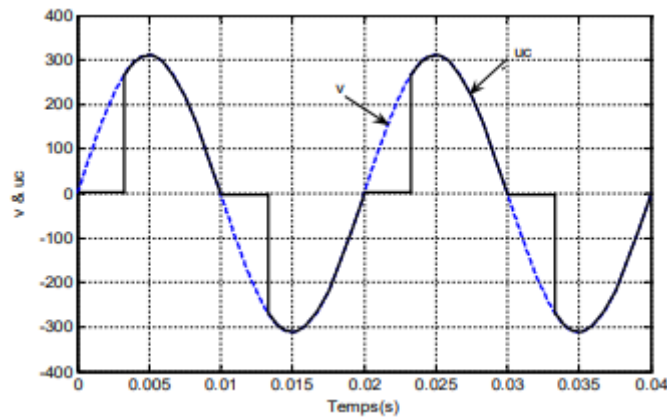


Figure II. 18 Tensions des grandeurs « v » et Uc

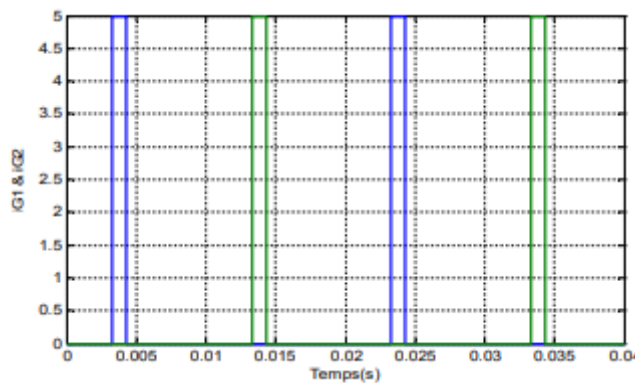


Figure II. 19 Impulsions de commande « iG1 et iG2 » des thyristors Th1 et Th2

Valeurs caractéristiques:

- Tensions de charge efficace : $U_{eff} = V \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}}$ (II.29)
- Courant efficace : $i_{eff} = \frac{V}{R} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}}$ (II.30)
- Puissance moyenne : $(P_{ch})_{moy} = \frac{V^2}{R} (1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi})$ (II.31)

Conclusion: Lorsque l'angle d'amorçage varie de 0 à π , la valeur efficace du courant varie aussi de son maximum $I_{max} = \frac{V}{R}$ à 0.

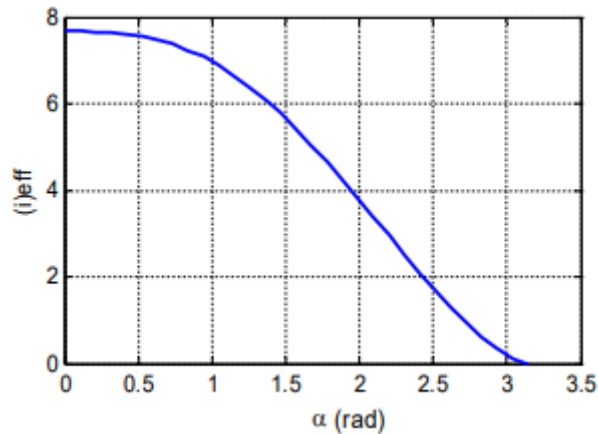


Figure II. 20 Courant efficace en fonction de (α)

II.3.2.5. Gradateur Triphasé :

Constitution :

Un gradateur triphasé est formé par trois gradateurs monophasés montés en étoile ou en Triangle.

Gradateur triphasé en amont :

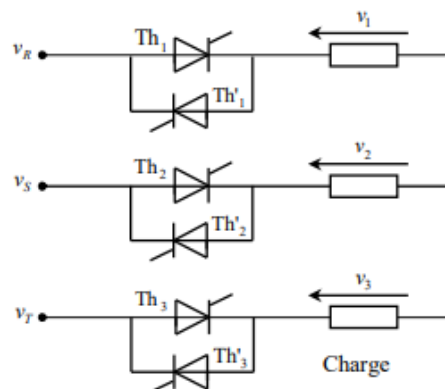


Figure II. 21 Montage étoile des récepteurs

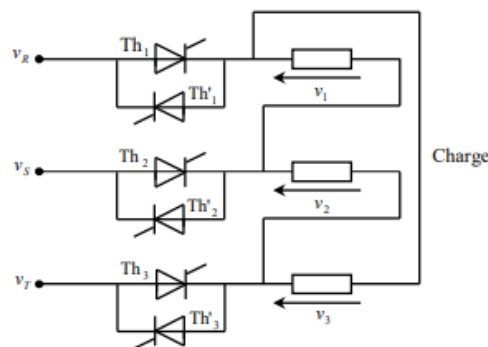


Figure II. 22 Montage triangle des récepteurs

Gradateur triphasé en aval :

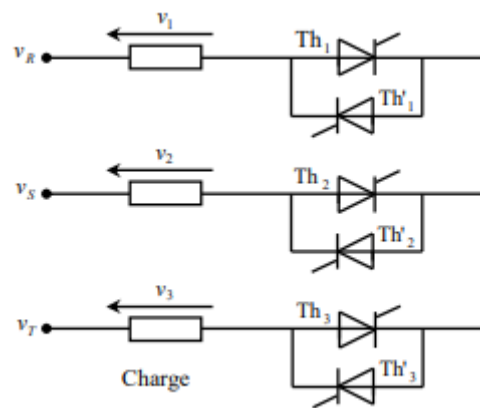


Figure II. 23 Gradateur en étoile

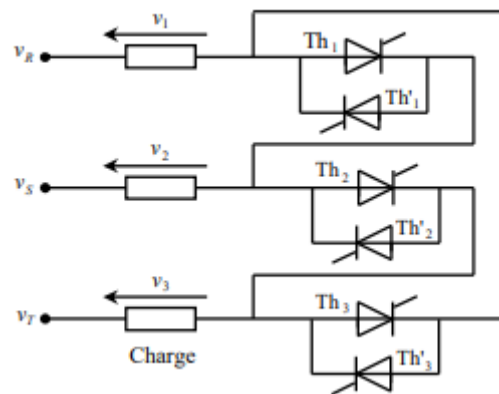


Figure II. 24 Gradateur en triangle

Gradateur triphasé cas d'une charge résistive :

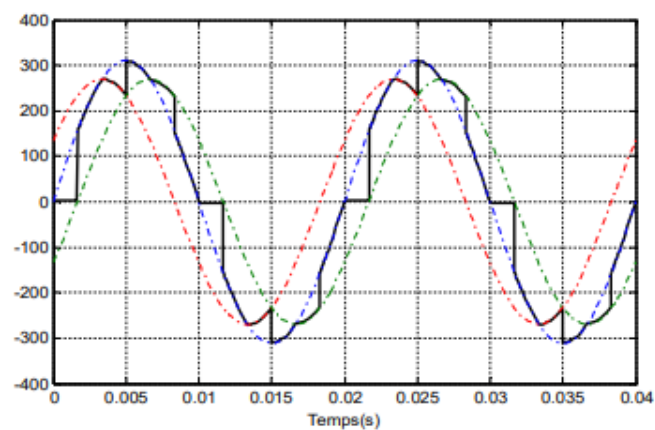


Figure II. 25 Allure de la tension (v1)

Domaine d'utilisation des gradateurs :

- Chauffage.
- Eclairage.

- Variation de la vitesse des moteurs alternatifs de faibles puissances (perceuse, aspirateurs de quelques centaines de watts).

II.3.3. Les Onduleurs :

II.3.3.1. Généralités :

L'onduleur est un convertisseur statique qui permet le réglage du transfert de puissance entre :

Une source de courant ou de tension continue et une source de courant ou de tension Alternative. Il relie une structure de tension ou de courant continu à un récepteur monophasé Ou polyphasé de courant ou de tension alternatifs [19].

La fréquence « f » de la source alternative est :

- Soit imposé (fixe ou réglable), par une commande électronique autonome (onduleur autonome)
- Soit imposée constant par la source elle-même (onduleur assisté débité sur le réseau).
- Soit imposée, variable par la source elle-même (onduleur alimentant une machine
- Synchrones, piloté par la fréquence de la f.é.m. de la machine).

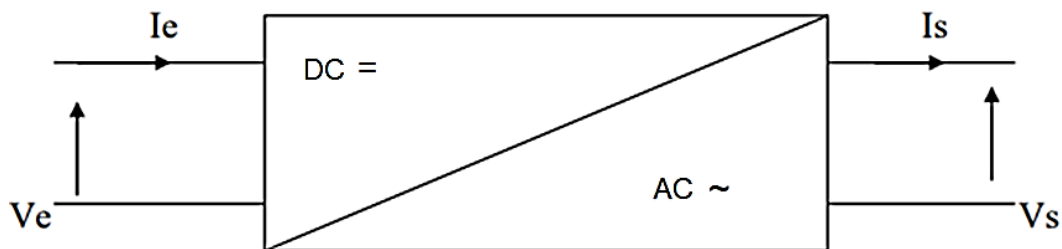


Figure II. 26 Convertisseur (AC) - (AC)

Les différents types d'onduleurs :

- Les onduleurs de chaîne.
- Les onduleurs hybrides.
- Les micro-onduleurs.

II.3.3.2. Principe général de fonctionnement :

Il a été dit précédemment que le but de cette commande est de créer aux bornes de la charge une tension alternative. Pour cela, il suffit de commander les interrupteurs deux à deux. Nous verrons les types de commandes suivants [20]:

- Commande symétrique.
- Commande décalée.
- Commande MLI (Modulation de largeur d'impulsion)

1ère phase : pour $0 < t < \frac{T}{2}$:

On commande la fermeture de K1 et K3, durant cette durée K2 et K4 sont ouverts. Nous obtenons donc le schéma équivalent très simple suivant :

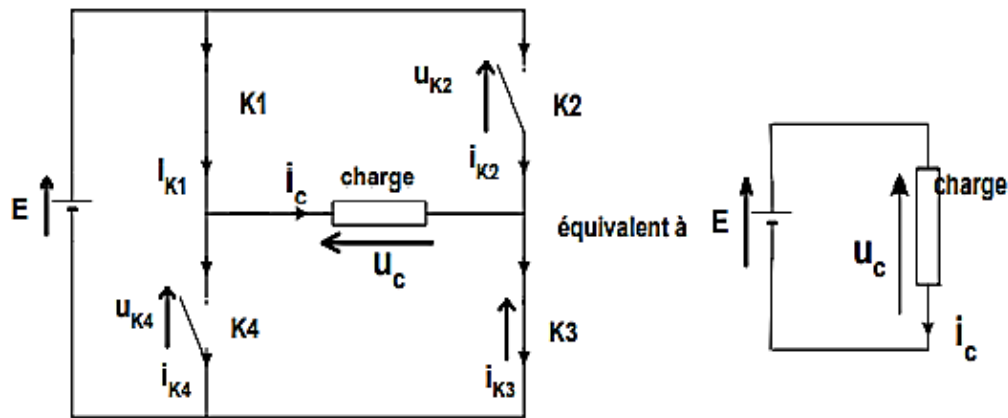


Figure II. 27 Onduleurs en cas de fermeture de K1 et K3 (pour $0 < t < T/2$)

2ème phase : pour $\frac{T}{2} < t < T$:

On commande la fermeture de K2 et K4, durant cette durée K1 et K3 sont ouverts. Nous obtenons donc le schéma équivalent très simple suivant :

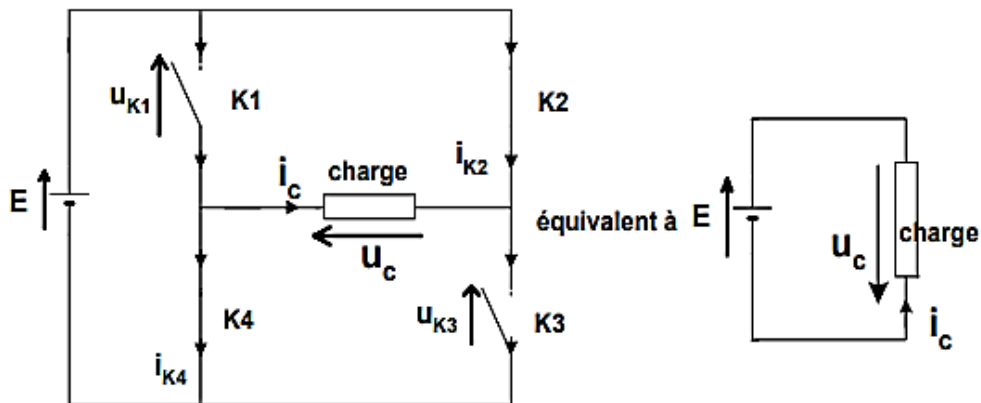


Figure II. 28 Onduleurs en cas de fermeture de K2 et K4 (pour $T/2 < t < T$)

La tension aux bornes de la charge durant cette phase $u_c = -E$.

II.3.3.3. Grandeurs caractéristiques :

Période : Elle est imposée par la commande des interrupteurs.

La tension u est alternative :

La fréquence : $f = 1/T$

- La valeur efficace de la tension U :

$$\langle U^2 \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T U^2 dt \dots \dots \dots (II.32)$$

$$U_{eff} = \sqrt{\langle U^2 \rangle} \dots \dots \dots (II.33)$$

- La valeur moyenne du courant i :

$$\langle i \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt \dots \dots \dots (II.34)$$

- La puissance fournie par le générateur :

$$P_g = E \cdot \langle i \rangle \dots \dots \dots (II.35)$$

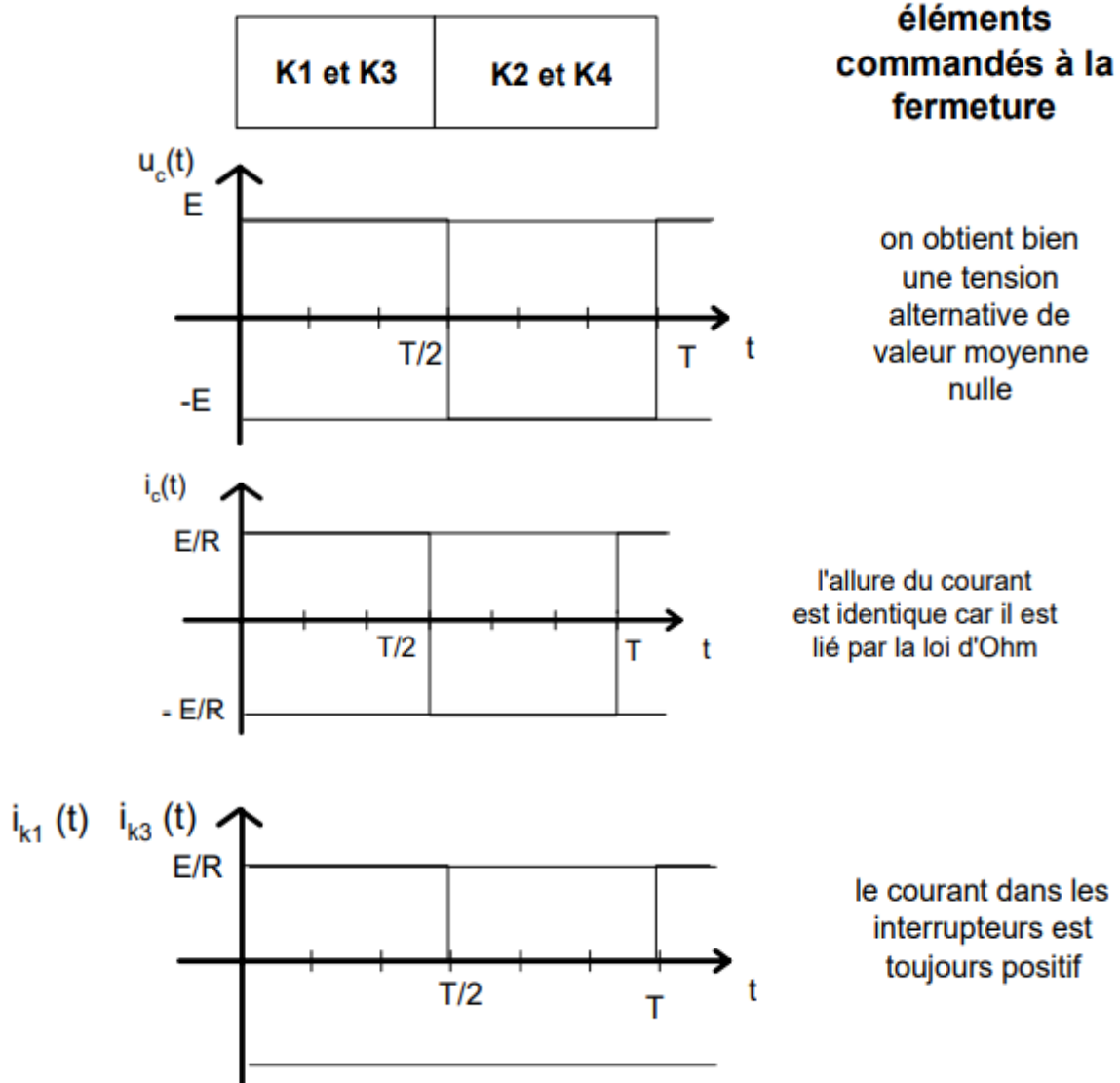
- La puissance reçue par la charge :

$$P_{ch} = U_{eff} \cdot i_{eff} \dots \dots \dots (II.36)$$

Il suffit donc de dessiner des oscillogrammes suivant la charge choisie :

