



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université Echahid Hamma Lakhder d'El-Oued
Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Étude
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Technologies
Filière : Electromécanique
Spécialité : Electromécanique

Thème

Etude et Réalisation de l'association
(Générateur synchrone– Convertisseur statique)

Réalisé par:

- SAHAROU Moussa
- GHRISSI Yacine
- LAMMARI Abderrazak
- LAMMARI Adel

Encadré par:

- Mr. Guerfi Youcef

Année Universitaire: 2022/2023



Remerciement

*Avant tout, louange à dieu le tout puissant pour nous avoir donné la bonne
Santé, la volonté et les moyens d'accomplir ce modeste travail.*

*Au terme de ce travail, nous tenons à remercier toutes les personnes qui, de
près ou de loin,*

Nous avons apporté leurs aides. Nous citerons tout particulièrement:

*Notre encadreur **Mr Guerfi Youcef**, pour avoir accepté d'encadrer ce travail*

*Et pour son aide inestimable sur plusieurs plans (documentation,
connaissance et orientations).*

Tous les enseignants du département génie mécanique.

*Nous remercions aussi, toutes les personnes qui nous ont fait profiter de leur
savoir durant l'élaboration de ce travail*

*Enfin, nous tenons à exprimer ma reconnaissance à tous mes amis et collègues
pour leur Soutien moral et matériel.*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

À ma fabuleuses étoile matrès chers mère.

A mon père : le plus bonde tous les pères.

A mes chers frères.

A mes chères sœurs.

A toute ma famille en général.

*A tous mes amis avec qui j'ai partagé des moments
précieux.*

*A tous les enseignants qui ont contribué à ma formation,
tous cycles confondus, chacun en son nom.*

Résumé

Titre du mémoire : Etude et réalisation de l'association générateur synchrone - convertisseur statique.

Mots clés : Générateur synchrone, Modélisation, Moteur à aimant, Onduleur monophasé, Redresseur à MLI, Transformateur, MATLAB /SIMULINK.

Résumé : Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude, la simulation et la réalisation d'une nouvelle technique de production de l'énergie électrique basée sur les moteurs à aimants. Il s'agit d'un système utilise la force de la répulsion magnétique entre les aimants pour faire tourner des vilebrequins suivis par la rotation d'un alternateur associé. Pour se faire nous avons présenté des généralités et des modélisations de chaque élément qui compose la chaine de production proposé puis la réalisation pratique de notre système. Tous les résultats sont effectué et interprété.

Abstract

Report title: Study and realization of the association synchronous generator–static converter.

Keywords: Synchronous generator, Modeling, Magnet motor, Single-phase inverter, PWM rectifier, Transformer, MATLAB / SIMULINK.

Abstract: In this work, we are interested in the study, the simulation and the realization of a new technique of production of the electric energy based on the motors with magnets. It is a system that uses the force of magnetic repulsion between magnets to turn crankshafts followed by the rotation of an associated alternator. To do this, we presented generalities and models of each element that makes up the proposed production chain and then the practical realization of our system. All results are performed and interpreted.

ملخص

عنوان المذكرة: دراسة وانجاز الارتباط (مولد متزامن - محول ساكن).

الكلمات المفتاحية: مولد متزامن، نمذجة، محرك مغناطيسي، موج أحادي الطور، مقوم PWM، محول، MATLAB / SIMULINK.

الملخص: في هذا العمل، نحن مهتمون بالدراسة والمحاكاة وإنجاز تقنية جديدة لإنتاج الطاقة الكهربائية تعتمد على المحركات ذات المغناطيس. إنه نظام يستخدم قوة التنافر المغناطيسي بين المغناطيس لتدوير المحرك المرتبط بمولد. للقيام بذلك، قدمنا العموميات والنماذج لكل عنصر يشكل سلسلة الإنتاج المقترحة ثم الانجاز العملي لنظامنا. تم تنفيذ جميع النتائج وتفسيرها.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE..... 01

CHAPITRE 1: Etat de l'art du Système

I. Généralités.....	02
I.1 : Généralités sur les machines électriques.....	02
I.2 : Généralités sur les transformateurs électriques.....	03
I.2.1 : Généralité sur les moteurs asynchrones.....	03
I.2.2: Principe de fonctionnement.....	04
I.2.3 : Le stator.....	05
I.2.4 : Le rotor.....	06
I.3 : Excitation des alternateurs synchrones.....	06
I.3.1 : Généralités.....	06
I.3.2 : Exigences posées à l'excitation d'un alternateur synchrone.....	06
I.3.3 : Applications dans la production et la transmission d'énergie électrique.....	07
I.3.4 : Configuration des circuits de réglage d'un alternateur synchrone.....	07
I.4 : Convertisseurs Statiques.....	08
I.4 : Généralités.....	08
I.4.1 : Excitation par un convertisseur de courant.....	08
I.4.2: Excitation d'un alternateur synchrone par un convertisseur de courant.....	08
I.4.3 : Introduction à la conversion statique de l'énergie électrique.....	09
I.4.4 : Variateurs de courant alternatif	10
I.4.5: Variateur de courant continu.....	10
I.4.6 : Convertisseur de courant.....	11
I.4.7 : Onduleur.....	11
I.4.8 : Convertisseur de fréquence direct.....	12
I.4.9 : Convertisseur de fréquence à circuit intermédiaire.....	12
I.5 : Technique de conversion.....	12
I.5 : Généralités.....	12
I.5.1: Introduction à la conversion statique de l'énergie électrique.....	12
I.5.2 : Conversion alternative-continue.....	12
I.5.3 : Conversion continue-alternative.....	14
I.5.4: Introduction à la conversion statique de l'énergie électrique.....	15

CHAPITRE 2 : Modélisation du Système

SOMMAIRE

II.1. Introduction.....	17
II.2. Modélisation de la Machine Synchrone.....	17
II.2.1. Modèle triphasé (abc) du moteur synchrone.....	17
II.2.2. Transformation de Park.....	19
II.2.3. Modèle de PARK de la machine synchrone.....	20
II.2.4. Représentation d'état du modèle de la machine.....	21
II.3. Utilisation de la machine synchrone en alternateur.....	22
II.3.1. Introduction.....	22
II.3.2. Couplage d'un alternateur à un réseau puissant.....	22
II.3.3. Fonctionnement en Moteur Synchrone.....	23
II.4. Bilan des puissances de machines synchrones couplées au réseau.....	24
II.4.1. Les pertes variables.....	25
II.4.1.1. Pertes par effet Joule du circuit de l'induit.....	25
II.4.1.2. Pertes par effet Joule du circuit de l'inducteur.....	25
II.4.2. Les pertes constantes <i>pcst</i>	25
II.4.3. La puissance absorbée.....	25
II.4.4. La puissance utile.....	26
II.5. Modélisation du redresseur triphasé.....	27
II.5.1. THD et FFT d'un redresseur triphasé à diodes.....	27
II.5.2. Différentes topologies de redresseurs triphasés.....	29
II.5.3. Principe de fonctionnement du redresseur MLI triphasé.....	30
II.6. Modélisation du redresseur MLI triphasé.....	31
II.6.1. Représentation dans le référentiel triphasé a – b – c.....	33
II.6.2. Représentation dans le référentiel fixe.....	34
II.6.3. Représentation dans le référentiel tournant d,q.....	35
II.6.4. Les Puissances active et réactive p,q.....	36
II.7. Modélisation de l'onduleur triphasé.....	36
II.7.1. Représentation structurelle d'un onduleur de tension triphasée.....	36
II.7.2. Modélisation matricielle de l'onduleur de tension.....	37
II.8. Transformateur monophasé.....	38
II.8.1. Schéma électrique équivalent.....	38
II.8.2. Modélisation des transformateurs.....	40
II.8.3. Transformateur monophasé linéaire sans saturation.....	40

SOMMAIRE

II.8.4. Transformateur monophasé avec saturation.....	41
Conclusion.....	42

CHAPITRE 3 : Simulation, Réalisation et Interprétation des Résultats

III.1. Introduction.....	43
III.2. Présentation de l'environnement <i>MATLAB/SIMULINKTM</i>	43
III.2.1. Matlab.....	43
III.2.2. Simulink.....	44
III.3. Simulation sous l'environnement <i>Matlab/Simulink</i>	44
III.3.1. Description du système numérique.....	44
III.3.2. Les résultats de simulation.....	48
III.3.3. Interprétation des résultats de simulation.....	49
III.4. Réalisation pratique du système	50
III.4.1. Description du système pratique.....	50
III.4.2. Discussion.....	52
III.5. Conclusion.....	52
Conclusion générale.....	53

Liste des Symboles

M_1	: Machine motrice
G	: Génératrice électrique
P_{mec}	: Puissance mécanique
P_d	: Pertes
M_2	: Moteur électrique
E	: Organe entraîné
U	: Tension
U_s	: Tension statorique
R_e	: Régulateur
I_e	: Le courant d'excitation
R_u	: Régulateur superposé
F	: La fréquence
V_{abc}	: Tensions instantanées des phases a, b et c statoriques.
V_f	: Tension continue d'excitation rotorique
i_{abc}	: Courants instantanées des phases a, b et c statoriques
i_f	: Courant d'excitation du rotor
φ_{abc}	: Flux totaux à travers les phases a, b, c statoriques.
φ_f	: Flux à travers le circuit rotorique
R_s	: est la résistance par phase statorique.
R_f	: est la résistance rotorique (inducteur) .
R_M	: moyen d'une résistance
L_s	: inductance propre de phase statorique
M_s	: Mutuelle inductance entre phases du stator La matrice inductance L_{ss}
m_{fs}	: le mutuelle inductance entre phases statorique et circuit d'excitation du rotor.
J	: Inertie totale des parties mobiles ($kg.m^2$)
Ω	: vitesse mécanique de rotation du rotor (rad /s)
C_{em}	: Couple électromagnétique de la machine($N.m$)
C_r	: Couple de charge ($N.m$)
f	: Coefficient de frottement ($N.m.s/rad$)
P	: Nombre de paires de pôles de la machine.
P_u	: Puissance utile
P_a	: Puissance absorbée
P_j	: Perte joule

P_{fer} : Perte fer magnétique

η : le Rendement

ω : Pulsation électrique du rotor par rapport au stator.

X : Grandeur statorique ou rotorique (représente le vecteur de tension, courant ou flux).

X_0 : a composante homopolaire choisie nulle pour un système équilibré.

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion

PWM : Pulse Width Modulation

Liste des Figures

Figure (I.1): couplage du Système.....	02
Figure (I.2): couplage du Système.....	02
Figure(I.3) : couplage du Système.....	02
Figure (I.4): couplage du Système.....	02
Figure (I.5): Disposition de principe d'un transformateur monophasé.....	03
Figure (I.6) : moteur asynchrone à cage.....	04
Figure (I.7): Principe de fonctionnement.....	04
Figure (I .8): Le stator.....	05
Figure (I.9): Influence du nombre de paires de pôles sur la vitesse de rotation et de la forme du champ statorique résultant.....	05
Figure(I.10): Le rotor.....	06
Figure (I.11): Etats de fonctionnement d'un alternateur synchrone : (a) marche en parallèle avec un réseau rigide, (b) transmission d'énergie sur une ligne à haute tension, (c) alimentation d'une ligne à haute tension à vide.....	07
Figure (I.12) : Excitation d'un alternateur synchrone par un convertisseur de courant..	08
Figure (I.13) : Allure de la tension u_e et du courant d'excitation i_e lors de l'excitation d'un alternateur synchrone par un convertisseur de courant.....	09
Figure (I.14) : Représentation schématique de la conversion alternative-continue.....	13
Figure (I.15) : Représentation schématique d'une variante de la conversion alternative-continu.....	14
Figure (I.16) : Représentation schématique de la conversion continu-alternative (première méthode)	15
Figure (I.17) : Représentation schématique de la conversion continu-alternative (deuxième méthode)	15

Figure(I.18) : Représentation schématique de la conversion continue-alternative (troisième méthode).....	16
Figure (II.1) : Représentation vectorielle des Référentiel (a,b,c) , (d,q).....	21
Figure (II.2) : Schéma de principe du couplage d'un alternateur au réseau.....	23
Figure (II.3) : Représentation vectorielle d'un moteur synchrone alimenté Directement par un alternateur.....	24
Figure (II.4) : Représentation du bilan de puissances des machines synchrone.....	26
Figure (II.5) : Image d'un Alternateur Automobile.....	26
Figure (II.6) : Topologie de base d'un redresseur triphasé à diodes.....	27
Figure (II.7) : Courant de ligne (THD = 31.7%).....	28
Figure (II.8) : FFT du courant de ligne.....	28
Figure (II.9) : Image d'un Redresseur triphasé à diodes.....	28
Figure (II.10) : Topologie de base d'un redresseur de tension.....	29
Figure (II.11) : Les topologies les plus communes d'un redresseur triphasé.....	30
Figure (II.12) : Présentation du vecteur de tension u_k	31
Figure (II.13) : Etats de commutation du pont d'un redresseur MLI.....	32
Figure (II.14) : Schéma fonctionnel d'un redresseur MLI dans les coordonnées Triphasées normales.....	34
Figure (II.15): Schéma fonctionnel d'un redresseur MLI dans les fixes coordonnées d-q.....	35
Figure (II.16) : Schéma fonctionnel d'un redresseur MLI dans le référentiel Tournant d-q.....	35
Figure (II.17) : Images d'un Redresseur triphasé à diodes.....	36
Figure (II.18) : Schéma d'un bras de l'onduleur de tension.....	37
Figure (II.19) : Schéma équivalent de l'onduleur de tension.....	37
Figure (II.20) : Image représente un onduleur Monophasé.....	38
Figure (II.21) : schéma électrique équivalent d'un transformateur.....	38
Figure (II.22) : Les circuits électrique et magnétique du transformateur.....	39
Figure (II.23) : Le transformateur modifie la forme de l'énergie électrique.....	40
Figure (II.24) : Modélisation d'un transformateur monophasé en basse fréquence Sanssaturation.....	40
Figure (II.25) : Modélisation d'un transformateur monophasé en basse fréquence avec pertes fer Sans saturation.....	41
Figure (II.26) : Modélisation d'un transformateur monophasé en basse fréquence avec saturation.....	41

SOMMAIRE

Figure (II.27) : Image représente un transformateur monophasé.....	42
Figure (III.1) : Schéma bloc du système.....	45
Figure (III.2) : Schéma bloc du Générateur Synchrone (Modèle Mécanique).....	45
Figure (III.3) : Schéma bloc du Générateur Synchrone (Modèle Electrique).....	46
Figure (III.4) : Schéma bloc de la batterie (Modèle Electrique).....	46
Figure (III.5) : Schéma bloc d'un redresseur triphasé à diode (non commandé).....	47
Figure (III.6) : Schéma bloc d'un onduleur monophasé.....	47
Figure (III.7) : Schéma bloc de la commande MLI de l'onduleur monophasé.....	47
Figure (III.8) : Schéma bloc de l'excitation du l'alternateur synchrone.....	48
Figure (III.9) : Allure du stockage de la batterie (%).....	48
Figure (III.10) : La tension aux borne de la batterie (V).....	48
Figure (III.11) : La tension à la sortie de l'onduleur (V).....	49
Figure (III.12) : La tension de la charge (V).....	49
Figure (III.13) : Le courant généré par l'alternateur (A).....	49
Figure (III.14) : Représentation et description du système.....	50
Figure (III.15) : Image représente l'installation du système.....	50
Figure (III.16) : Image représente le montage Piston-Aimant.....	51
Figure (III.17) : Image représente le couplage Moteurs-Alternateur.....	51
Figure (III.18) : Image représente l'Alternateur.....	51
Figure (III.19) : Images représente l'Onduleur monophasé et la Batterie de stockage..	52
Figure (III.20) : Images représente la mise en marche du système.....	52

Listes des tableaux

Tableau (I.1): Vue des ensembles des convertisseurs statiques.....	10
Tableau (II.1) : Caractéristiques des topologies d'un redresseur à diodes.....	30
Tableau (II.2) : Tableau retraçant les états de commutation.....	32

Introduction

Générale

Introduction générale :

L'énergie est définie en physique comme la capacité d'un système à produire un travail, entraînant un mouvement ou produisant par exemple de la lumière, de la chaleur ou de l'électricité. L'énergie ne disparaît jamais ; elle se transforme d'une forme en une ou plusieurs autres. Elle s'exprime en joules ou en kilowattheure (*kWh*).