La charge inductive simule un moteur alternatif. Nous apercevons que pour cette charge, seule l'allure des courants change.

a) charge résistive R :



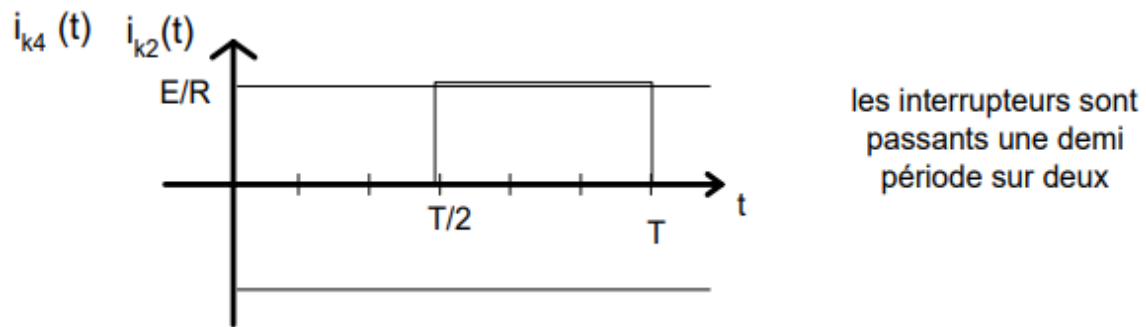


Figure II. 29 l'allure des courants.

La valeur efficace de la tension aux bornes de la charge est fixée par la tension d'alimentation.

Nous obtenons donc les valeurs suivantes :

$$U_{\text{eff}} = E$$

b) charge inductive RL:

La charge inductive simule un moteur alternatif. Nous nous apercevons que pour cette charge, seule l'allure des courants change.

D1 D3	K1 et K3	D2 D4	K2 et K4
-	+	-	+

éléments passants
signe de la puissance
échangée par la charge

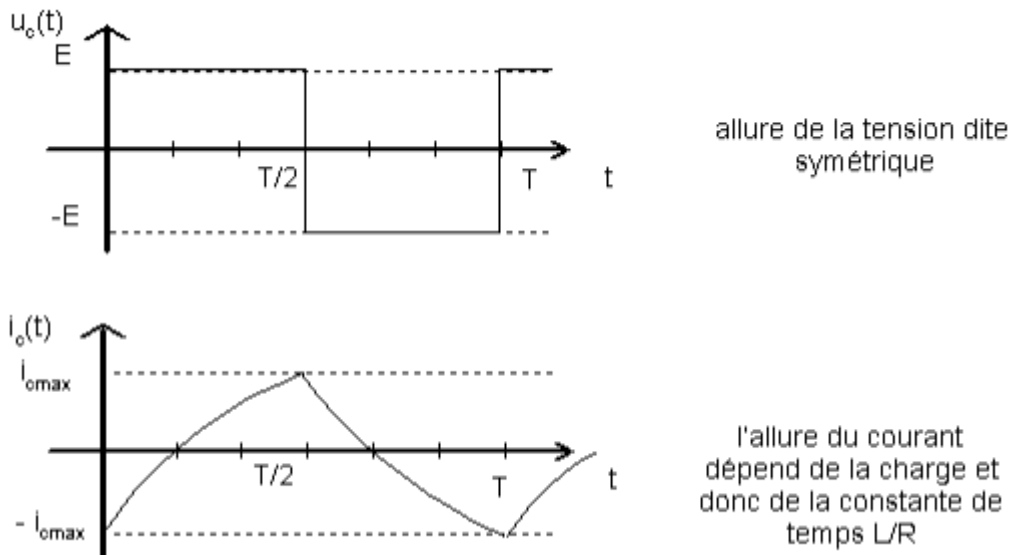


Figure II. 30 Courbe des allures de courant et de tension (charge inductive RL)

II.3.4. Les Redresseurs :

II.3.4.1. Généralités :

C'est un convertisseur alternatif-continu. La tension de sortie est non alternative (à valeur moyenne non nulle). Cette valeur moyenne peut être réglée dans le cas d'un redresseur commandé. Ils sont utilisés principalement pour alimenter des charges fonctionnant avec une

tension continue ou pour recharger des batteries (en effet, un redresseur est toujours intégré dans les chargeurs de vos PC ou vos téléphones portables).

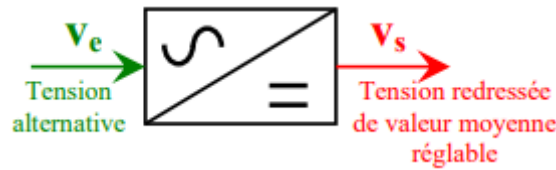


Figure II. 31 Convertisseur (AC) - (DC)

II.3.4.2. Redressement non commandé :

Monophasé simple alternance :

La tension n'apparaît aux bornes de la charge que si la tension de la source est positive entraînant une tension positive en sortie. Dès que la tension réseau est négative, la diode est bloquée : la tension aux bornes de la charge et le courant sont nuls [22].

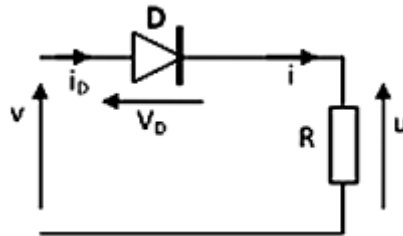


Figure II. 32 Redresser monophasé simple alternance

Grandeurs caractéristiques :

Valeur moyenne de u : $U_{moy} = \frac{V \cdot \sqrt{2}}{\pi}$ (II.37)

Valeur efficace de u : $U = \frac{V \cdot \sqrt{2}}{2}$ (II.38)

Tension maximale supportée par la diode : $VD_{max} = V \cdot \sqrt{2}$ (II.39)

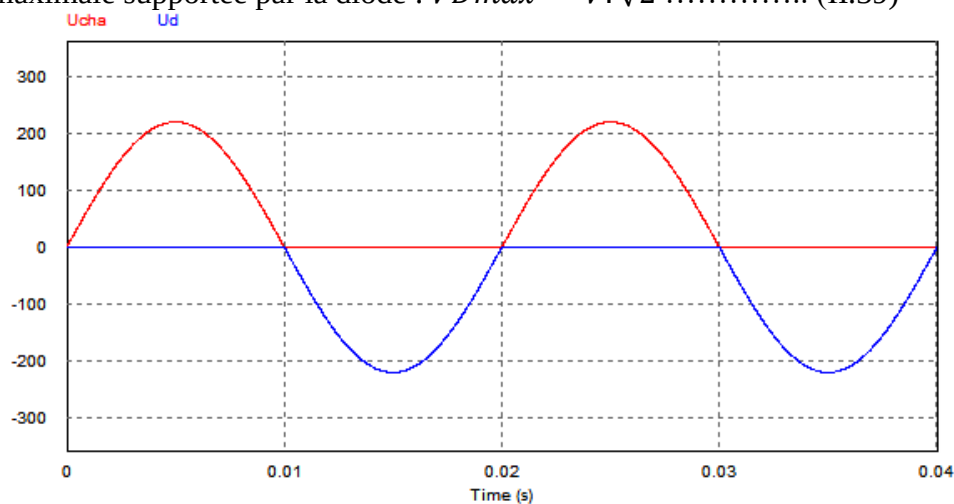


Figure II. 33 Courbe de tension de la charge et de diode (redresseur monophasé simple alternance).

Monophasé double alternance :

Une redresseuse double alternance monophasée est un redresseur redressant les alternances négatives et conservant les alternances positives du courant à l'entrée. La fréquence en sortie du redresseur est alors le double de la fréquence d'entrée [24].

PD2 :

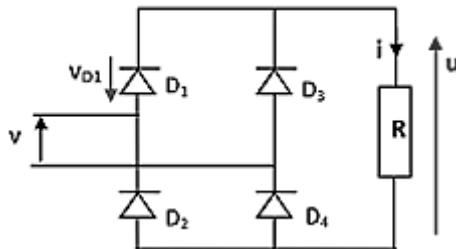


Figure II. 34 Schéma redresseur monophasé double alternance

- Grandeurs caractéristiques :

Valeur moyenne de u : $U_{moy} = \frac{2V \cdot \sqrt{2}}{\pi}$ (II.40)

Valeur efficace de u : $U = V$ (II.41)

Tension maximale supportée par la diode : $VD_{max} = V \cdot \sqrt{2}$ (II.42)

Courbs :

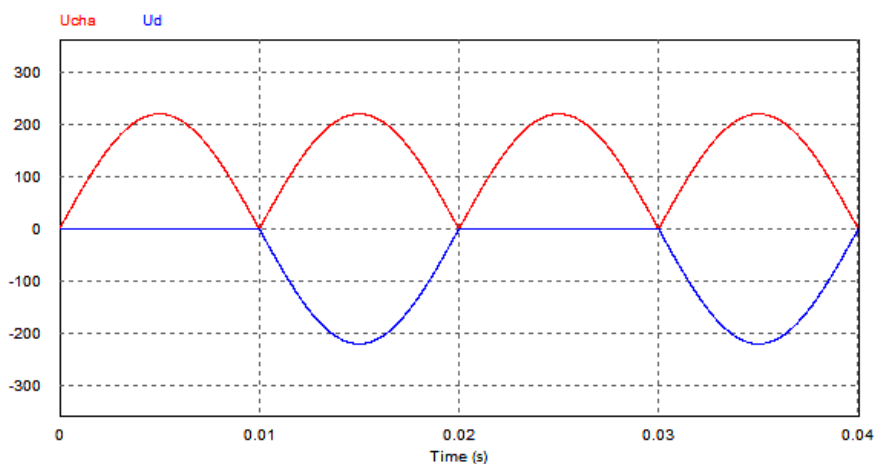


Figure II. 35 Courbe de tension de la charge et de diode (redresseur monophasé double alternance).

II.3.4.3. Redresseur triphasé :

Redresseur simple alternance triphasé(P3) :

Un redresseur simple alternance triphasé est un redresseur permettant de redresser une source triphasée. Le signal redressé a alors une fréquence trois fois supérieure au signal d'entrée [21].

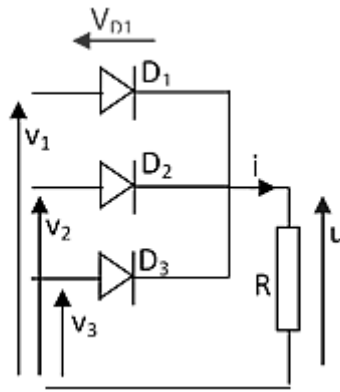


Figure II. 36 schéma de redresseuse simple alternance triphasée

- Grandeurs caractéristiques :

Valeur moyenne de u : $U_{moy} = -\frac{3\sqrt{3}V\sqrt{2}}{2\pi}$ (II.43)

Tension maximale supportée par la diode : $VD_{max} = \sqrt{3} \cdot V \cdot \sqrt{2}$ (II.44)

Courbs :

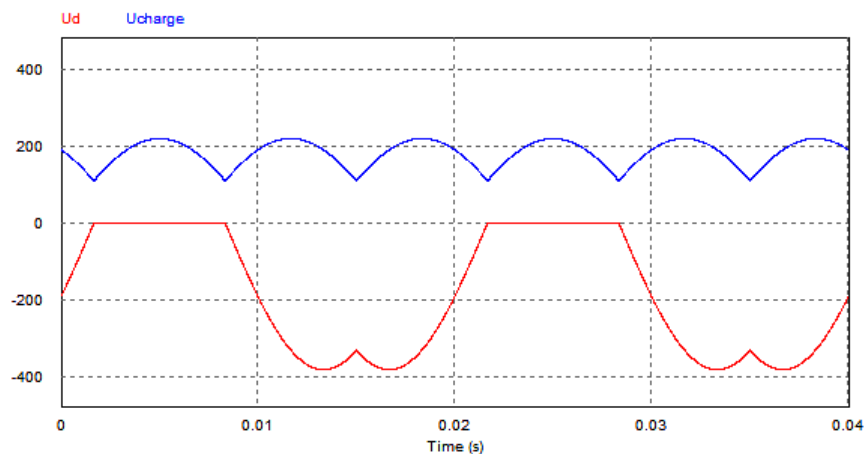


Figure II. 37 Courbe de tension de la charge et de diodes (redresseuse simple alternance triphasée).

Redressement triphasé double alternance non commandé (PD3):

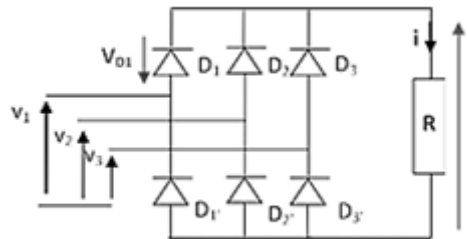


Figure II. 38 schéma de redresseuse double alternance triphasée

- Grandeurs caractéristiques :

Valeur moyenne de u : $U_{moy} = -\frac{3\sqrt{3}V\sqrt{2}}{\pi}$ (II.45)

Tension maximale supportée par la diode : $VD_{max} = \sqrt{3} \cdot V \cdot \sqrt{2}$ (II.46)

Courbs :

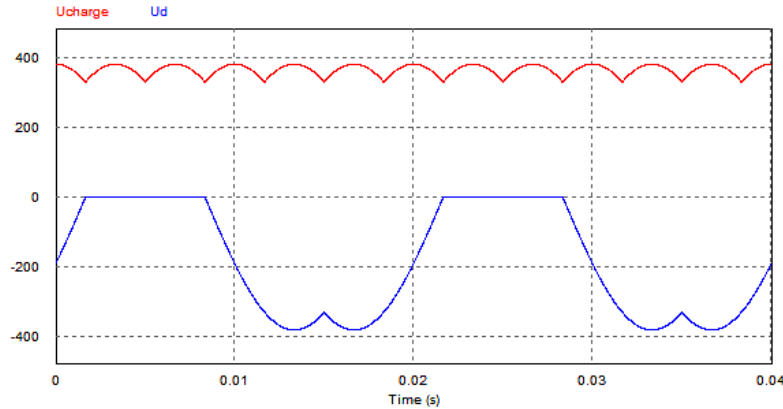


Figure II. 39 Courbe de tension de la charge et de diodes (redresseuse double alternance triphasée).

II.3.4.4. Redressement commandé :

Le redressement commandé est la conversion d'une tension alternative en une tension continue de valeur moyenne réglable. L'utilisation de commutateurs commandables tels que les thyristors permettent de réaliser des redresseurs dont la tension moyenne de sortie peut varier en fonction de l'angle d'amorçage δ des commutateurs [23].

Monophasé commandé simple alternance :

Le thyristor est passant qu'à partir du moment où l'on envoie le signal de gâchette et à la condition que la tension VAK soit positive.