L'énergie électrique est un facteur essentiel de développement et de l'évolution des sociétés humaines, que cela soit sur le plan de l'amélioration des conditions de vie ou sur le plan du développement des activités industrielles. Le système de puissance qui est à la base de cette énergie fonctionne dans un environnement en évolution continue : charges, puissance de génération, topologie du réseau. L'augmentation de la dépendance électrique de la société moderne implique des systèmes de puissance exploitables à cent pour cent de leur capacité avec une sûreté maximale.

Nous allons ici intéresser l'application d'une nouvelle technique de production de l'énergie électrique, Il s'agit d'un générateur à aimant. Le système fonctionne par la force de la répulsion magnétique entre les aimants, ce qui provoque la rotation des vilebrequins qu'ils sont associés par un alternateur synchrone.

Le travail est structuré en trois chapitres comme suit :

le premier chapitre est consacré à l'état de l'art du système , Nous verrons tout d'abord généralité sur les machines électriques ainsi que les différents types des convertisseurs statiques. Puis dans une seconde partie, nous verrons comment il fonctionne, c'est-à-dire comment à partir d'un mouvement mécanique, nous arrivons à créer de l'électricité. En effet, c'est une conversion d'énergie cinétique en énergie électrique. Finalement, des notions de base sur les transformateurs électriques.

Le second chapitre est consacré purement à la modélisation du système, c'est-à-dire la chaîne de la production de l'énergie électrique, d'abord le générateur synchrone puis le redresseur et finalement l'onduleur.

Le dernier chapitre, illustre la simulation numérique et la réalisation pratique du notre système, donc cette partie est partagée en deux tâches comme suite :

- Simulation numérique sous l'environnement MATLAB/SIMULINK.
- Réalisation pratique du système à étudier.

Finalement, une conclusion générale propose une perspective après les discussions des résultats obtenus.

Chapitre I

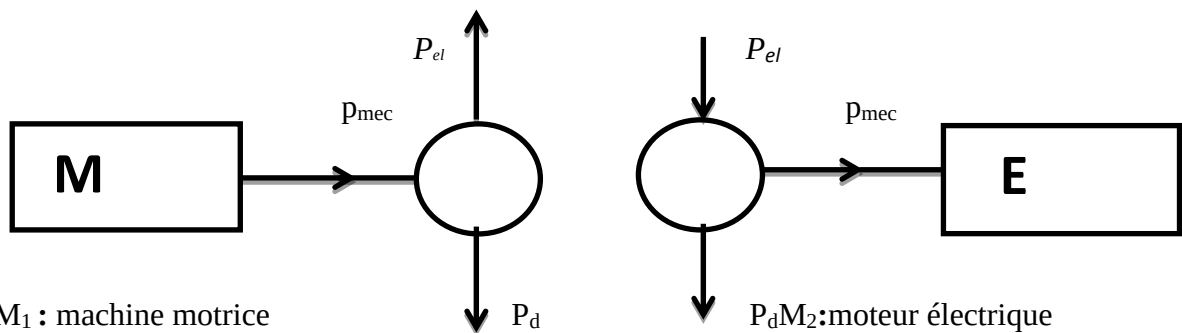
Etat de l'art du Système

1 . GÉNÉRALITÉS

I.1 : Généralités Sur Les Machines Electriques

Le but assigné à une machine électrique est une transformation d'énergie d'une forme en une autre, l'une d'entre elles au moins étant de nature électrique. Suivant le genre de transformation opéré, les machines électriques sont classées en :

- Génératrices si elles transforment de l'énergie mécanique en énergie électrique ; les dynamos génèrent un courant continu ou alternatif (**Figure (I.1)**), tournants ou linéaires ;
- Réceptrices si elles transforment de l'énergie électrique en énergie mécanique ; ce sont alors des moteurs électriques à courant continu ou alternatif (**Figure (I.2)**), tournants ou linéaires ;
- Transformatrices si l'énergie électrique entrant dans la machine est restituée sous forme électrique ; les convertisseurs tels que les convertisseurs de fréquence et les commutatrices modifient la nature des courants et tensions appliqués à l'entrée en convertissant, par exemple, des grandeurs alternatives en continues [1]



M_1 : machine motrice

G : génératrice électrique

E : organe entraîné

P_{el} : puissance électrique P_d : pertes

P_{mec} : puissance mécanique

Figure (I .1) et Figure (I .2): couplage du Système

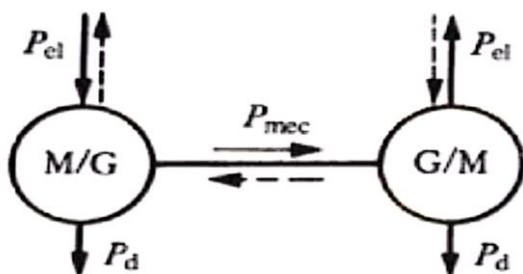


Fig. 1.3

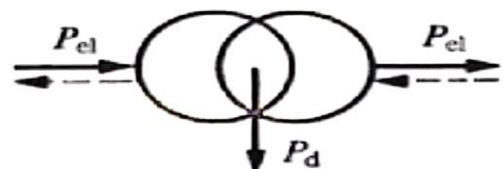


Fig. 1.4

Figure(I.3) et Figure (I.4):couplage du Système

I.2 : Generalites Sur Machines Electriques

Et vice versa (**Figure(I.3)**) ;les transformateurs statiques ne modifient pas la nature des grandeurs alternatives d' entrée mais en modifiant les niveaux à puissance pratiquement constante (**Figure(I.4)**) .

Cette conversion d' énergie s'accompagne de pertes apparaissant sous forme de chaleur dans la machine électrique.

En pratique, le terme « machine électrique » est réservé aux dispositifs opérant une conversion d' énergie électromécanique .Ils sont caractérisés par la présence d' un élément mobile, le rotor, tournant généralement à l' intérieur d' un élément fixe coaxial, le stator, et séparé de ce dernier par un espace d' air, l' entrefer(**Figure (I.6)**).

Le terme « transformateur » désigne un appareil statique effectuant un transfert d' énergie électromagnétique sans travail mécanique(**Figure (I.5)**). [1]

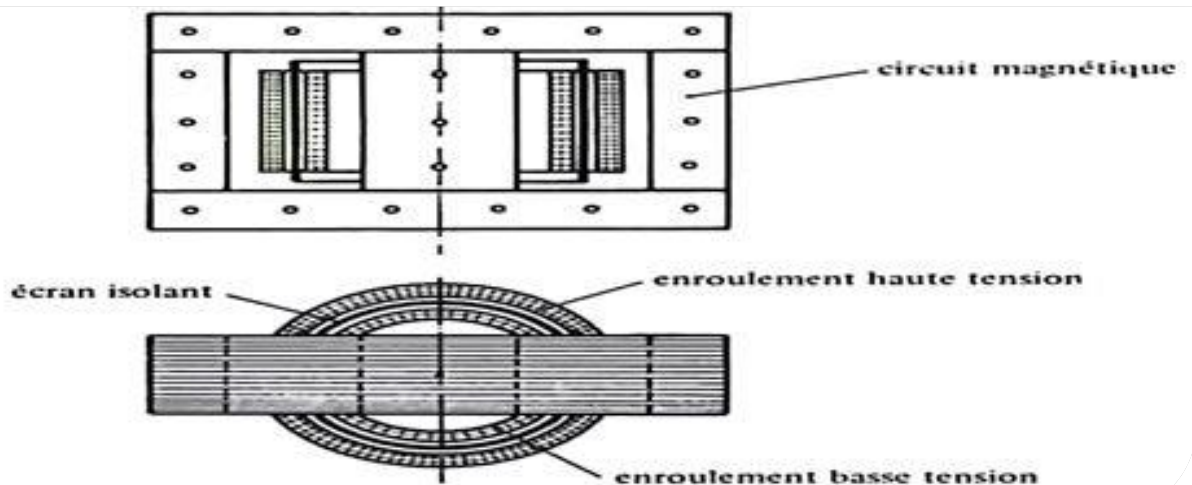


Figure (I.5): Disposition de principe d'un transformateur monophasé

I.2.1 : Généralité moteur asynchrone

Le moteur asynchrone couplé à un variateur de fréquence est de loin le type de moteur le plus utilisé pour les applications où il est nécessaire de contrôler la vitesse et le déplacement d'une charge. Le système moteur-variateur convient bien pour des applications tels que les ascenseurs car on recherche une excellente précision à fois au niveau de la vitesse (confort des utilisateurs) et de la précision de la position de la cabine par rapport aux palier.

Quant au moteur asynchrone seul, sa popularité résulte du peu d'entretien nécessaire, de sa simplicité de construction, de sa standardisation et de sa robuste. [2]

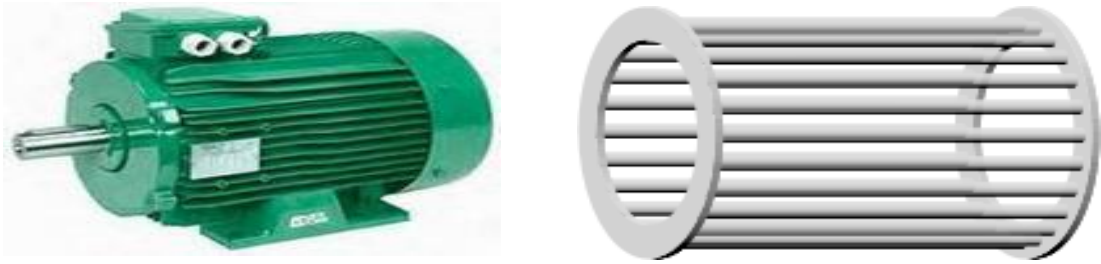


Figure (I.6) : moteur asynchrone à cage

I.2.2: Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone repose :

- D'une part sur la création d'un courant électrique induit dans un conducteur placé dans un champ magnétique tournant. Le conducteur en question est un des barreaux de la cage d'écureuil ci-dessous constituant le rotor du moteur. L'induction du courant ne peut se faire que si le conducteur est en court-circuit (c'est le cas puisque les deux bagues latérales relient tous les barreaux).
- D'autre part, sur la création d'une force motrice sur le conducteur considéré (parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique tournant ou variable) dont le sens est donné par la règle des trois doigts de la main droite. [2]



Figure (I.7):Principe de fonctionnement

Comme montré sur le schéma ci-dessus, le champ tournant, à un instant donné, est orienté vers le haut. En considérant deux conducteurs diamétralement opposés, on constate que les courants induits dans ces deux conducteurs sont en sens inverse et, associés au champ magnétique, créent des forces motrices en sens inverse. Le rotor étant libre de tourner sur l'axe X-Y, les deux forces s'associent pour imprimer aux deux conducteurs un couple permettant la rotation de la cage d'écureuil : le moteur électrique est inventé. Pour entretenir la rotation du moteur, il est nécessaire de faire varier soit le courant dans les conducteurs de la cage, soit le champ magnétique. Dans un moteur asynchrone, c'est le champ magnétique qui varie sous forme de champ tournant créé dans le stator. Au démarrage le champ tournant balaye les conducteurs de son flux à la vitesse angulaire de synchronisme. Le rotor mis en rotation tend à rattraper le champ tournant. Pour qu'il y ait un couple entretenu au niveau des conducteurs, la variation de flux doit être présente en permanence; ce qui signifie que si les conducteurs tournent à la vitesse de synchronisme comme le champ tournant, la variation de flux sur les conducteurs devient nulle et le

couple moteur disparaît. [2] Un rotor de moteur asynchrone ne tourne donc jamais à la vitesse de synchronisme (50 Hz). Pour un moteur à une paire de pôles (à 50 Hz, la vitesse de rotation du champ tournant est de 3 000 [tr/min]) la vitesse de rotation du rotor peut être de 2950 [tr/min] par exemple; intervient ici la notion de glissement.[2]

I.2.3 : Le stator

Le stator d'un moteur triphasé (le plus courant en moyenne et grosse puissance), comme son nom l'indique, est la partie statique du moteur asynchrone. Il se compose principalement [2] :

- de la carcasse,
- des paliers,
- des flasques de palier,
- du ventilateur refroidissant le moteur,
- le capot protégeant le ventilateur.

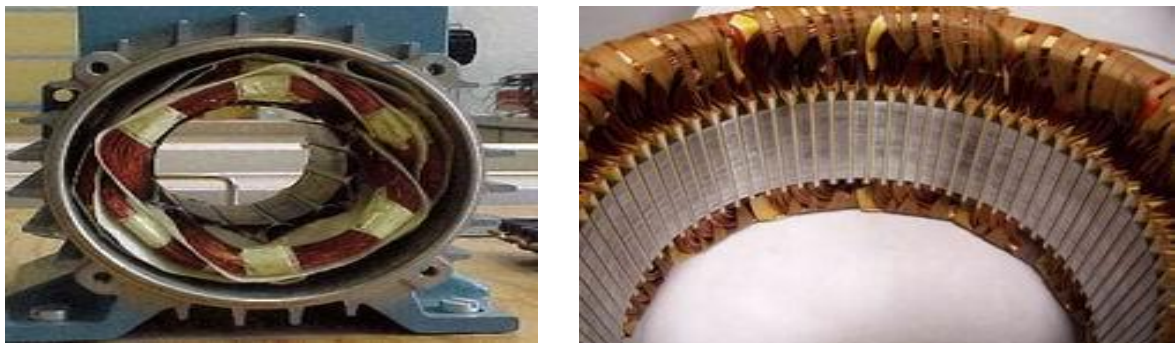


Figure (I.8):Le stator

L'intérieur du stator comprend essentiellement :

un noyau en fer feuilleté de manière à canaliser le flux magnétique, les enroulements (ou bobinage en cuivre) des trois phases logés dans les encoches du noyau.

Dans un moteur triphasé les enroulements sont au nombre minimum de trois décalés l'un de l'autre de 120° comme le montre le schéma ci-dessous. [2]

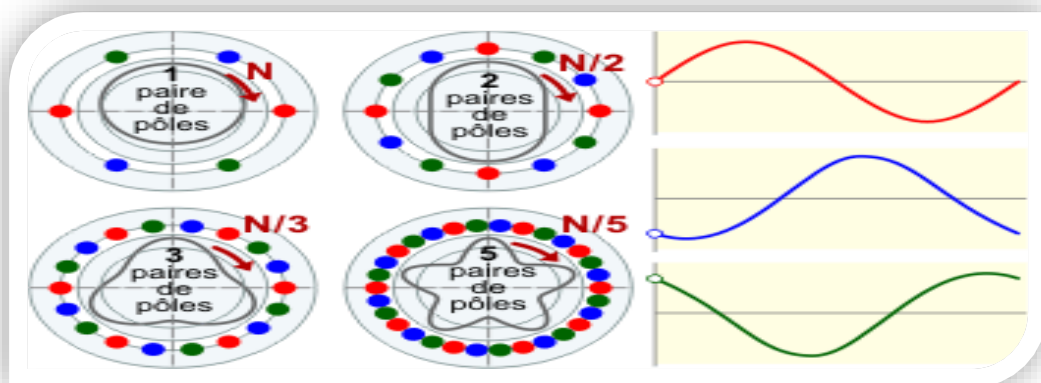


Figure (I.9): Influence du nombre de paires de pôles sur la vitesse de rotation et de la forme du champ statorique résultant

I.2.4 : Le rotor

Le rotor est la partie mobile du moteur asynchrone. Couplé mécaniquement à un treuil d'ascenseur par exemple, il va créer un couple moteur capable de fournir un travail de montée et de descente de la cabine d'ascenseur. Il se compose essentiellement :

D'un empilage de disques minces isolés entre eux et clavetés sur l'arbre du rotor afin de canaliser et de faciliter le passage du flux magnétique. [2]

D'une cage d'écureuil en aluminium coulé dont les barreaux sont de forme trapézoïdale pour les moteurs asynchrones standards et fermés latéralement par deux "flasques" conductrices. [2]



Figure(I.10): Le rotor

I.3 : Excitation D'alternateurs Synchrones

I.3.1 : Généralités

Les alternateurs synchrones, installés dans des centrales de production d'énergie électrique, ont besoin d'une excitation en courant continu. Dans ce but, on utilise aujourd'hui presque exclusivement des convertisseurs de courant. Ils permettent une variation rapide de la tension d'excitation. Ceci est important.