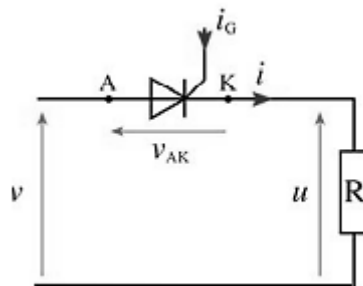


Figure II. 40 Redresseur commandé simple alternance

Grandeurs caractéristiques :

Valeur moyenne de la tension redressée :

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{\delta}^{\pi} \hat{u} \sin \theta d\theta = \frac{u}{2\pi} [-\cos \theta]_{\delta}^{\pi} \dots\dots\dots (II.47)$$

$$u = \frac{\hat{u}}{2\pi} (1 + \cos \delta) \dots\dots\dots (II.48)$$

- Courbs:

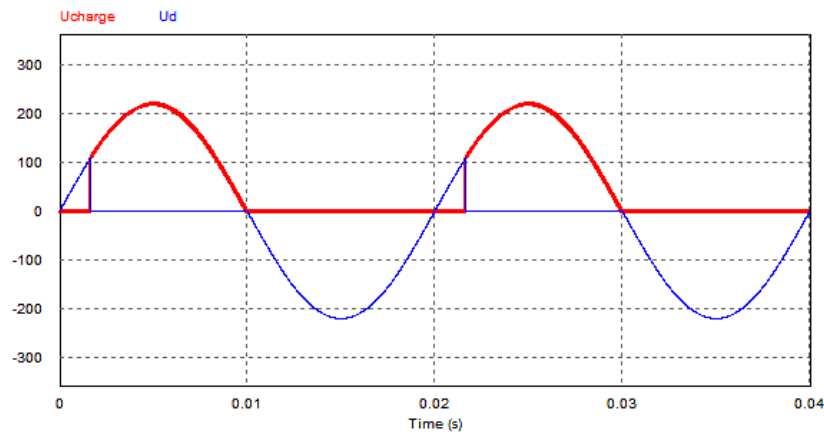


Figure II. 41 Courbe de tension de la charge (Redressement commandé simple alternance).

Monophasé commandé double-alternance :

- Pont mixte :

Sur charge inductive:

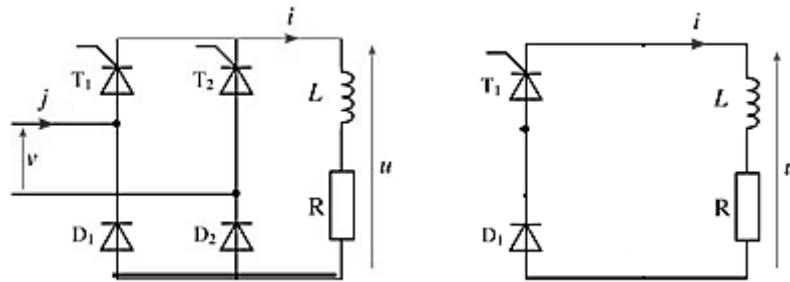


Figure II. 42 Redressement commandé double alternance

- Grandeurs caractéristiques :

Valeur moyenne de la tension redressée :

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{\delta}^{\pi} \hat{u} \sin \theta d\theta = \frac{\hat{u}}{2\pi} [-\cos \theta]_{\delta}^{\pi} \dots \dots \dots (II.49)$$

$$\bar{u} = \frac{\hat{u}}{2\pi} (1 + \cos \delta) \dots \dots \dots (II.50)$$

Valeur du courant moyen :

$$u = R \cdot i + L \frac{di}{dt} \dots \dots \dots (II.51)$$

$$\bar{i} = \frac{\bar{u}}{R} \dots \dots \dots (II.52)$$

- Courbs:

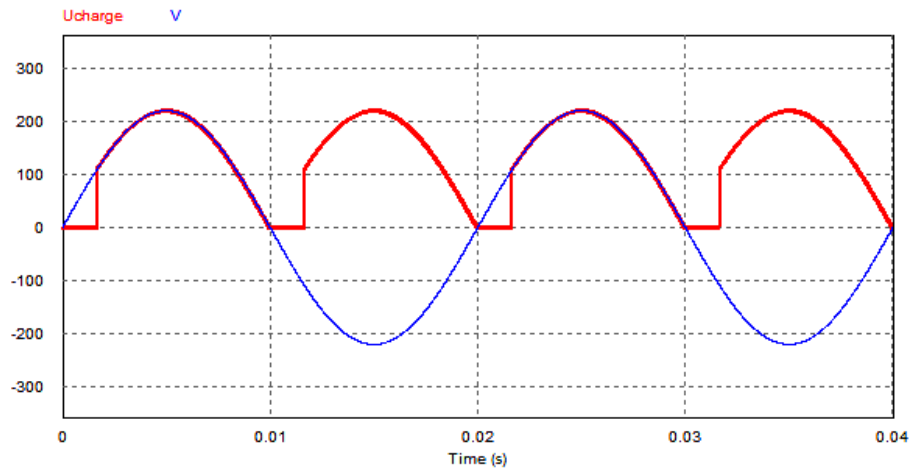


Figure II. 43 Courbe de tensions et de courant (cas de redressement Monophasé commandé double-alternance)

- Pont tout thyristors:

Sur charge résistive (R) :

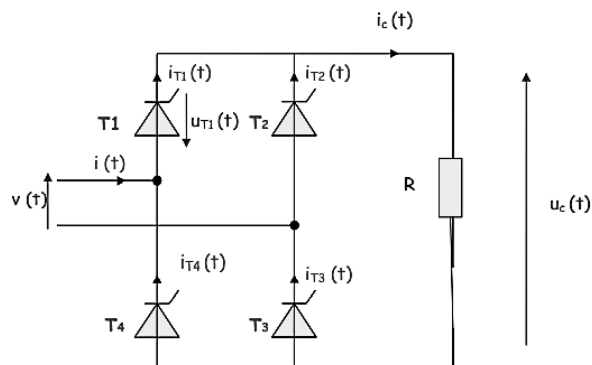


Figure II. 44 commandé double alternance (Pont tout thyristors)

- Grandeurs caractéristiques :

Valeur moyenne de la tension redressée :

$$\overline{uc} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{\delta}^{\pi} \widehat{uc} \sin \theta d\theta = \frac{\widehat{uc}}{2\pi} [-\cos \theta]_{\delta}^{\pi} \dots \dots \dots (II.53)$$

$$\overline{uc} = \frac{\widehat{uc}}{2\pi} (1 + \cos \delta) \dots \dots \dots (II.54)$$

- Courbs:

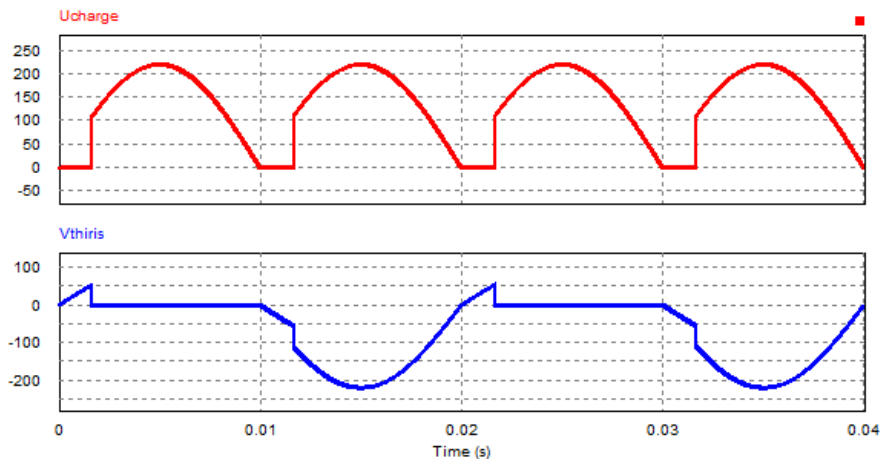


Figure II. 45 Courbe de tensions et de charge et de thyristors (Cas de redressement Monophasé commandé double-alternance - Pont tout thyristors)

Redressement triphasé commandé simple alternance :

Le montage redresseur P3 à thyristors est constitué de trois thyristors, connecté chacun à une phase du secondaire d'un transformateur triphasé, dont les enroulements secondaires sont groupés en étoile [23].

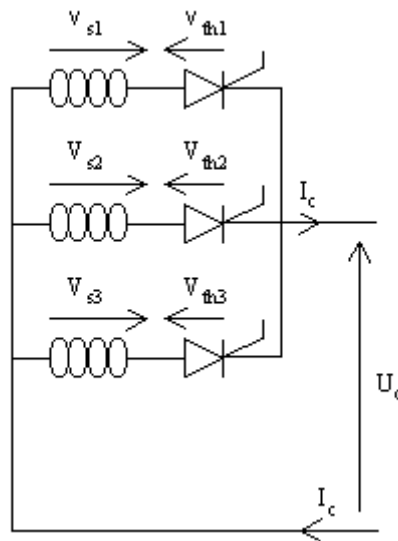


Figure II. 46 Redresseur triphasé commandé simple alternance

- Grandeurs caractéristiques :

Valeur moyenne de la tension redressée:

$$U_{moy} = \frac{1}{T} \int uc(t) d(t) = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\theta}^{\frac{5\pi}{6}+\theta} V_m \sin(\alpha) d(\alpha) \dots \dots \dots (II.55)$$

$$U_{moy} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m \cos(\theta) \dots \dots \dots (II.56)$$

Redressement triphasé commandé double alternance :

Un redresseur double alternance triphasé est un redresseur permettant de redresser une source triphasée. Le signal redressé a alors une fréquence six fois supérieure au signal d'entrée.

- **Pont triphasé mixte :**

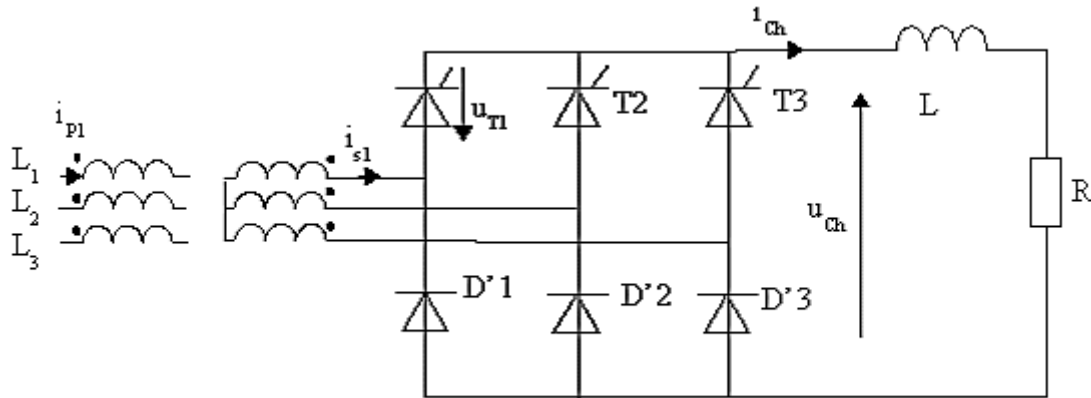


Figure II. 47 Redresseur triphasé commandé double alternance (Pont triphasé mixte).

- Grandeurs caractéristiques :

Valeur moyenne de la tension redressée:

$$U_{moy} = \frac{3U_m}{\pi} \left(\frac{1+\cos\theta}{2} \right) \dots\dots\dots (II.57)$$

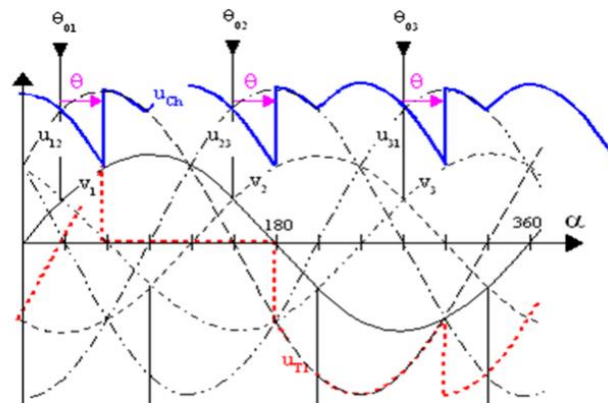


Figure II. 48 Les courbes de tension cas de Redressement triphasé commandé double alternance (Pont triphasé mixte)

II.4. Les interrupteurs de puissance :

II.4.1. Introduction :

L'électronique de puissance a pour ambition l'adaptation de la forme d'onde, l'amplitude, la fréquence ... de la tension d'alimentation aux besoins de charge alimentée en énergie électrique. Cette adaptation est réalisée en choisissant judicieusement des instants

fermetures et d'ouvertures d'un ensemble d'interrupteurs disposés selon un schéma bien précis entre la source et la charge alimentée.

L'électronique de puissance utilise des composants semi-conducteurs pour réaliser les fonctions de commutation (interrupteurs) chargées d'adapter les tensions et les courants issus d'un réseau de distribution pour satisfaire les besoins de la charge à alimenter.

Dans ce qui suit nous allons rappeler le principe de fonctionnement de certains de ces interrupteurs.

II.4.2. Diode de puissance :

La diode de puissance Figure ci-contre, est un dipôle passif polarisé. En électrotechnique, La diode est équivalente à un interrupteur unidirectionnel non commandé.



Figure II. 49 Symbole de diode.

Principe de fonctionnement [25] :

Le fonctionnement de la diode s'opère suivant deux modes :

- Diode passante (ou ON), tension $V_{AK} = 0$ pour $i_{AK} > 0$
- Diode bloquée (ou OFF), tension $i_{AK} = 0$ pour $V_{AK} < 0$

On dit aussi que la diode a une caractéristique à deux segments.

En résumé, une diode se comporte comme un interrupteur parfait dont les commutations sont exclusivement spontanées :

- Elle est fermée ON tant que le courant qui le traverse est positif.
- Elle est ouverte OFF tant que la tension à ses bornes est négative.

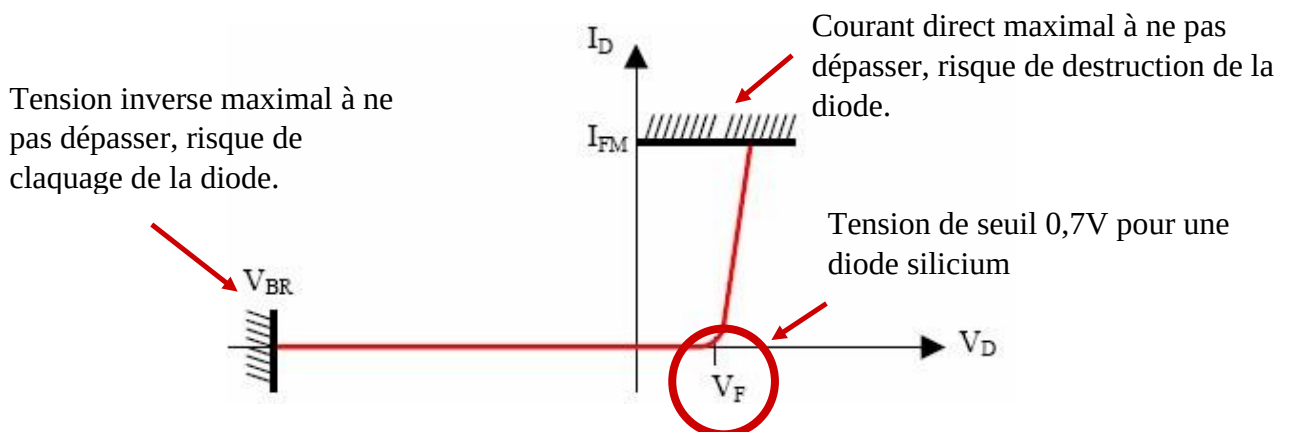


Figure II. 50 Principe de fonctionnement de diode

Caractéristique Tension-Courant :

Le fonctionnement réel est toujours caractérisé par ses deux états [23]:

- à l'état passant : $V_{AK} \approx 0$, le courant direct est limité au courant direct maximal
- à l'état bloqué : $i_{AK} \approx 0$, la tension inverse est limitée (phénomène de claquage par avalanche) à la tension inverse maximale.

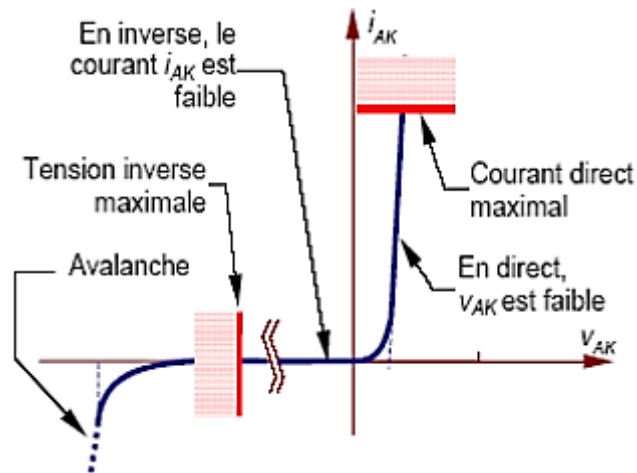


Figure II. 51 Caractéristique Tension-Courant de diode.

Critères de choix d'une diode :

Avant tout dimensionnement en vue de choisir les composants, on se base sur les valeurs extrêmes de ces grandeurs qui sont prises en considération :

- La tension inverse de V_{AK} à l'état bloqué.
- Le courant moyen de i_{AK} ($< i_{AK} >$) à l'état passant.

II.4.3. Le thyristor :

Le thyristor est un valve électronique unidirectionnel (le courant passe dans un seul sens) dont on peut commander la conduction. Comme la diode, il possède une anode et une cathode, mais il possède, en plus, une troisième électrode appelée gâchette. La gâchette permet de retarder l'amorce de la conduction [26].

Le thyristor ordinaire supporte une tension négative, il reste bloqué quand la tension à ses bornes reste positive. La gâchette permet alors de l'amorcer. Sous l'effet du circuit dans lequel le thyristor est inséré, son courant direct évolue.

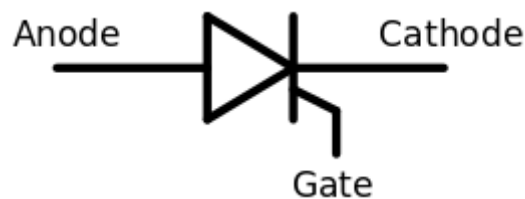


Figure II. 52 Symbole de thyristor.

Principe de fonctionnement [27] :

- Pour qu'un thyristor conduise (interrupteur fermé) :
 - Il faut que la tension $V_{AK} > 0$.
 - Envoyer un courant i_G dans la gâchette pour amorcer le thyristor.

Dès que ces deux conditions sont remplies, le thyristor conduit tant que le courant i qui circule dans le thyristor de l'anode vers la cathode reste $>$ au courant hypostatique.

Dès que le thyristor entre en conduction, il n'est plus nécessaire de faire circuler un courant i_G dans la gâchette.

- Pour qu'un thyristor se bloque (interrupteur ouvert) :
 - Il suffit que le courant i s'annule ou d'appliquer une tension V_{AK} fortement négative.

Caractéristique Tension-Courant :

Le fonctionnement réel est, comme pour une diode, caractérisé par ses deux états

- À l'état passant, $V_{AK} \approx 0$, le courant direct est limité par le courant direct maximal.
- À l'état bloqué, $i_{AK} \approx 0$, la tension inverse est limitée (phénomène de claquage par avalanche) par la tension inverse maximale qui est la tension de retournement.

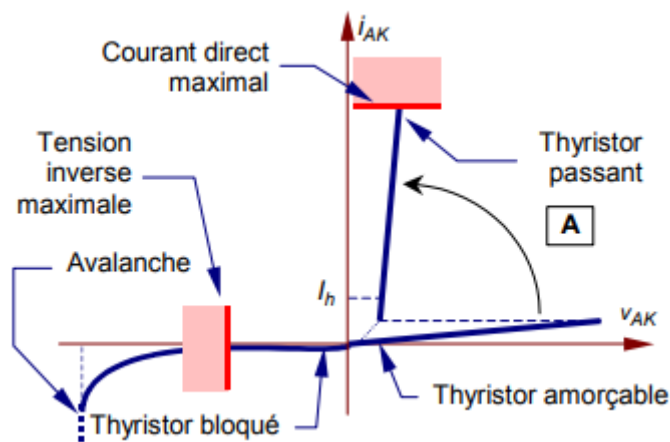


Figure II. 53 Caractéristique Tension-Courant de thyristor.

Critères de choix d'un thyristor [23] :

Après avoir établi les chronogrammes de fonctionnement du thyristor (V_{AK} et i_{AK}) dans le système envisagé, on calcule les valeurs extrêmes prises par :

- La tension inverse V_{RRM} ou directe V_{DRM} maximale de V_{AK} .
- Le courant moyen de i_{AK} à l'état passant.

II.4.4. Le thyristor GTO :

Le thyristor GTO (Gate Turn Off) est une évolution du thyristor classique qui a la propriété de pouvoir être bloqué à l'aide de la gâchette, contrairement aux thyristors classiques. Ses deux symboles diffèrent un peu du thyristor au niveau de la gâchette [28].

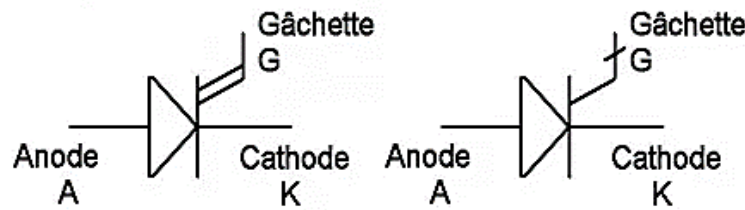


Figure II. 54 Thyristor GTO

Principe de fonctionnement [23]:

- L'état passant (ON) :

Un GTO s'amorce par la gâchette (avec $V_{GK} > 0$) comme un thyristor ordinaire.

Le courant de gâchette peut être de quelques ampères. Une fois la conduction amorcée, elle se maintient.

- L'état bloqué (OFF) :

Le mode de blocage spécifique du GTO consiste à détourner le quasi-totalité du courant d'anode dans la gâchette. En pratique, on applique donc une tension négative sur la gâchette ($V_{GK} < 0$) pour détourner le courant. L'opération doit avoir une durée minimale pour assurer un blocage fiable.

II.4.5. Le Triac :

Le triac est un composant électronique utilisé comme interrupteur commandé. Il est adapté aux tensions alternatives et peut commander des moteurs électriques, des variateurs de lumière ou toute autre charge secteur.

Contrairement au thyristor qui ne peut conduire que dans un sens, le triac peut conduire dans les deux sens. Il est bidirectionnel, alors que le thyristor est unidirectionnel.

Le triac est apparu en 1964 et doit son nom à l'abréviation (Triode Alternating Current).

Le triac se commande aussi à l'aide d'une gâchette. On peut le décrire comme deux thyristors montés tête bêche [29]

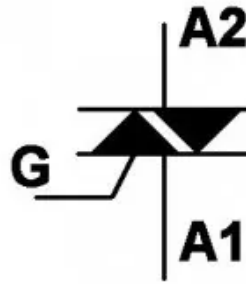


Figure II. 55 Symbole de triac.

Principe de fonctionnement :

- L'état passant (ON) :
Pour commander le triac, un courant doit passer par la gâchette (une impulsion pour des valeurs positives ou négatives).
- L'état bloqué (OFF) :
Une fois amorcé, il reste passant. Pour le désamorcer, il faut annuler le courant Anode1/Anode2.

Caractéristique Tension-Courant :

Valeurs maximales admissibles :

IF_{max} : courant direct ou inverse maximal admissible.

VDRM : tension maximale directe répétitive.

VRRM : tension maximale inverse répétitive.

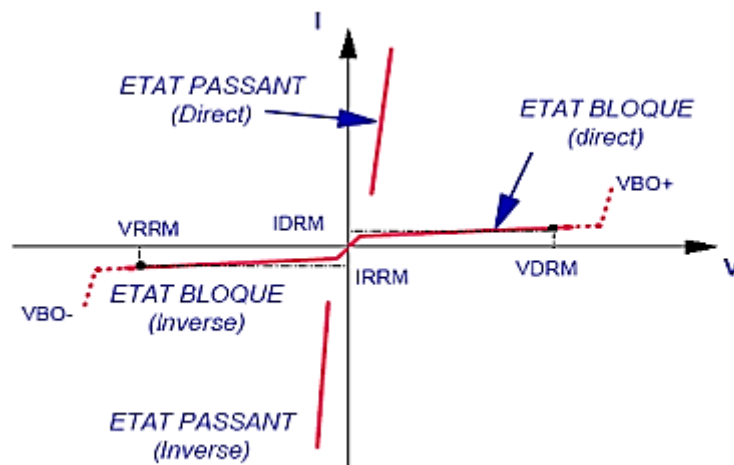


Figure II. 56 Caractéristique Tension-Courant de triac

II.4.6. Le Transistor :

II.4.6.1. Le Transistor MOS (Métal Oxyde Semi-conducteur):

Séduisant par sa commande en tension et par ses temps de commutation inférieurs à 100 ns, ce transistor présente cependant l'inconvénient d'une chute de tension directe relativement importante par rapport à ses concurrents. Sa limite se situe vers 50 A et 500 V [26].

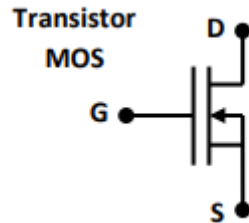


Figure II. 57 Symbole de transistor MOS.

II.4.6.2. Transistor bipolaire de puissance :

Un transistor bipolaire (NPN ou PNP) est formé de deux jonctions PN. Le transistor est un composant totalement commandé : à la fermeture et à l'ouverture. Il n'est pas réversible en courant, ne laissant passer que des courants de collecteur i_C positifs. Il n'est pas réversible en tension, n'acceptant que des tensions V_{CE} positives lorsqu'il est bloqué.

Le transistor bipolaire possède trois connexions : la base, le collecteur et l'émetteur. Ci-contre, le symbole du transistor. La flèche permet de repérer l'émetteur. Si elle "sort" du transistor, c'est un NPN, si elle "rentre", c'est un PNP. Un transistor PNP s'analyse comme un NPN, mais en inversant les signes des tensions et des courants [30]

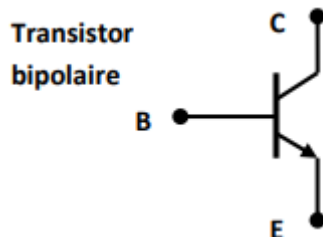


Figure II. 58 Symbole de transistor bipolaire de puissance.

Principe de fonctionnement :

- Transistor bloqué (B) ou OFF :

État obtenu en annulant le courant i_B de commande, ce qui induit un courant de collecteur nul et une tension V_{CE} (tension de source). L'équivalent d'un commutateur ouvert.

- Transistor saturé (S) ou ON :

Ici, le courant i_B est tel que le transistor impose une tension V_{CE} nulle tandis que le courant i_C atteint une valeur limite dite de saturation, i_{Csat} . L'équivalent d'un commutateur fermé.

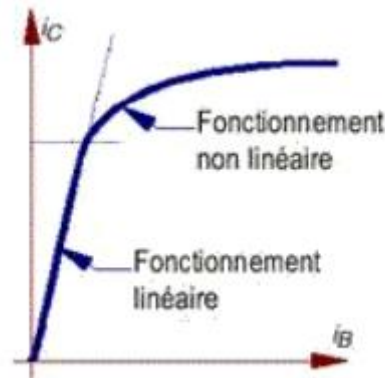


Figure II. 59 Caractéristique statique d'un Transistor.

II.4.6.3. L'IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor):

Le transistor IGBT est un semi-conducteur se comportant comme un interrupteur électronique à haute vitesse permettant de construire des convertisseurs continu-continu et continu-alternatif extrêmement flexibles.

L'IGBT est un transistor dont la conduction est amorcée et désamorcée en appliquant une tension appropriée sur la gâchette (la base). Comme dans un transistor conventionnel, les trois bornes sont nommées collecteur C, émetteur E et base B. Les caractéristiques à l'état passant et à l'état bloqué sont montrées à la Figure II.60 [26]

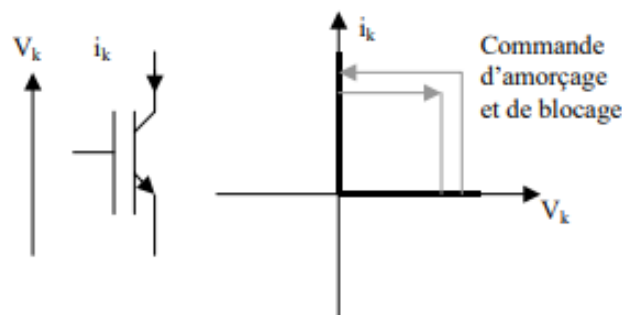


Figure II. 60 Caractéristique statique et dynamique d'un IGBT

II.4.6.4. Le MOSFET de puissance :

Le MOSFET de puissance est un semi-conducteur à trois bornes qui s'appellent drain D, source S et grille G. Les transistors MOSFET sont idéaux en électronique de puissance pour la commutation rapide et le fonctionnement linéaire [26].

Un des principaux avantages des transistors MOSFET de puissance, c'est qu'ils nécessitent peu de puissance pour leur commande (ils sont grosso modo commandés en tension). Les imperfections des MOSFET sont principalement de deux types [31]:

- Résistance résiduelle à l'état passant (pas 0 Ohm comme un vrai fil).
- Temps de commutation et pertes lors de ces commutations. Plus la commutation est rapide, plus petite est la perte (dissipation pendant la transition de l'état passant à l'état bloqué ou inversement)

Il est essentiel de dimensionner correctement le transistor MOSFET et d'optimiser la commande de sa grille pour minimiser ces pertes.

Les transistors MOSFET de puissance sont très largement des transistors canal N (NMOS), même dans des structures symétriques d'alimentations à découpage et de commande de moteur (pont en H ou demi pont).

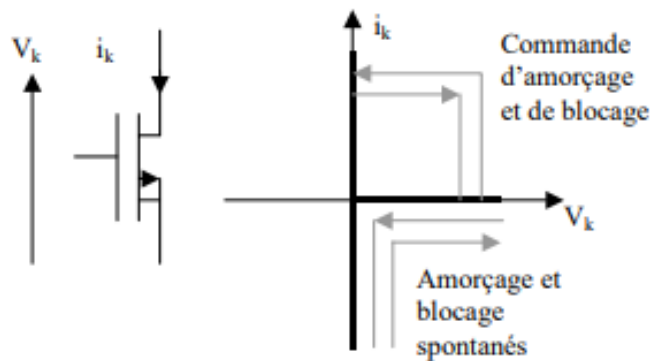


Figure II. 61 Caractéristique statique et dynamique d'un MOSFET

Ces composants sont à la base des interrupteurs statiques et rapides utilisés dans les convertisseurs statiques. Dans ce qui suit nous allons décrire les principales fonctions qu'il est possible de réaliser en pratique.

II.5. Interrupteurs statiques :

Ce sont dipôles présentant, en direct et en inverse, des propriétés décrites par l'une des cinq fonctions essentielles : O, F, OCF, FCO, CFO.

II.5.1. Fonction élémentaire du travail en commutation :

Les dispositifs qui vont servir d'interrupteurs en électronique de puissance doivent travailler dans l'un des états stables suivants :

- Etat ouvert (ou bloqué, noté désormais O).
- Etat fermé (ou conducteur, noté F).

On note K un dipôle-interrupteur et V_k et i_k la différence de potentiel à ses bornes et l'intensité du courant direct [38]

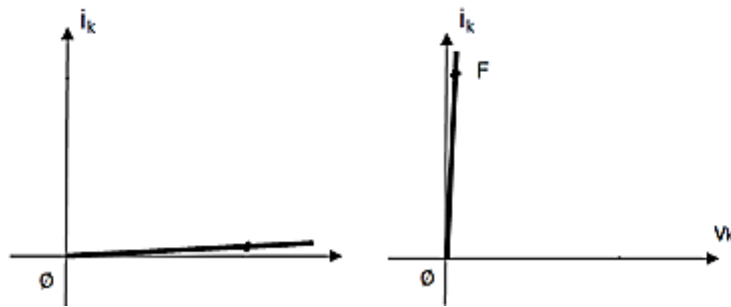


Figure II. 62 les états stables d'interrupteurs.