Lors de dérangements comme les court-circuit transitoires sur une ligne de transmission à haute tension ou la déconnexion de la charge (ouverture du disjoncteur principal) par la suite, on montre les principes de base de l'excitation d'alternateurs synchrones.

I.3.2 : Exigences posées à l'excitation d'un alternateur synchrone

Pour un alternateur synchrone, il y a plusieurs états de fonctionnement possibles qui sont résumés schématiquement. Ils posent différentes exigences à l'excitation de l'alternateur synchrone.

Lors de la marche en parallèle avec un réseau rigide, la tension statorique U_s de l'alternateur est imposée par la tension U du réseau. Afin qu'une marche en parallèle correcte soit possible, il faut garantir une répartition adéquate de la puissance réactive sur les différents alternateurs. Il est alors indispensable que le réglage de tension possède un

statisine. La tension statorique réglée doit diminuer légèrement lorsque la puissance réactive de l'alternateur augmente .

La transmission de l'énergie sur une ligne à haute tension pose différentes exigences à l'excitation. Afin de garantir la stabilité statique de la marche en parallèle, il faut limiter l'angle interne δ (angle entre la tension induite par la roue polaire et la tension du réseau) par une augmentation du courant d'excitation. Pour augmenter l'amortissement des oscillations de la roue polaire, on injecte souvent dans l'excitation une composante proportionnelle à $\frac{d\delta}{dt}$. On parle alors aussi de Power System Stabiliser. Lors d'un court circuit transitoire sur la ligne de transmission, on peut éviter le décrochage de l'alternateur en intervenant rapidement sur son excitation. Ceci exige une réserve de tension positive élevée. [3]

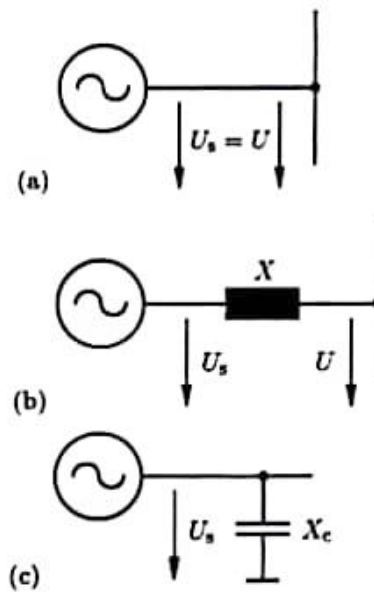


Figure (I.11) : Etats de fonctionnement d'un alternateur synchrone : (a) marche en parallèle avec un réseau rigide, (b) transmission d'énergie sur une ligne à haute tension, (c) alimentation d'une ligne à haute tension à vide.

I.3.3 : Applications dans la production et la transmission d'énergie électrique

Un alternateur synchrone doit souvent mettre sous tension une ligne à haute tension lorsque cette dernière n'est pas branchée au point d'interconnexion avec le réseau. Cette ligne constitue une charge capacitive . L'alternateur doit alors être sous-excité, dans certains cas même négativement .Lorsqu'une défaillance provoque l'ouverture du disjoncteur au point d'interconnexion, il faut réduire rapidement l'excitation afin d'éviter des sur tensions in admissibles aux bornes de l'alternateur et sur la ligne à haute tension. Ceci exige une réserve de tension négative élevée. [3]

I.3.4 : Configuration des circuits de réglage d'un alternateur synchrone

La figure 5.4 montre le schéma de principe d'un réglage de tension d'un alternateur synchrone 1, excité par un convertisseur de courant 2. Selon le principe du réglage en cascade, il y a un premier régulateur R_e pour le courant d'excitation I_e . La consigne I_{ec}

provient d'un deuxième régulateur superposé R_u , le régulateur de tension. Celui-ci régale la tension statorique us sur la consigne U_c . Ce régulateur est muni d'une contre-réaction externe (bloc 7), afin d'obtenir le statisme indispensable pour la marche en parallèle avec un réseau rigide.

Il y a alors une série de signaux supplémentaires pour satisfaire les exigences mentionnées au paragraphe 5.2.2. Si la réactance X de la ligne de transmission à haute tension et du connue, il est possible de calculer l'angle interne δ à partir de la tension et du courant statoriques mesurés (bloc 10). Ce signal est appliqué au limiteur $L\delta$ pour l'angle interne (bloc 11). Si l'angle interne dépasse la valeur admissible (60° par exemple), ce limiteur produit un signal additif à la consigne de tension U_c . Ainsi, l'excitation de l'alternateur sera augmentée. Evidemment, la tension statorique ne sera plus minuteur à sa consigne originale. L'angle interne δ est appliqué aussi au bloc 12 qui forme un signal additif à la consigne du courant d'excitation i_{ec} proportionnel à $\frac{d\delta}{dt}$. Ce signal permet, par l'intermédiaire du réglage du courant d'excitation, d'augmenter l'amortissement des oscillations de la roue polaire et sert donc à stabiliser la marche en parallèle. [3]

I.4 : Convertisseurs Statiques

I.4 : Généralités

Les dispositifs de l'électronique de puissance ont en général non seulement la tâche de contrôler la fluence de l'énergie, mais ils doivent souvent convertir.

I.4.1 : Excitation par un convertisseur de courant

La montre les circuits de puissance pour l'excitation d'un alternateur synchrone par un convertisseur de courant. Normalement, on utilise un convertisseur de courant en montage en pont triphasé. Afin de garantir l'autonomie du groupe turbine- alternateur, le convertisseur de courant est alimenté par un alternateur auxiliaire à aimants permanents. Ce dernier est couplé avec L'arbre de l'alternateur principal. [3]

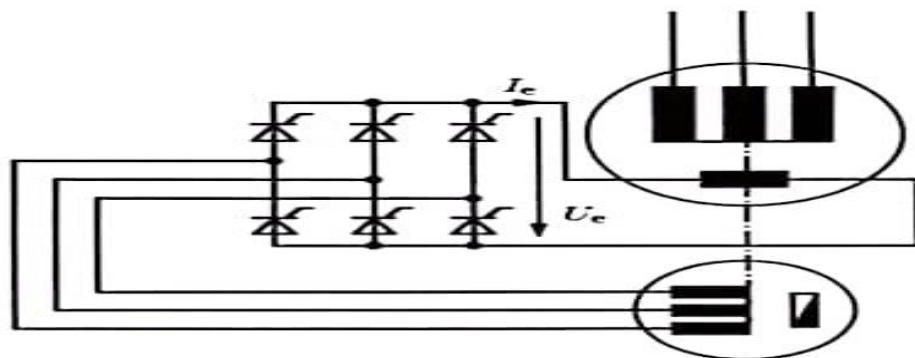


Figure (I.12) : Excitation d'un alternateur synchrone par un convertisseur de courant

I.4.2 : Excitation d'un alternateur synchrone par un convertisseur de courant

La tension de l'alternateur auxiliaire doit être surdimensionnée afin de garantir la réserve de tension nécessaire lors de phénomènes transitoires. En général, la tension

d'excitation maximale doit être égale à deux à trois fois la tension d'excitation nécessaire pour atteindre le point de fonctionnement nominal de l'alternateur.