II.5.2. Fonction avec commutation commandées :

Les convertisseurs de l'électronique de puissance ne se contentent pas d'interrupteurs réalisant spécifiquement et uniquement les fonctions O (ouvert) et F (fermé) ; il convient de réaliser des dispositifs assurant le passage d'un état à l'autre. On peut concevoir trois fonctions avec commutation, représentées sur la Figure II.63, définies ainsi [38]:

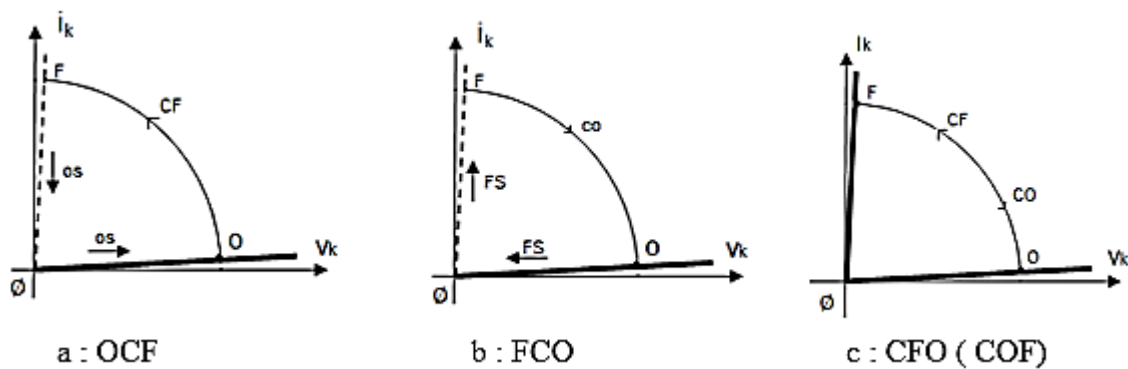


Figure II. 63 Fonction avec commutation commandées

- Figure II.63.a : fonction OCF : l'interrupteur est naturellement à l'état ouvert (O) mais se ferme sur commande (CF), le retour à l'état ouvert ne pouvant s'effectuer que de façon naturelle (spontanée).
- Figure II.63.b : fonction FCO : c'est la fonction duale de la précédente : l'interrupteur est naturellement fermé, s'ouvre sur commande puis se ferme de façon naturelle.
- Figure II.63.c : fonction CFO (ou COF) : l'état (O ou F) de l'interrupteur dépend de sa commande et on peut commander son ouverture et sa fermeture, cette fonction est sa propre duale.

II.5.3. Interrupteurs électroniques fondamentaux :

Le tableau des interrupteurs statiques (Tableau 1) montre qu'on peut les réaliser à partir de quatre dipôles de base que l'on nommera « interrupteurs fondamentaux ». On pouvait aisément prévoir ce résultat à la suite de l'analyse des cinq fonctions essentielles de la commutation [38]:

On pourra éventuellement désigner ces interrupteurs en utilisant le nom du composant le plus simple réalisant les mêmes fonctions mais on ne devra pas oublier :

- Que chaque dipôle peut être synthétisé de diverses façons.
- Que l'interrupteur électronique complet comprend, en plus du composant de puissance et de ses auxiliaires, les circuits de protection et de commande.

Fonctions	Exemple de dipôle	Fonctions	Exemple de dipôle
		Le dipôle dual est son inverse	

		Le dipôle dual est son inverse	
		CFO –CFO est son propre dual et son propre inverse	

Table 1 : Le tableau des interrupteurs statiques

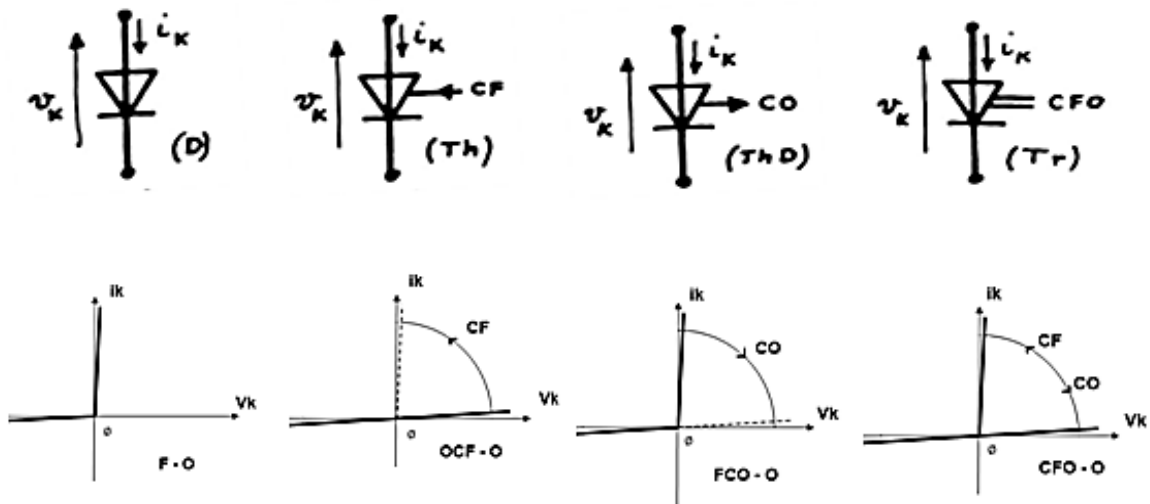


Figure II. 64 Les quatre interrupteurs fondamentaux.

Les quatre interrupteurs fondamentaux sont donc (Figure II.64)

- L'interrupteur unidirectionnel non commandé (ou diode, D) : F-O.
- L'interrupteur unidirectionnel commandé à la fermeture (thyristor ou dipôle équivalent ; Th) : OCF-O.

- L'interrupteur unidirectionnel commandé à l'ouverture (THD), qui n'est pas le dual du thyristor mais a un comportement dual en direct : FCO-O.
- L'interrupteur unidirectionnel commandé à la fermeture et à l'ouverture (transistor ou équivalent, Tr) : CFO-O.

II.5.4. Performances des interrupteurs électroniques :

Il est indispensable de connaître les caractéristiques des interrupteurs électroniques pour assurer le bon choix et leur utilisation en toute sécurité. Ces caractéristiques sont [39]:

- 1) Les valeurs maximales des tensions bloquées en régime permanent ($t \rightarrow \infty$) direct (V_D) et inverse (V_R).
- 2) Les valeurs maximales des pointes des tensions bloquées en régime répétitif direct (V_{DRM}) et inverse (V_{RRM}).
- 3) Les valeurs maximales des pointes des tensions bloquées en régime non répétitif direct (V_{DSM}) et inverse (V_{RSM}).
- 4) Les valeurs maximales des courants moyens direct (I_{DAV}) et inverse (I_{RAV}).
- 5) Les valeurs maximales des courants efficaces direct (I_{DRMS}) et inverse (I_{RRMS}).
- 6) Les valeurs maximales des courants de surcharge direct (I_{DSM}) et inverse (I_{RSM}).
- 7) Les durées de fermeture (T_{ON}) et d'ouverture (T_{OFF}).
- 8) Les caractéristiques du signal de commande (tension, courant et durée).

II.6. Compatibilité des Sources de tension et de courant [40] :

II.6.1. Source de tension parfaite :

Une source de tension parfaite est un dipôle actif qui présente à ses bornes une tension U indépendante du courant débité.

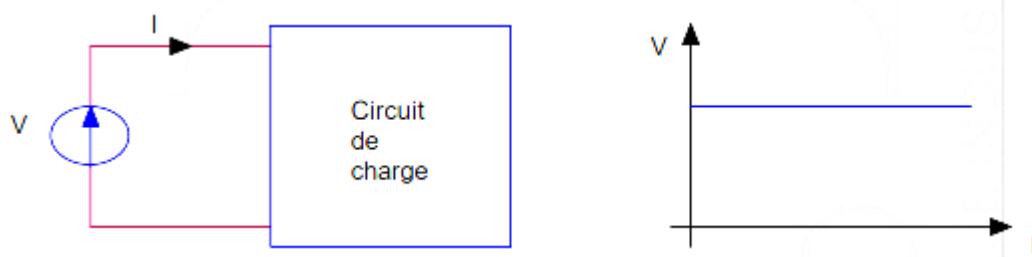


Figure II. 65 Source de tension

Le condensateur se comporte au moment des commutations comme une source de tension car la tension ne peut pas subir de discontinuité :

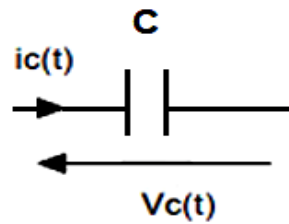


Figure II. 66 Condensateur

$$I_c(t) = \frac{dq}{dt} = C \frac{dV(t)}{dt} \dots\dots\dots (II.58)$$

II.6.2. Source de courant parfait :

Une source de courant parfaite est un dipôle actif débitant un courant électrique I indépendant de la tension V apparaissant à ses bornes.

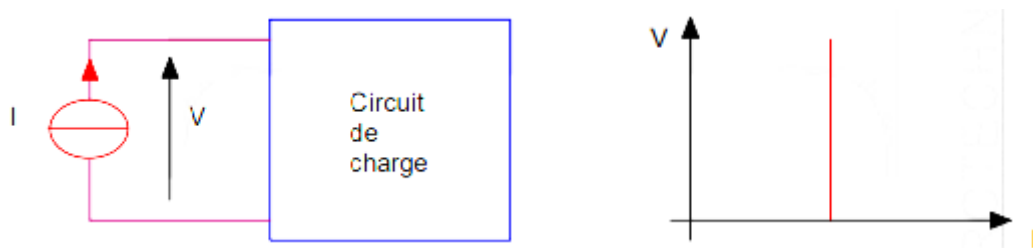


Figure II. 67 Source de courant

L'inductance se comporte au moment des commutations comme une source de courant car le courant ne peut pas subir de discontinuité :

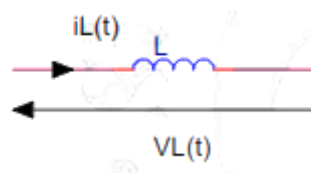
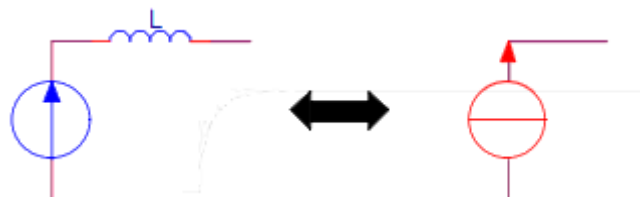


Figure II. 68 Inductance

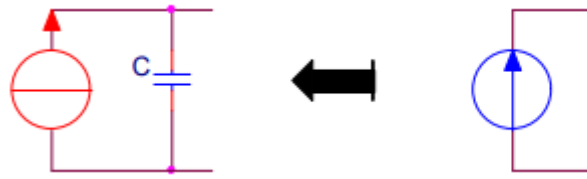
$$V_L = \frac{d\Phi}{dt} = L \frac{di_L(t)}{dt} \dots\dots\dots (II.59)$$

Remarques:

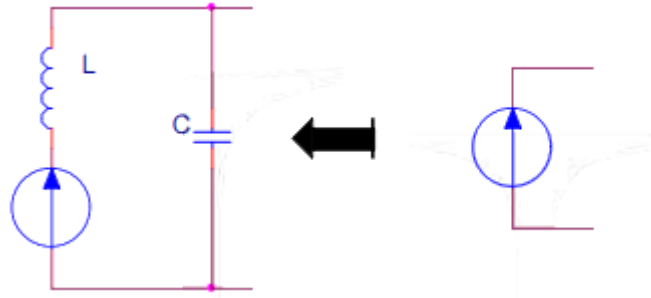
- une source de tension en série avec une inductance est équivalent à une source de courant.



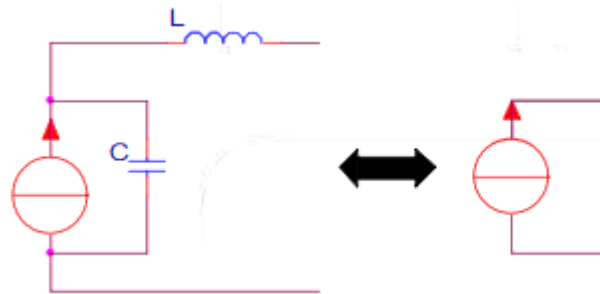
- une source de courant en parallèle avec un condensateur est équivalente à une source de tension.



- pour affirmer une source de tension, on disposera d'un condensateur en parallèle.



- Pour affirmer une source de courant, on disposera d'une inductance en série.



Remarque :

- En électronique de puissance, il faudra être vigilant au câblage qui introduit des inductances parasites.
- La présence d'inductances parasites conduit à ajouter un condensateur en parallèle avec la source de tension.
- Il faudra être aussi vigilant aux vitesses de commutation des interrupteurs.

II.6.3. Réversibilité des sources d'entrée et de sortie :

La détermination des réversibilités des sources d'entrée et de sortie est fondamentale car elle permet de déduire les caractéristiques statiques des interrupteurs.

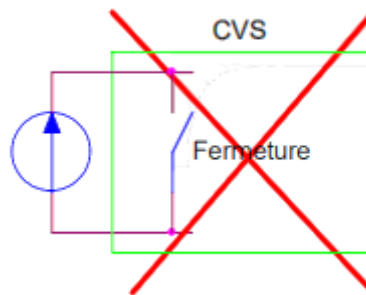
- Une source est dite réversible en tension si la tension à ses bornes peut changer de signe.
- Une source est dite réversible en courant si le courant qui la traverse peut s'inverser.

Exemple :

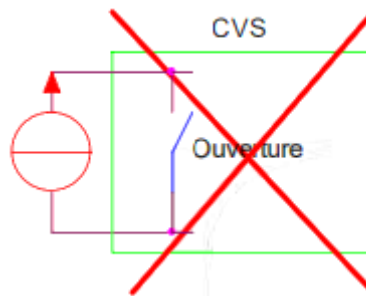
- Le circuit d'induit d'une machine à courant continu est équivalent à une source en courant à cause de l'inductance des bobinages. Si on dispose d'une inversion de la vitesse et d'un freinage électrique (inversion du courant d'induit), la source sera réversible en tension et en courant.
- Une batterie est une source de tension non réversible en tension et réversible en courant (charge et décharge).

II.6.4. Règles d'interconnexion des sources :Règle n°1 :

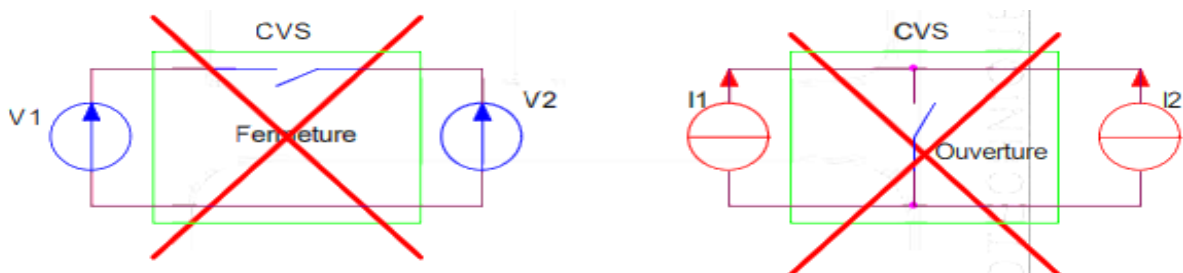
Une source de tension ne doit jamais être court-circuitée mais elle peut être ouverte. Sinon le courant serait destructeur.

Règle n°2 :

Le circuit d'une source de courant ne doit jamais être ouvert mais il peut être court-circuité. Sinon l'ouverture provoque une surtension.

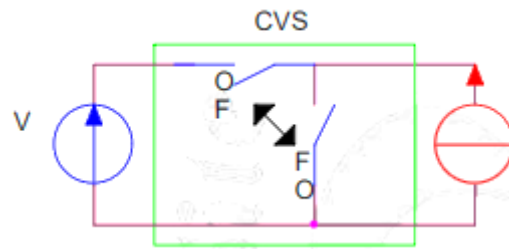
Règle n°3 :

Il ne faut jamais connecter entre elles deux sources de même nature.



Règle n°4 :

On ne peut connecter entre elles qu'une source de courant et une source de tension. Les deux interrupteurs doivent être rigoureusement complémentaires.

**II.6.5. Conclusion :**

- Si le convertisseur statique dispose des interrupteurs seulement, on ne sait que connecter des sources de natures différentes.
- Le plus petit convertisseur a au moins deux interrupteurs.
- Le fonctionnement de ces deux interrupteurs doit être rigoureusement complémentaires.
- On peut alors parler de cellule élémentaire de commutation :

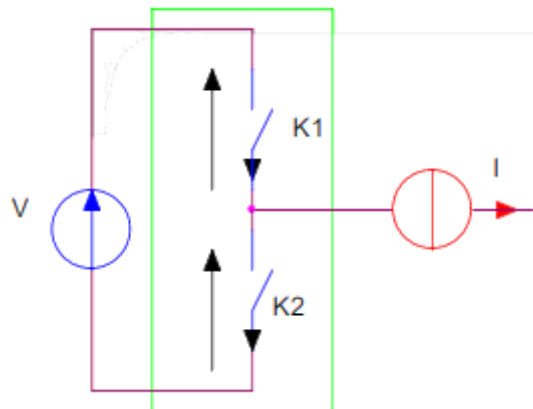


Figure II. 69 Cellule de commutation

II.7. Méthode de travail :

La « construction » d'un convertisseur s'effectuera en suivant le plan ci-dessous :

- Le convertisseur est défini par sa fonction ou par son but

Exemple : - Hacheur. Sa fonction est de produire des grandeurs unidirectionnelles (ou plus rigoureusement de valeurs moyennes non nulles) réglables, à partir de grandeurs d'entrée de même nature.

- On peut aisément imaginer un montage de principe simple susceptible de réaliser la fonction projetée.

Exemple d'hacheur : un interrupteur K placé entre source et charge permet facilement de mouler l'alimentation de cette dernière. L'interrupteur, de fonction encore inconnue, est représenté par un rectangle (Figure II.70).

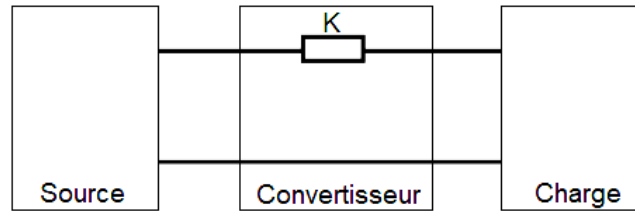


Figure II. 70 schéma d'un convertisseur statique

- On complète le schéma en tenant compte des contraintes liées au cahier des charges.

Exemple : - Hacheur sur charge inductive : la nature de la charge interdit un courant de sortie discontinu, ce qui impose la présence d'un second interrupteur, entre les bornes de sortie (Figure II.71).

Si la source n'est pas imposée, on voit qu'elle doit accepter des discontinuités de courant (source de tension).

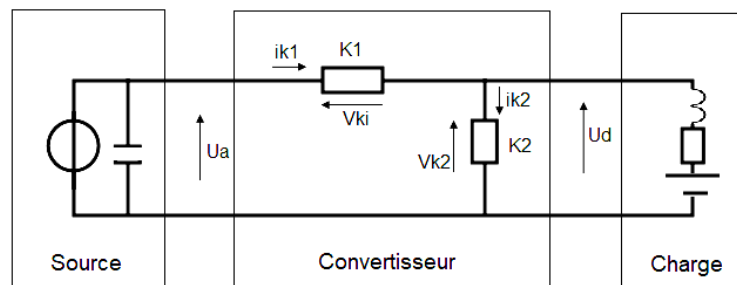


Figure II. 71 Circuit d'un hacheur

- On élabore le diagramme de fonctionnement des interrupteurs en fonction du but recherché et des contraintes d'emploi.

Exemple : - Hacheur à la fréquence de travail $f = 1/T$, si on ferme K_1 pendant la portion αT de la période T , K_2 doit être fermé pendant la durée complémentaire $T - \alpha T$ (si la conduction dans la charge est ininterrompue). D'où le chronogramme de U_d :

$$u_d = U_a \text{ lorsque } K_1 \text{ est fermé}$$

$$u_d = 0 \text{ lorsque } K_2 \text{ est fermé}$$

La valeur moyenne U_d de $u_d(t)$, qui vaut ici αU est bien réglable par action sur le rapport cyclique α (cf. Figure II.72)

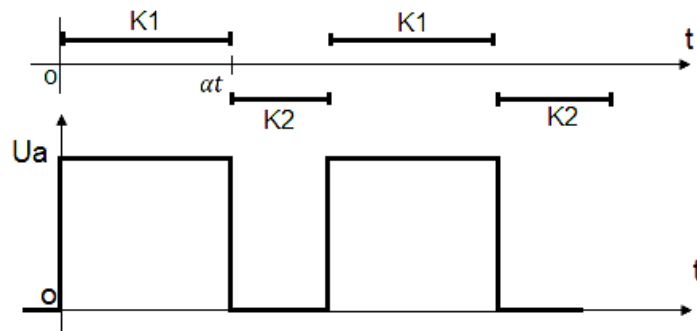


Figure II. 72 Chronogramme de fonctionnement d'hacheur

- On construit les chronogrammes des grandeurs v_k et i_k associés à chaque interrupteur.
- On en déduit l'évolution du point figuratif du plan $v_k - i_k$ cette évolution permet d'identifier chaque interrupteur, c'est-à-dire de déterminer les fonctions de commutation qu'il réalise.

Remarque :

- La transcription de l'évolution de $v_k(t)$ et $i_k(t)$ dans le plan $v_k - i_k$, lors d'une commutation, s'effectue en notant que deux cas de figure peuvent se présenter :
- Les deux états extrêmes de la transition sont représentés par des points situés tous deux dans le quadrant I (ou bien dans le quadrant 3) du plan $v_k - i_k$ (v_k et i_k étant mesurés dans la convention récepteur) ; alors, si v_k et i_k évoluent simultanément, on est présence d'une commutation commandée de l'interrupteur K (Figure II.73a et Figure II.73b)
- Les points figuratifs des états extrêmes de la commutation ne sont pas tous deux dans le quadrant I (ou bien tous deux dans 3) ; la commutation de K ne peut alors être que naturelle (spontanée) : en effet, on peut concevoir qu'un interrupteur bloquant initialement une tension positive (Figure II.74c) soit traversé par un courant d'intensité négative après une fermeture commandée de cet interrupteur ; c'est bien le montage qui provoque la commutation de l'interrupteur.

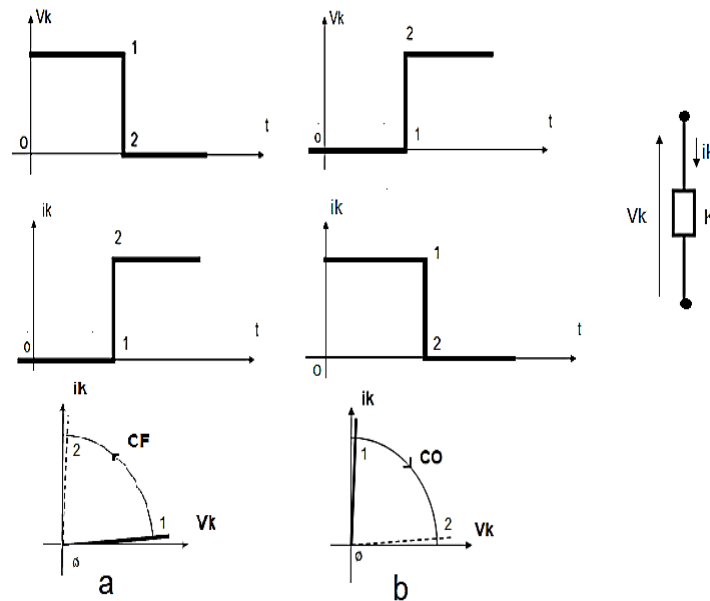


Figure II. 73 Les chronogrammes des grandeurs V_k et i_k et les points figuratif des plan V_k et i_k

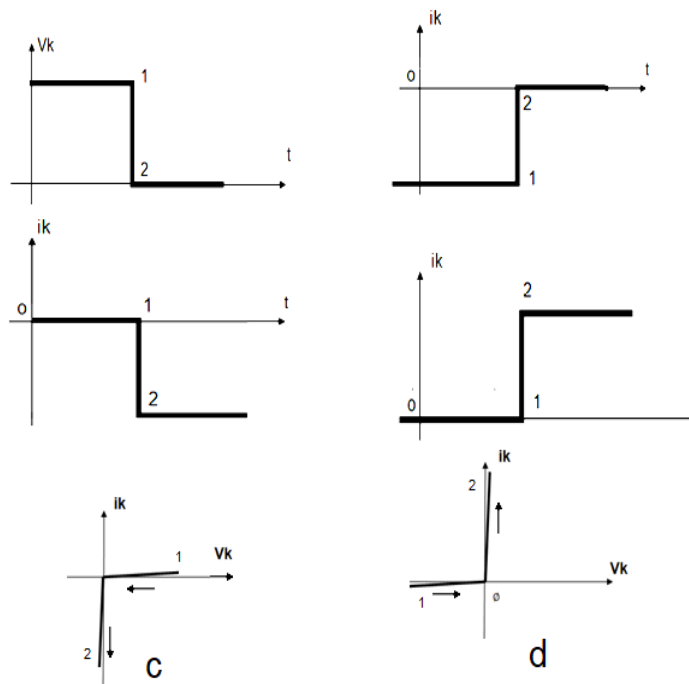


Figure II. 74 Chronogramme des grandeur V_k et i_k des interrupteurs d'hacheur série

II.8. Les moyens de compensation des harmoniques :

II.8.1. Le Filtre actif :

II.8.1.1. Introduction :

Le filtrage actif fait l'objet de recherches intensives depuis de nombreuses années. Il compense les courants harmoniques générés par les charges polluantes connectées au réseau. La figure II.75 montre la structure générale d'un filtre actif parallèle. Ce filtre peut être divisé en une partie puissance et une partie commande.

Le premier comprend des onduleurs, des filtres de découplage et des sources de stockage d'énergie. Les deux derniers éléments déterminent le type de filtre actif (structure de tension ou de courant), selon qu'il est mis en œuvre avec un onduleur de tension ou un onduleur de courant.

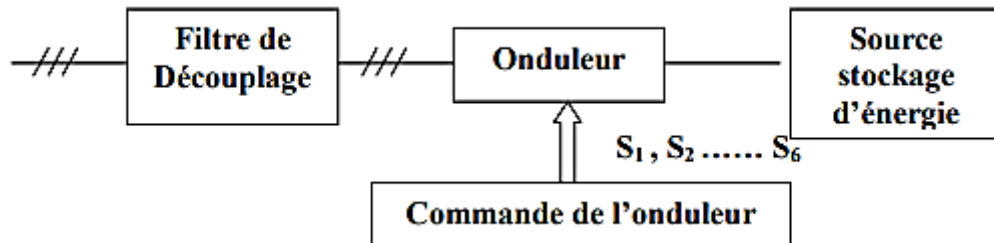


Figure II. 75 Structure générale d'un filtre actif parallèle

II.8.1.2. Structure du filtre active de puissance :

L'onduleur est un élément important du filtre actif. Dépend du type de filtre de couplage le reliant au réseau ainsi que de l'élément passif qui lui sert de source d'énergie, Il s'agit d'un onduleur de tension ou de courant. L'onduleur peut contrôler la tension ou le courant, il peut donc être utilisé comme source de tension ou de courant ou d'alimentation pour des circuits externes.

La source d'énergie composant le filtre peut être une source de tension ou de courant. Comme l'onduleur n'a pas à fournir de puissance active, cette source peut être un élément réactif, condensateur ou inductance, dans lequel on maintient constante la valeur moyenne de l'énergie stockée [32,35]. Cet élément de stockage d'énergie n'a pas besoin d'être lui-même alimenté par une source continue. La raison est que le filtre actif peut être contrôlé de manière à suppléer aux pertes de sa source d'énergie à partir du courant fondamental généré par la source du réseau auquel il est connecté [32,33,34-36].

On s'intéresse, dans ce qui suit à l'étude du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à base d'onduleur de tension

II.8.1.3. Filtre actif parallèle à structure de tension :

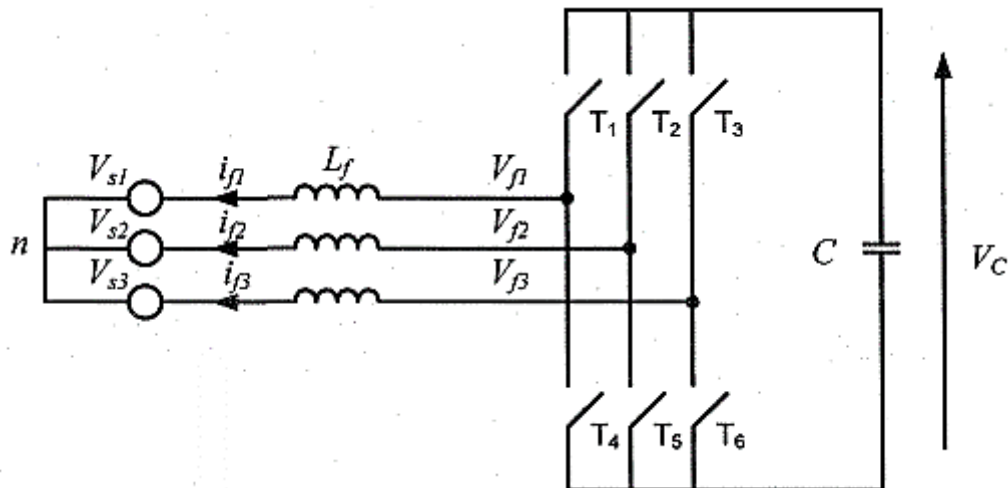


Figure II. 76 Filtre actif parallèle à structure de tension

La figure II.76 montre la structure de filtre actif parallèle à structure de tension, Les éléments de cette architecture sont :

- Un élément de stockage capacitif représenté par condensateur.
- Un filtre de découplage représenté par l'inductance.
- Un onduleur de tension.

L'élément servant de source d'énergie est la capacité C qui doit délivrer une tension à valeur quasi constante. La fluctuation de cette tension doit être faible. Elle ne doit pas dépasser la limite de tension supportable par les semi-conducteurs. De plus, pour une inductance L_f donnée, cette tension ne doit pas être inférieure à une certaine limite, car cela affecterait les performances de compensation du filtre actif [34,35]. L'inductance par laquelle l'onduleur est relié au réseau sert à filtrer les courants harmoniques hautes fréquences. Ces courants harmoniques sont causés par les impulsions de tension générées par l'onduleur.

II.8.1.4. Commande des filtres actifs :

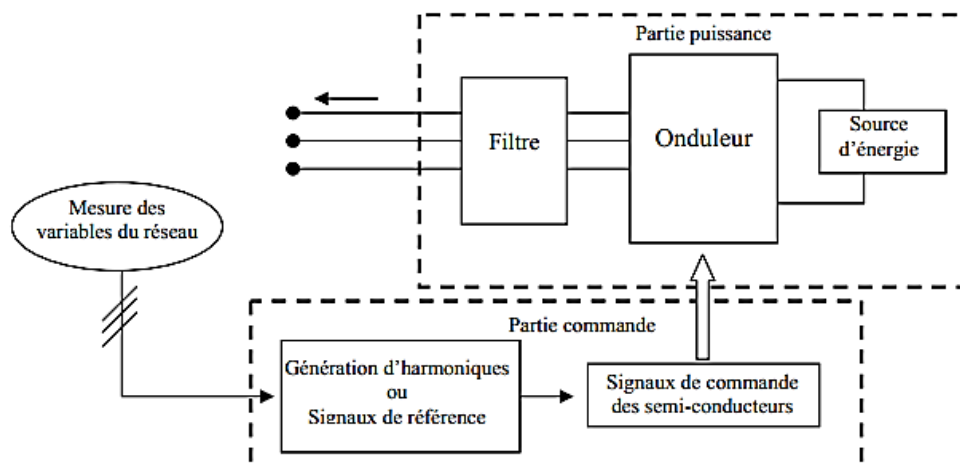


Figure II. 77 Schéma synoptique d'un filtre actif parallèle

La partie contrôle est généralement divisée en deux parties. La première, qui est très importante pour les performances du filtre, est la génération des signaux harmoniques de référence. La seconde partie est la génération du signal de commande utilisé pour l'ouverture et la fermeture des semi-conducteurs. Ces deux parties sont essentielles à la performance d'un filtre actif. Il convient de noter que la partie commande peut comporter des composants analogiques et numériques, tels que les micro-ordinateurs, DSP et FPGA

Chapitre 03

APPLICATION

III. Chapitre 3 APPLICATION

III.1. Introduction :

Dans ce troisième chapitre nous allons nous efforcer de mettre en application les différentes étapes de la méthode de conception des convertisseurs statiques décrite au chap. II

Nous rappelons que la première étape consiste à élaborer un schéma de principe permettant de d'assurer la (les) fonction (s) envisagée(s). Dans notre cas il s'agit d'un filtre actif parallèle destiné à la compensation des perturbations harmoniques dans les réseaux basse tension. Notons que ce montage peut être également utilisé pour la compensation de la puissance réactive et voir du déséquilibre moyennant une adaptation adéquate de la commande du dispositif.