Par contre, il suffit de dimensionner le convertisseur de courant pour le courant d'excitation nominal.

A cause de la réserve de tension élevée, le convertisseur de courant travaille en régime établi avec un angle de retard d'allumage α entre 60° et 80° environ, comme le montre. L'angle d'empiètement μ est en général relativement élevé puisque l'inductance de commutation de l'alternateur auxiliaire (correspondant à son inductance subtransitoire) est élevée elle aussi. [3]

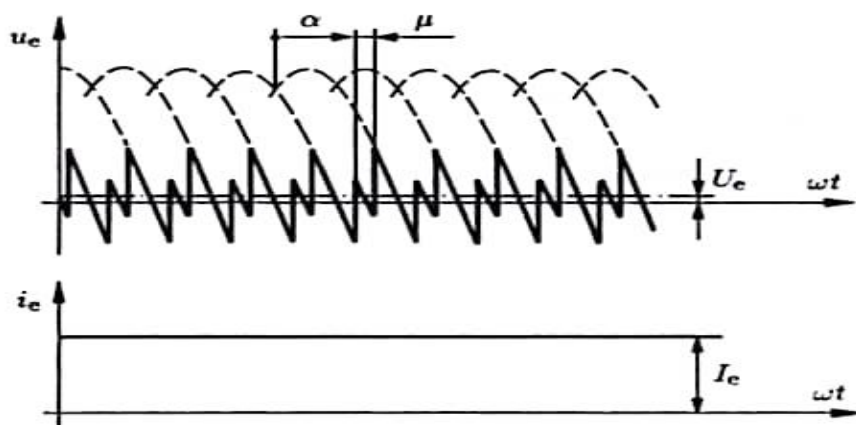


Figure (I.13) : Allure de la tension u_e et du courant d'excitation i_e lors de l'excitation d'un alternateur synchrone par un convertisseur de courant.

Malgré la forte ondulation en tension, le courant d'excitation I_e est pratiquement constant, grâce à la grande constante de temps de l'enroulement d'excitation de l'alternateur.

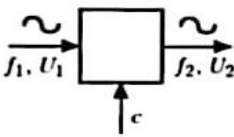
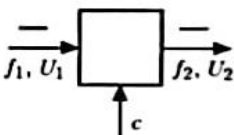
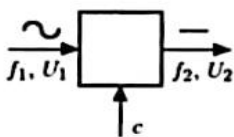
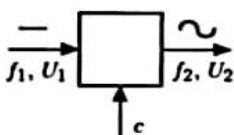
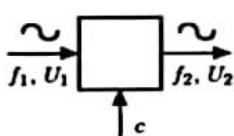
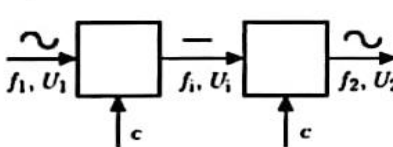
La tension continue peut être variée rapidement (voir paragraphe 2.3.5). La valeur positive maximale s'obtient avec $\alpha = 0^\circ$ tandis que la tension négative maximale apparaît avec $\alpha \simeq 150^\circ$ (limite du fonctionnement en onduleur). [3]

I.4.3 : Introduction à la conversion statique de l'énergie électrique

Genre de courant (alternatif en continu ou vice-versa). Puisque cette conversion se fait des moyens statiques (sect.1.4), on parle de convertisseurs statiques.

Le tableau 1.1 donne une vue d'ensemble des convertisseurs statiques les plus important. Leur fonctionnement de principe sera mentionné brièvement dans les paragraphes suivants. Une description plus détaillée se trouve [2]. Pour d'autres bibliographies sur le convertisseurs statiques, voir par exemple [4] à [15] et [42] à [44] et [3]

Tableau 1.1 Vue d'ensemble des convertisseurs statiques.

No	Désignation	Représentation schématique	Observations
1	Variateur de courant alternatif		$f_2 = f_1 \neq 0$ U_2 : var.
2	Variateur de courant continu		$f_2 = f_1 = 0$ U_2 : var.
3	Convertisseur de courant (Redresseur contrôlé)		$f_2 = 0$ U_2 : var.
4	Onduleur		$f_1 = 0$ f_2, U_2 : var.
5	Convertisseur de fréquence direct		$f_1 \neq 0$ f_2, U_2 : var.
6	Convertisseur de fréquence à circuit intermédiaire		$f_i = 0$ f_2, U_2 : var.

I.4.4 : Variateur de courant alternatif

Le variateur de courant alternatif (n° 1 du tableau 1.1) permet de faire varier l'onde fondamentale et la valeur efficace de la tension alternative secondaire U_2 à l'aide de la commande continu C . Il peut être monophasé ou triphasé. Dans ce cas, il n'y a pas de conversion du genre de courant. La fréquence F_e est égale à la fréquence F_i . [3]

I.4.5 : Variateur de courant continu

Le variateur de courant continu (n° 2 du tableau 1.1) n'effectue pas non plus une conversion du genre de courant. L'alimentation est continue. La tension continu U_2 à la sortie peut être variée par la commande c . La fréquence à la sortie et à l'entrée est $f_2 = f_1 = 0$. [3]

I.4.6 : Convertisseur de courant

Le convertisseur de courant (n° 3 du tableau 1.1) réalise la conversion de courant alternatif en courant continu. La tension U_2 est variable à l'aide de la commande c . Il s'agit donc d'un redresseur contrôlé. La fréquence de sortie est $f_2 = 0$. [3]

Les redresseurs triphasés sont des convertisseurs de l'électronique de puissance qui assurent directement la conversion AC/DC[19]. Ils sont alimentés par une source de tension alternative triphasée et ils permettent d'assurer l'alimentation en courant continu les récepteurs branchés à la leurs sortie [21].

Les redresseurs non contrôlés à diodes et contrôlés à thyristors, fonctionnant en commutation naturelle, représentent la charge non linéaire la plus usitée. Ces convertisseurs sont présents dans de nombreux équipements industriels et domestiques ainsi que dans les dispositifs de conversion de l'énergie électrique. Nous citons ci-dessous les applications les plus courantes : [18]

Nous distinguons deux structures de redresseurs : [17]

- ponts de diodes : constitue l'étage de conversion d'énergie AC/DC (alimentation du bus continu des onduleurs pour les variateurs de vitesse des machines à courant alternatif par exemple).
- ponts de thyristors : même rôle que le pont à diodes avec la possibilité de contrôler le niveau de tension continue en sortie et l'ajout de la réversibilité du flux d'énergie.

Figure (II.6) représente le montage du pont redresseur triphasé à diodes. Celui du pont à thyristors est obtenu par substitution des diodes par des thyristors. Une inductance de couplage est souvent placée à l'entrée du redresseur pour limiter les courants de court-circuit entre phases pendant les commutations des semi-conducteurs dus aux phénomènes d'empiétement.

Le redresseur à MLI de tension est basé sur une structure d'onduleur de tension représenté sur la figure (II.10). Chaque interrupteur est constitué d'un IGBT (composant commandé à l'amorçage et le blocage) et d'une diode en antiparallèle. Cet interrupteur est unidirectionnel en tension et bidirectionnel en courant. Ainsi ce convertisseur de part sa structure, est réversible en courant. IL peut donc contrôlé de façon instantanée la forme d'onde des courants prélevés sur le réseau. Il alimente alors une charge (active ou passive) en continu a partir d'un réseau alternatif, le courant absorbé est éventuellement en phase avec tension du réseau correspondante. Ce redresseur à MLI permet d'atteindre d'un facteur de puissance très proche de l'unité et régler via la commande la direction de flux de l'énergie réactive absorbé ou fournie [23].