Le schéma sur lequel portera notre application est donné sur la Figure III. 78

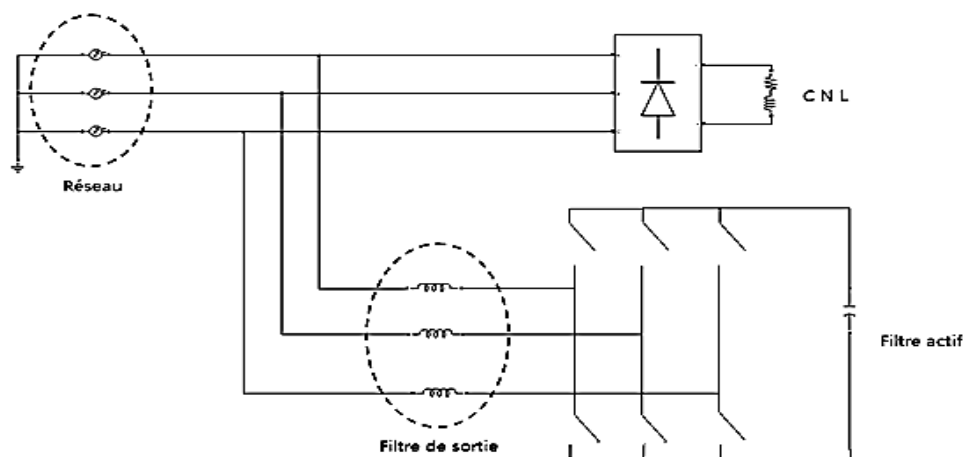


Figure III. 1 Circuit d'un hacheur

III.2. Description du système :

La Figure III.1 présente l'ensemble de la structure du système qui comprend les éléments suivants :

- Un réseau d'alimentation triphasé (220V/phase ; 380 entre phases).
- Une charge non linéaire génératrice des courants harmoniques et consommant de la puissance réactive.
- Un filtre actif parallèle,

La partie qui nous intéresse ici est le filtre. Il est constitué d'un convertisseur statique et d'une source d'énergie en occurrence un condensateur préalablement chargé.

Les inductances de sortie ne sont là que pour filtrer le bruit provenant des impulsions de commande des six commutateurs qui constituent le convertisseur.

La principale fonction à réaliser consiste à injecter dans les lignes du réseau des courants d'égale amplitude mais en opposition de phase avec les courants harmoniques perturbateurs préalablement identifiés [11]. Cette fonction peut être assurée en utilisant comme source d'énergie une capacité préalablement chargée à une tension supérieure à celle de la phase dans laquelle sera injecté le courant compensateur. La deuxième fonction que doit assurer le dispositif est le maintien de la tension aux bornes de la capacité du filtre à une valeur quasi-constante.

La deuxième étape consiste à vérifier la compatibilité des éléments reliés entre eux (compatibilité des sources voir chap. II). Dans notre cas, il s'agit de relier d'une part, la source d'énergie qui est la capacité de filtrage : c'est source de tension ; d'autre part la charge génératrice des courants harmoniques et du réseau qui sont constitués principalement de circuits inductifs : c'est donc une source de courant.

Il n'y a pas lieu dans ce cas d'introduire des modifications pour notre schéma.

Dans l'étape suivante (la troisième), on doit vérifier qu'il n'y ait pas de surtension ou surintensité lors des ouvertures et des fermetures des commutateurs utilisés.

Dans notre cas lors de la fermeture des interrupteurs, il y a seulement une condition à respecter : c'est l'interdiction de la fermeture de deux interrupteurs situés sur la même « cellule » de commutation. En effet ceci entraînerait le court-circuit de la source de tension (capacité du filtre), chose qui n'est pas permise (voir chap. II).

Cette restriction peut être assurée par le dispositif de commande en pilotant simplement chaque paire de commutateurs de la même cellule (bras) avec des signaux complémentaires (si un des deux interrupteurs est fermé, l'autre doit s'ouvrir immédiatement). Il n'y a pas lieu donc de prévoir dans le schéma de base de commutateurs supplémentaires.

Lors de l'ouverture des interrupteurs du convertisseur, il n'y a aucune rupture de courant dans les sources de courant (en occurrence charge polluante qui a un caractère inductif) car cette charge est reliée de manière permanente au réseau. Il n'y a donc aucun circuit supplémentaire d'aide à la commutation à ajouter.

La quatrième étape consiste à calculer les courants qui traversent les interrupteurs et les tensions à leurs bornes en fonction du temps sur la période de fonctionnement. Ceci nous permettra par la suite d'en déduire les caractéristiques statiques des interrupteurs.

III.3. Calculer les courants dans les interrupteurs et tensions à leurs bornes :

Afin de déterminer les courants à travers les interrupteurs et les tensions à leurs bornes, nous avons utilisé le logiciel MATLAB simulink.

Le schéma de simulation est donné sur la Figure III. 2

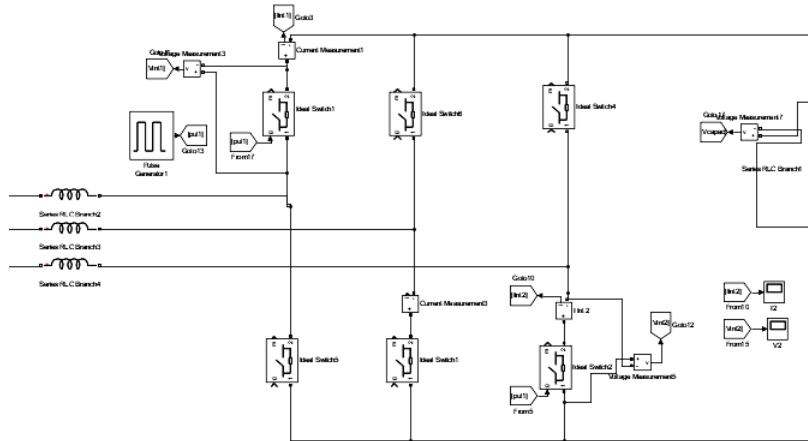


Figure III. 2 Le schéma de simulation d'un partie de système (filtre actif)

Pour notre cas, les six interrupteurs supportent des contraintes identiques. par conséquence on ne fera le calcul que pour un seul composant ; les cinq autres seront identiques.

La Figure III. 4 Présente l'évolution du courant à travers l'interrupteur K1 ainsi que la tension à ses bornes. Les paramètres utilisés dans la simulation sont donnés en annexe.

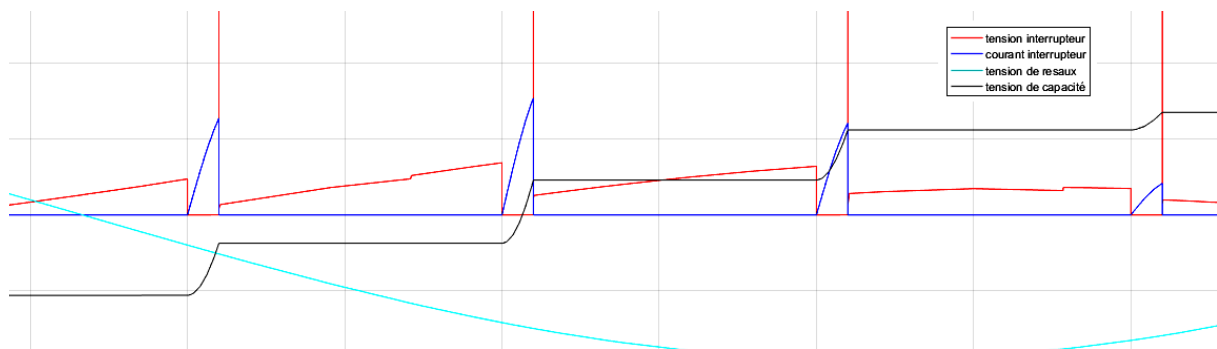


Figure III. 3 l'évolution du courant à travers l'interrupteur K1

Afin de mieux dimensionner nos interrupteurs on doit choisir le moment le plus critique pour la fermeture de cet interrupteur à savoir lorsque la tension est importante et pour celui de l'ouverture lorsque le courant est important. Il est bien entendu que les instants de fermeture et

d'ouverture en fonctionnement normal sont définis par le dispositif de commande dont la consigne est déterminée par les valeurs des courants harmoniques à compenser.

La Figure III. 5 montre le courant dans l'interrupteur K1 et la tension à ses bornes en fonction du temps. Pour des raisons de visibilité nous avons montré uniquement les instants de commutation c'est ce qui nous intéresse uniquement.

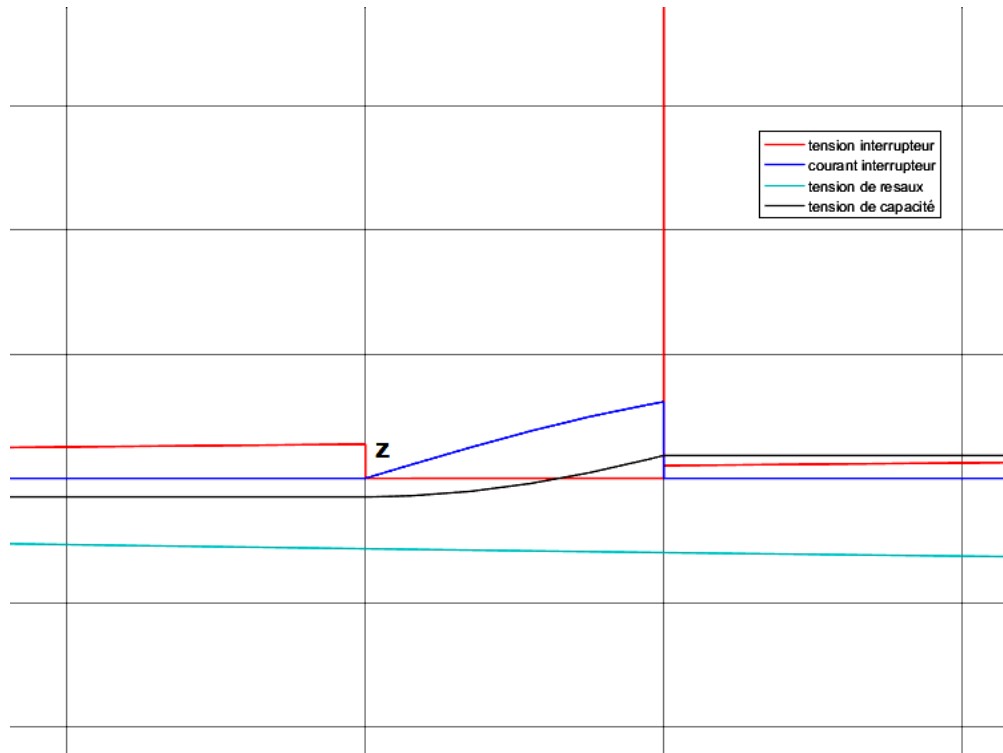


Figure III. 4 Circuit graphe courants dans les interrupteurs et tensions à leurs bornes

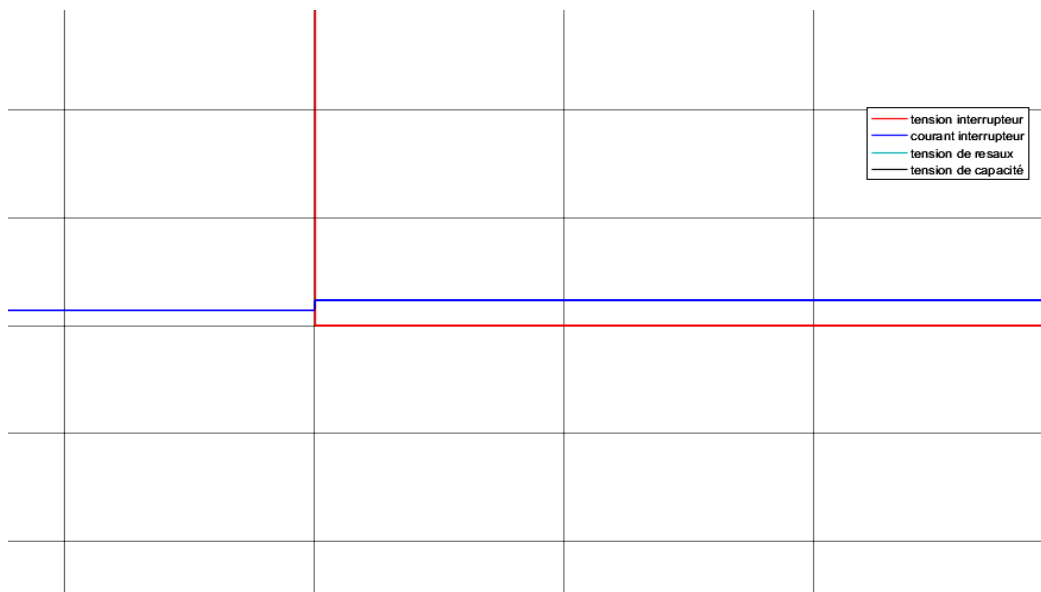


Figure III. 5 Circuit graphe courants dans les interrupteurs et tensions à leurs bornes

La cinquième étape de la démarche, consiste à déterminer la caractéristique statique de notre interrupteur K1. C'est cette dernière qui va nous permettre de fixer le type d'interrupteur à utiliser. La caractéristique statique obtenue est donnée sur la Figure III. 6.

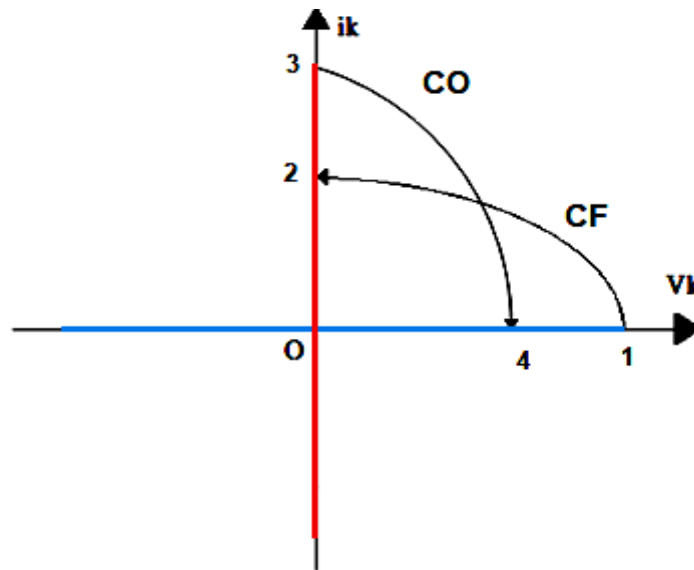


Figure III. 6 Circuit caractéristiques statiques des interrupteurs..

On étudiant la caractéristique on s'aperçoit bien qu'on a besoin d'interrupteur commandé à la fermeture flèche 1 et à l'ouverture flèche 2 sur la Figure III. 6. La dernière étape (voir chap. II) consiste à choisir le composant électronique adéquat permettant d'assurer ces deux fonctions. Dans notre cas trois types composants peuvent les satisfaire. Il s'agit d'un thyristor blocable par courant de gâchette (GTO), d'un transistor ou d'un thyristor ordinaire avec son circuit d'extinction.

On d'entrée déjà éliminer l'utilisation des thyristors blocables par courant gâchette (GTO) en raison du signal de commande à l'ouverture trop important ce qui compliquerait le générateur d'impulsions. C'est ce qui d'ailleurs à limité son emploi pratique en industrie. Les thyristors ordinaires quant à eux peuvent satisfaire la condition de fermeture commandée sans problème, mais la commande à l'ouverture nécessite l'ajout d'un circuit auxiliaire d'extinction.

Puisqu'il s'agit de compenser les courants harmoniques dont la fréquence est élevée, l'emploi de thyristors ordinaires avec circuit d'extinction ne peut satisfaire les exigences de la vitesse des commutations en raison des chargements préalables et des décharges des condensateurs des circuits destinés à l'extinction de ces derniers.

Ils nous restent donc les transistors IGBT dont les fréquences de commutation sont très hautes et d'autre part supportent des puissances assez grandes.

Ce ci nous conduit au schéma suivant.

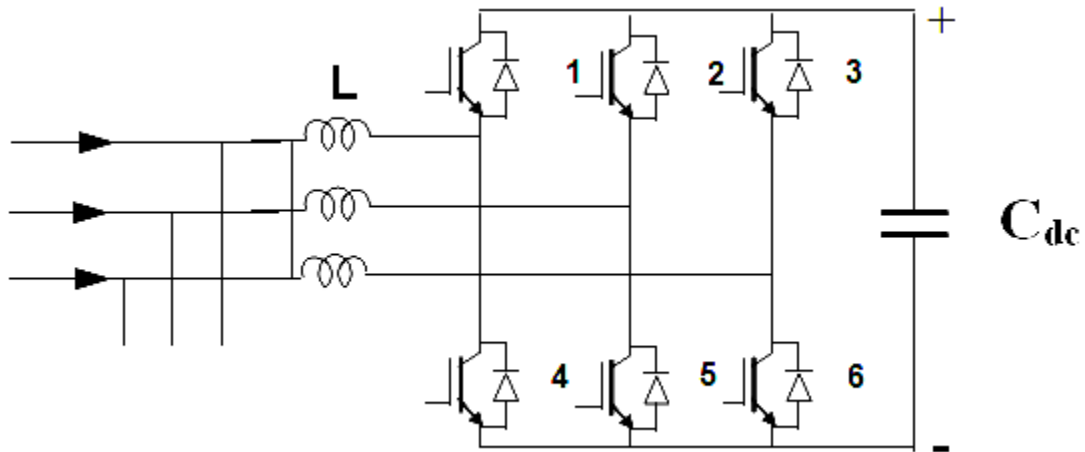


Figure III. 7 Schéma du filtre sans les diodes

Dans le schéma ci-dessus, on doit prévoir un moyen de chargement préalable du condensateur (filtre). Pour cela on ajoute des diodes pour constituer un pont redresseur destiné à cet effet. Ces diodes placées en parallèle inverse avec les transistors permuteront en plus de protéger ces derniers des surtensions inverses pour survenir à leurs bornes.

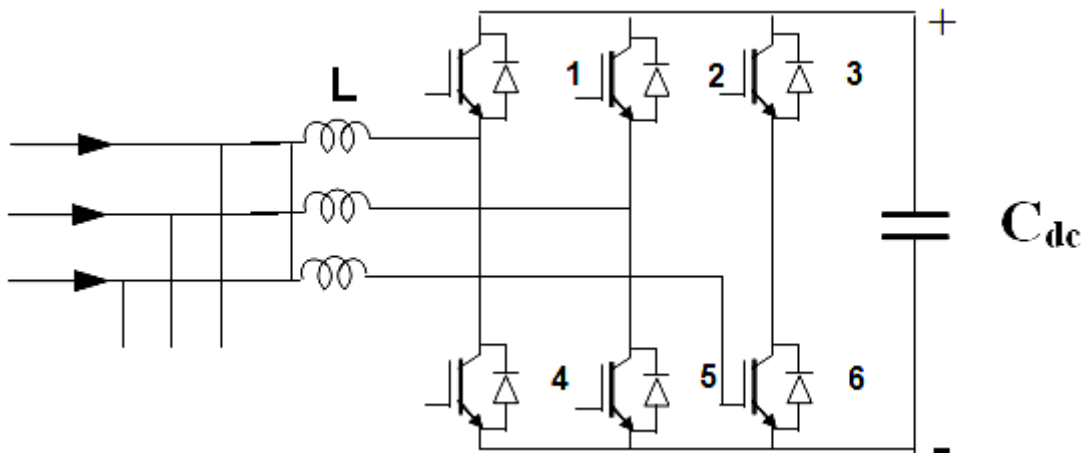


Figure III. 8 Schéma du filtre avec les diodes

Dans le travail présenté ici, l'objectif est de choisir le type composant adéquat de manière technico-économique pour la conception d'un convertisseur statique. Ce que nous avons fait à partir d'un exemple pour décrire la méthode. Pour un choix définitif, il faudra vérifier que le composant choisi répond à toutes les contraintes (voir chap. II) aux quelles est soumis le composant dans le circuit global.

III.4. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté le filtre actif parallèle comme système de compensation des harmoniques relie au réseau qui contient une charge non-linéaire.

La simulation de notre système avec MATLAB nous donne les résultats des courants des interrupteurs et tensions à leurs bornes.

On utilise les résultats des courants des interrupteurs et tensions à leurs bornes pour en déduire le graphe des caractéristiques statiques des interrupteurs i_k en fonction n de V_k . Ce qui nous permet d'identifier les types d'interrupteurs qui peuvent assurer les fonctions attendues par notre système. Chose que nous avons faite avec succès au regard des résultats obtenus.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce travail présente l'étude de la conception des convertisseurs statiques « application à la compensation des harmoniques dans les réseaux BT ».

L'objectif de ce système qui se compose d'un filtre actif parallèle est de compenser les perturbations générées par les charges dites non linéaires tels que les courants harmoniques, les courants réactifs et le déséquilibre du courant même dans le cas des charges linéaires.

On est mentionné les méthodes traditionnelles et modernes de compensation des harmoniques. Le filtre actif parallèle qui présente la meilleure solution pour la compensation de tous les types de perturbations susceptibles d'apparaître dans un réseau basse tension.

Le filtre (actif parallèle) génère des courants équivalents en amplitude avec les courants harmoniques générés par la charge mais en opposition de phase afin que la somme avec ceux-ci soit nulle. Alors l'ensemble charge/filtre se présente comme une charge propre, on obtient alors des courants sinusoïdaux au niveau du réseau.

L'élément principal du filtre est l'onduleur de tension contenant six interrupteurs statiques qui servent à la conversion de l'énergie fournie par le condensateur de la forme continue vers la forme alternative.

Ces interrupteurs qui constituent l'onduleur doivent être choisis correctement pour assurer les fonctions attendues avec les meilleures performances possibles.

Nous avons remarqué que parfois plusieurs composants peuvent accomplir les fonctions escomptées (commutation naturelle ou forcée), cependant, les contraintes selon lesquelles ces fonctions doivent être assurées nous poussent à restreindre le choix à un composant particulier. Dans la majorité des cas cette discrimination est faite en se basant sur des contraintes techniques telles que la fréquence des commutations, la puissance véhiculée, les valeurs des tensions et les courants mis en jeu etc. Il est naturel de tenir compte aussi dans tous les cas des contraintes économiques tel que le prix des composants, leur disponibilité, la complexité du dispositif de commande qui peut augmenter le prix de revient etc.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

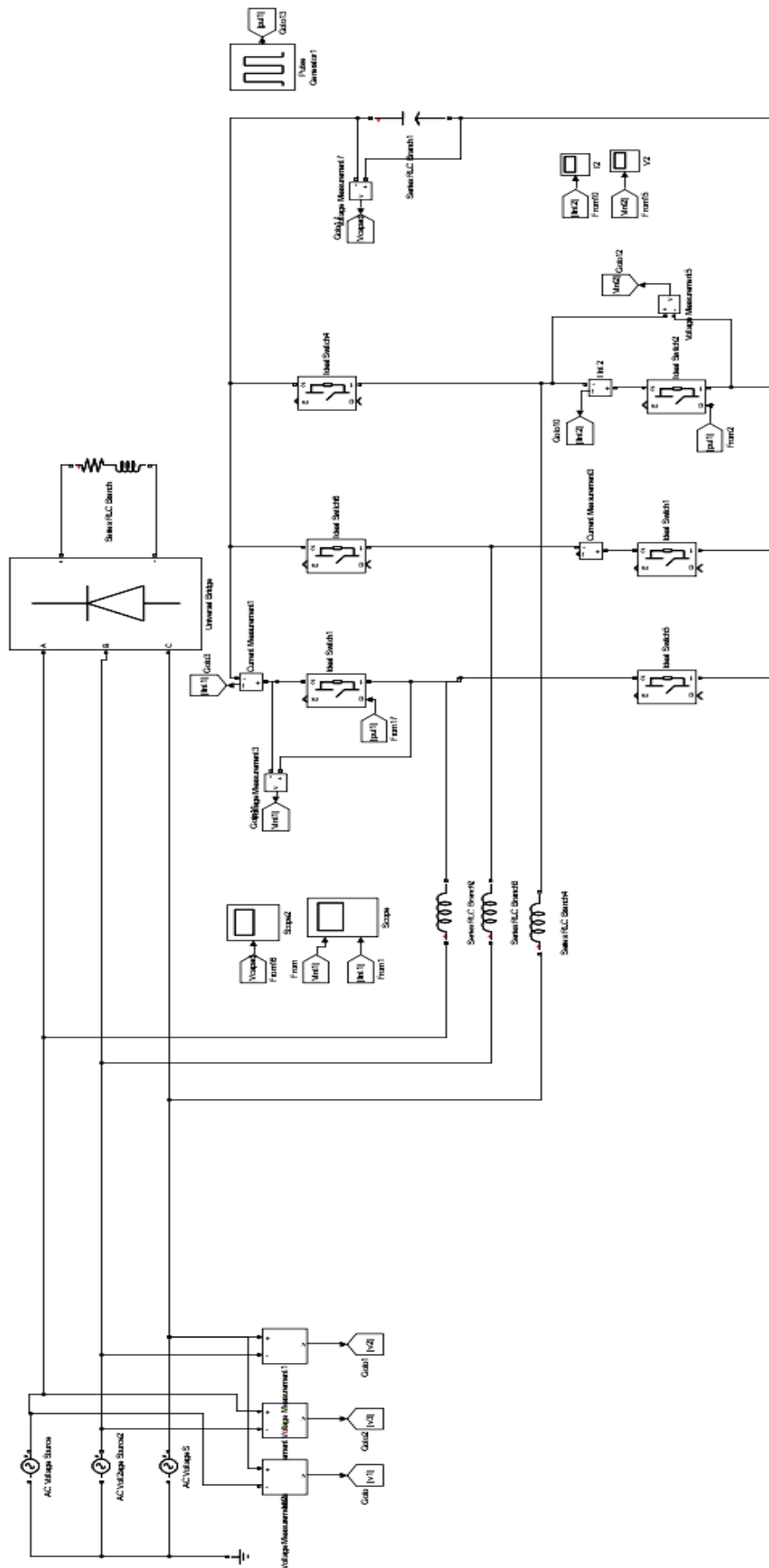
- [1] <http://f.holst.pagesperso-orange.fr/TP%20CRSA/TP07%20annexe%201>
- [2] https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjz8_W84Nz3AhVS_4UKHWnkBgcQFnoECAIQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.ummto.dz%2Fdspace%2Fbitstream%2Fhandle%2Fummto%2F9075%2FTOGOLAKADIATOU_ABBANEMAHD1.pdf%3Fsequence%3D1&usg=AOvVaw2xWN3W7GngavZNo8o8lZWK
- [3] G.Segier, “ *Perturbations harmoniques : Effets, origine, mesures, diagnostic, remèdes* ”, Dunod, Paris 2000.
- [4] Chapitre 01 “ *Origine, analyse et conséquences des harmoniques* ”, Université de Annaba
- [5] Subjak (J.) ET Mcquilkin (J.). “*Harmonics - causes, effects, measurements and analysis: Update*”. IEEE Trans. on Ind. Appl. vol. 26, n6, November/ December 1990, pp. 1034–1042.
- [6] https://fr.wikipedia.org/wiki/Taux_de_distorsion_harmonique
- [7] Moussa Oussama, “ *étude des harmoniques et techniques de commandes du filtre actif* ”, Mémoire Présenté pour l’obtention du diplôme de MAGISTER en Électrotechnique, Université de Batna 2.
- [8] H. Farid, “ *Commande Robuste d’un Filtre Actif Shunt à Quatre Fils* ”, Thèse de Magister, Université de Batna, 2008.
- [9] Elmitwally et A. S. Abd-el-Kader, “*Neural Network Controlled Three-Phase Four*”.
- [10] Chapitre 01 “ *Cour filtres passifs d’harmoniques* ”, Université de Bejaia.
- [11] Tadjer Sid Ahmed “ *Etude d'un système de compensation d'harmoniques en utilisant un générateur photovoltaïque* ”, Mémoire Présenté pour l’obtention du diplôme de MAGISTER, Boumerdes 2008
- [12] Kifouche Rezki “ *identification des harmoniques et génération du courant de référence « application au convertisseur statique* » ”, Mémoire Présenté pour l’obtention du diplôme de MAGISTER, Boumerdes 2005.
- [13] Mesbahi Nadhir “ *Contribution à l’Etude des Performances des Onduleurs Multi niveaux sur les Réseaux de Distribution* ”, Thèse de Doctorat en sciences, Université Badji Mokhtar Annaba 2014.
- [14] S. Beaulieu, “ *Etude et mise au point d’un filtre actif d’harmoniques en vue d’améliorer la qualité de l’alimentation électrique*”, Mémoire de Fin d’Etude, Université, Québec à Chicoutimi, Mai 2007.

- [15] SOLTANI FATMA “ *Courant continu haute tension- chapitre 03- (Cour proposée)* ”, Institut d'électrotechnique
- [16] M.L.Louazene “ *Cours d'électronique de puissance* ”, Département de Génie Electrique, Université de Ouargla 2011.
- [17] SOYED-Abdessami “ *Cours d'électronique de puissance 113 Proposé*, Institut supérieur des études technologiques de Nabeul département génie électrique.
- [18] <https://www.etudier.com/dissertations/Boost/253470.html>
- [19] SOYED-Abdessami “ *fascicule de cours*” Institut supérieur des études technologiques de Nabeul département génie électrique.
- [20] David CHANEZ “ *Onduleur monophasée tension - étude de l'onduleur de tension à 4 interrupteurs-* ”
- [21] https://fr.wikiversity.org/wiki/Redresseur/Redresseur_simple_alternance_triphas%C3%A9/
- [22] Mr. Bengmaih “ *Chapitre 16 Redressement non command C.P.G.E-TSI-SAFI*”, 2006/2007.
- [23] M.L.Louazene “ *Cours d'électronique de puissance* ”, Département de Génie Electrique, Université de Ouargla 2011
- [24] https://fr.wikiversity.org/wiki/Redresseur/Redresseur_double_alternance_monophas%C3%A9/
- [25] Gaston Bachelard “ *La formation de l'esprit scientifique, les composants de l'électronique de puissance*”, septembre 04 – V1.62.
- [26] M^{lle} Togola Kadiatoum et M^r ABBANE Mahdi “ *Etude d'un convertisseur alternative – continu à absorption sinusoïdale utilisant un onduleurs a résonance* ” Mémoire de Fin d'Etude, Université Mouloud Mammeri.
- [27] Yannick Morel “ *TP le redressement commandé : le pont mixte*”, Paris – France.
- [28] <https://www.astuces-pratiques.fr/electronique/le-thyristor-gto-principe-de-fonctionnement>
- [29] <https://www.astuces-pratiques.fr/electronique/le-triac-principe-de-fonctionnement>
- [30] <https://www.astuces-pratiques.fr/electronique/le-transistor-bipolaire-principe-de-fonctionnement>
- [31] Les transistors Mosfet de puissance - Astuces Pratiques ([astuces-pratiques.fr](https://www.astuces-pratiques.fr))
- [32] F. Labrique, G. Segulier et R. Bausiere, “ *Les Convertisseurs de l'Électronique de puissance* ”, Paris : Technique et Documentation-Lavoisier, 1995.
- [33] S. Mouttou, “ *Nouvelles approches de commande d'un filtre actif parallèle à source de courant* », Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Trois-Rivières, Octobre 2002

- [34] L. Benchaita, S. Saadate et A. Salem Nia, “ *A comparison of voltage source and current source shunt active filter by simulation and experimentation* ”, IEEE trans. Power Systems., Vol. 14, pp. 642-647, Mai 1999.
- [35] J. Xu, “ *Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité* ». Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 1994.
- [36] N. Mohan, T. M. Undeland and W. P. Robbins, “*power electronics, Converters, Applications, and Design*”, John Wiley& Sons, New York, 1995.
- [37] <https://marviinmelton.wordpress.com/2019/12/17/sinusoidal-waveform-distortion-harmonics-in-cooling-electrical-systems/>
- [38] Jean-Louis Dalmasso “ *électronique de puissance commutation* ”1986, Paris, France.
- [39] Jean-Marc Roussel “ *Eléments constitutifs et synthèse des convertisseurs statiques* ” 1998

ANNEXES

Simulation de système de compensation d'harmonique:



Paramètres caractéristiques :

1. Circuit :

Valeur de l'inductance : 1.5 mH

Valeur de résistance : 0.8 Ohm

2. Filtre actif parallèle :

Valeur de capacité : 0.02 mF

Valeur initiale de tension de capacité : 400V

Valeur de l'inductance(s) : 0.12 mH

Nombre des interrupteurs statiques : 06