I.4.7 : Onduleur

L'onduleur (n° 4 du tableau 1.1) permet la conversion d'un courant continu en courant alternatif. En général, la fréquence f_2 et la tension U_2 au côté alternatif se laissent varier

par la commande c . Le côté alternatif peut être monophasé ou triphasé. Dans ce cas, la fréquence d'entrée est $f_1 = 0$. [3]

I.4.8 : Convertisseur de fréquence direct

Le convertisseur de fréquence direct (n° 5 du tableau 1.1) effectue la conversion de courant alternatif en courant alternatif de manière direct. La fréquence f_2 et la tension U_2 sont variables sous l'influence de commande c . [3]

Les convertisseurs de fréquences directes réalisent la conversion entre une tension d'entrée, de fréquence f_s et d'amplitude V_e données, en une tension de sortie, de fréquence f_s et d'amplitude V_s variable, une seule commande est alors nécessaire [15]. Bien que la conversion directe de fréquence soit une solution plus avantageuse, ils permettent de réaliser une commutation de courant dans les phases de la charge en utilisant une conversion directe de fréquence fixe en fréquence variable, ce que n'offrent pas les convertisseurs indirects. [16]

I.4.9 : Convertisseur de fréquence à circuit intermédiaire

Le convertisseur de fréquence à circuit intermédiaire (n° 6 du tableau 1.1) réalise la conversion de courant alternatif en courant alternatif par un étage intermédiaire d'un système continu. Il s'agit en principe d'une mise en série d'un convertisseur de courant et d'un onduleur. Dans ce cas aussi, la fréquence f_2 et la tension U_2 sont variables. La commande c peut intervenir sur les deux parties. La fréquence dans le circuit intermédiaire est $f_i = 0$. [3]

I.5 : Technique De Conversion

I.5 : Généralités

Le fonctionnement des convertisseurs statiques se base sur le principe fondamental de la technique de conversion : ils commutent périodiquement entre. [3]

I.5.1 : Introduction à la conversion statique de l'énergie électrique

Dans ce cas, on obtient une ondulation de forme rectangulaire très prononcée qui se superpose à la valeur moyenne. Sa valeur crête à creux est de $U = U_1 - U_2$ et sa fréquence $\frac{1}{(t_1 + t_2)}$. Cette conversion se base sur le principe de la commutation à pulsation (hachage).

Le variateur de courant continu travaille selon ce principe, le deuxième niveau de la tension est alors $U_2 = -U_1$. Dans ce dernier cas, la valeur détails à la section 2.5 et dans (2), chapitres 12 et 13. [3]

I.5.2 : Conversion alternative-continue

Dans le cas de la conversion alternative-continue, on commute périodiquement entre des secteurs sinusoïdaux appartenant à un système alternatif polyphasé. Le nombre des phases

est en général deux (déphasage 180° entre les tensions simples), trois (déphasage 120°) ou six (déphasage 60°). La figure 1.5 montre le cas d'un système triphasé. [3]

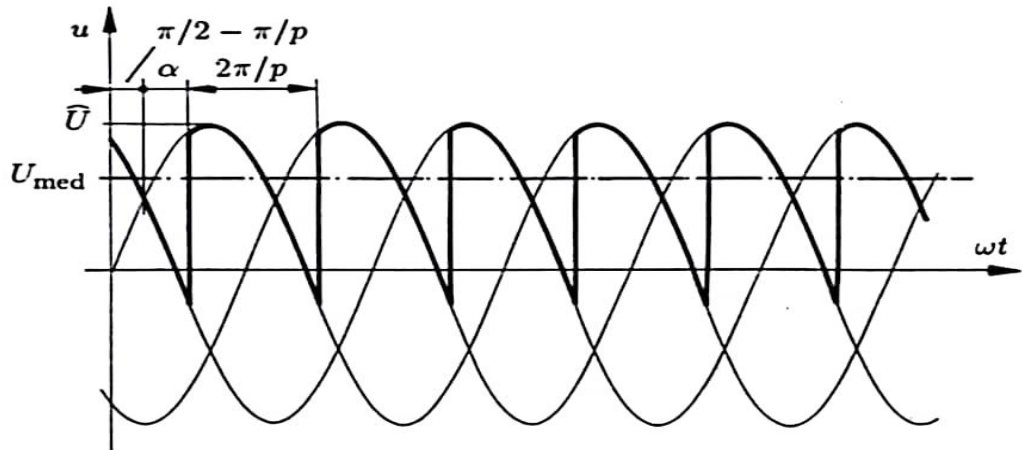


Figure (I.14) : Représentation schématique de la conversion alternative-continue.

Avec p le nombre des phases du système polyphasé, appelé aussi indice de pulsation, on trouve la valeur moyenne de la tension continue par

$$U_{med} = \frac{1}{2\pi/p} \int_{\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{p} + \alpha}^{\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{p} + \alpha} \hat{U} \sin \omega t d\omega t = \frac{p}{\pi} \sin \frac{p}{\pi} \hat{U} \cos \alpha \quad (I-01)$$

En variant l'angle α , la valeur moyenne de la tension continue varie aussi. Elle devient négative pour $\alpha > \frac{\pi}{2}$.

A valeur moyenne est également superposée une ondulation dont la fréquence est p fois la fréquence du réseau d'alimentation polyphasé.

A noter que le convertisseur de courant se base sur ce principe de conversion. Dans ce cas, la commutation d'un secteur de tension alternative sur un autre est assez facile à réaliser (sect. 2.2 et [2], chap. 5 à 7).

Cependant, pour la conversion alternative-continue, d'autres possibilités sont imaginables. Une variante est représentée à la fige 1.6. Dans ce cas, on [3]

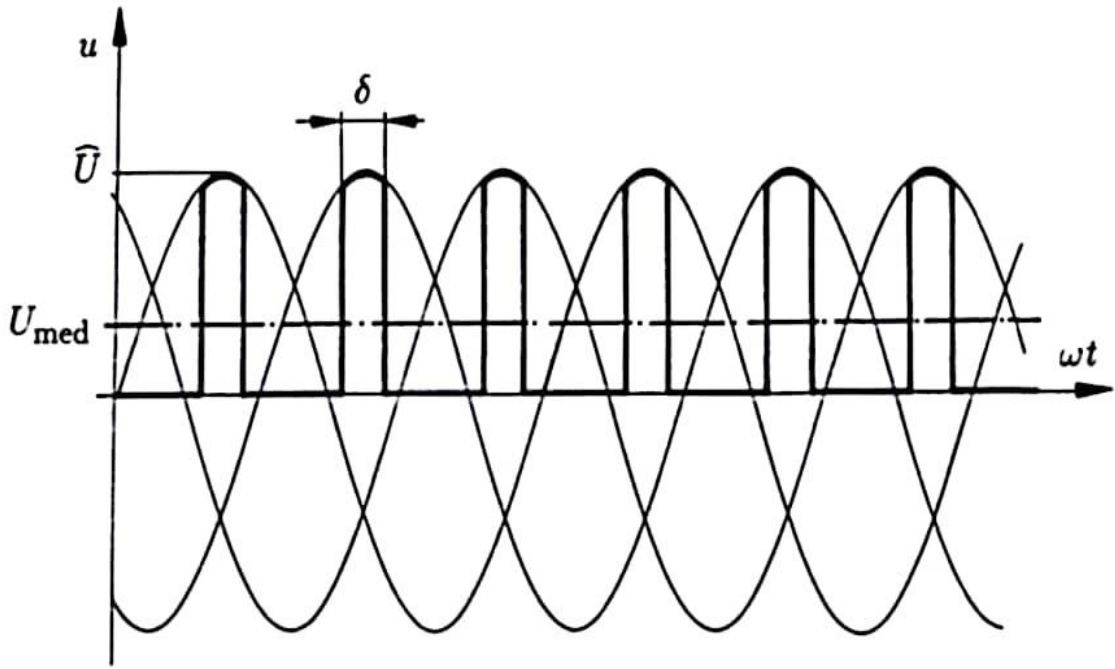


Figure (I.15) : Représentation schématique d'une variante de la conversion alternative-continu.

Utilise des secteurs symétriques des tensions sinusoïdales, intercalés de secteurs où la tension nulle.

La valeur moyenne est donnée, cette fois-ci, par

$$U_{med} = \frac{1}{2\pi/P} \int_{-\frac{\delta}{2}}^{\frac{\delta}{2}} \hat{U} \cos \omega t d\omega t = \frac{P}{\pi} \hat{U} \sin \frac{\delta}{2} \quad (I-02)$$

En variant l'angle δ on varie également la valeur moyenne U_{med} de la tension continue. A celle-ci est de nouveau superposée une ondulation.

Cette méthode n'est pratiquement pas encore utilisée pour la conversion alternative-continu. En effet, la commutation depuis la sinusoïde sur la tension zéro pose certains problèmes, lorsqu'on emploie des thyristors. Cependant, avec l'apparition de nouveaux éléments semi-conducteurs de puissance, plus facilement déclenchés, la réalisation de cette variante de conversion devient possible. [3]

I.5.3 : Conversion continue-alternative

Pour la conversion continue-alternative, il y a plusieurs méthodes qui sont utilisées plus ou moins fréquemment pour la réalisation des onduleurs (sect. 3.4 et (2), chap. 14).

A la figure.1.7 est représentée la méthode la plus simple. On commute alternativement entre les trois niveaux constant $0, +U$ et $-U$. On obtient ainsi une tension alternative variant par gradins.

L'amplitude de l'onde fondamentale de la tension alternative s'obtient par

$$\hat{U} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} u(\omega t) \sin \omega t d\omega t = \frac{4}{\pi} U \sin \frac{\omega t 1}{2} \quad (I-03)$$

Avec cette méthode, il est possible de faire varier l'onde fondamentale lorsque la tension U est constant. On peut également varier la fréquence en intervenant sur les instants de commutation caractérisés par la durée $T/2$ de la demipériode. [3]

I.5.4: Introduction à la conversion statique de l'énergie électrique

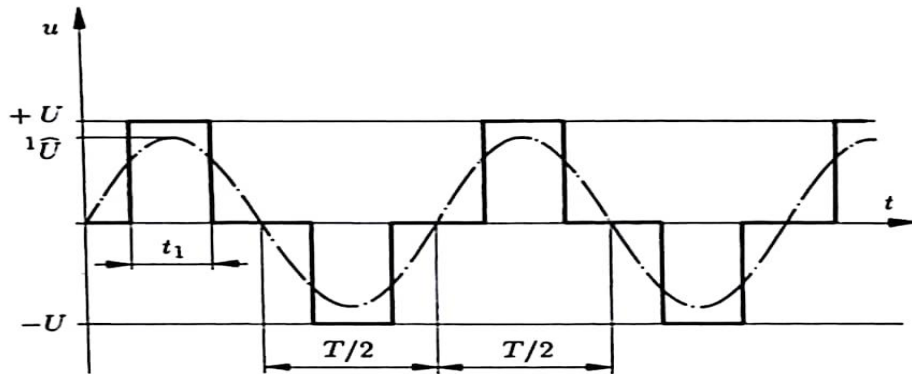


Figure (I.16) : Représentation schématique de la conversion continu-alternative (première méthode).

En plus de l'onde fondamentale, on obtient également des harmoniques dont la fréquence est un multiple impaire de la fréquence fondamentale.

Lorsqu'on désire faire varier l'amplitude de l'onde fondamentale dans un large domaine, il est judicieux de commuter la tension pendant une demipériode plusieurs fois respectivement entre U et 0 et entre 0 et $-U$ comme le montre la figure 1.8. lorsque la durée t_1 , où la tension $u(t)$ est égale à $+U$ ou $-U$, varie sinusoïdalement en fonction du temps t , on obtient une tension pulsée dont la valeur moyenne glissante varie sinusoïdalement en fonction du temps.

Lorsque la période de pulsation T_p est très inférieure par rapport à la demipériode $T/2$ de l'onde fondamentale, la durée t_1 doit être modulée selon la relation [3]

$$t_1 \cong \frac{^1\hat{U}}{U} |\sin \omega t|$$

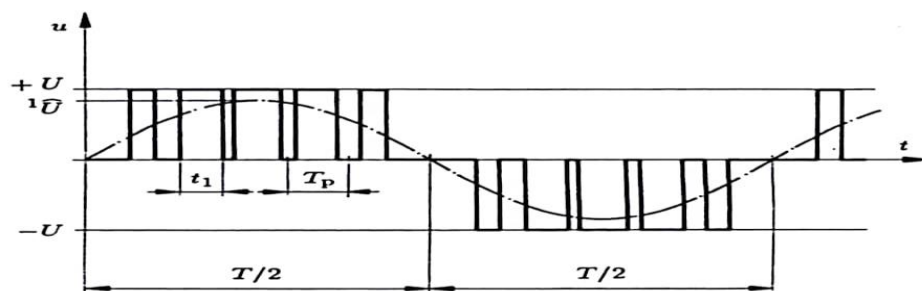


Figure (I.17) : Représentation schématique de la conversion continu-alternative (deuxième méthode).

Elle dépend donc de l'amplitude $^1\hat{U}$ de l'onde fondamentale et de sa pulsation désirées.

$$\omega = 2\pi/T$$

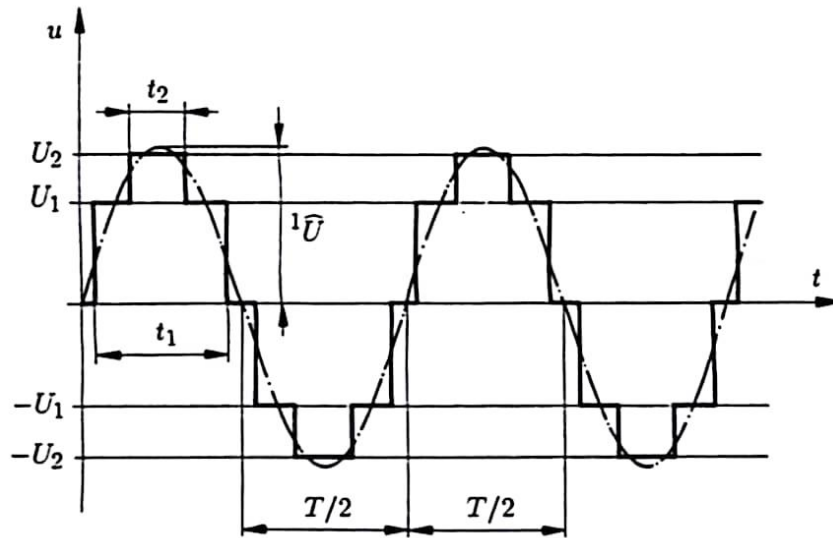
Cette méthode possède l'avantage de ne produire que des harmoniques à fréquence relativement élevée. En effet, elles sont des multiples entiers de la fréquence de pulsation $F_0 = 1/T_0$. A noter que cette méthode, très répandue, est connue sous le sigle **PWM** (pulse width modulation: modulation d'impulsion en durée, voir section 3.5).

Enfin, une troisième méthode est représentée à la figure 1.9. Dans ce cas, on commute entre plusieurs niveaux de tension $U_1, U_2, \dots, U_m$ avec les durées $t_1, t_2, \dots, t_m$ situées symétriquement par rapport à la demi-période $T/2$ (la figure 1.9 est valable pour $m = 2$). [3]

L'amplitude de l'onde fondamentale est donnée par

$$1\hat{U} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} u(\omega t) \sin \omega t d\omega t = \frac{4}{\pi} \sum_{i=1}^m (U_i - U_{i-1}) \sin \frac{\omega t_i}{2} \quad (I-04)$$

Où il faut poser $U_0 = 0$. La pulsation de l'onde fondamentale est $\omega = 2\pi / T$. En intervenant sur les durées t_i , on voit qu'il est possible de faire varier l'onde fondamentale dans un large domaine (où l'on peut aussi admettre $t_i = 0$). [3]



Figure(I.18) : Représentation schématique de la conversion continue-alternative (troisième méthode).

Dans ce cas aussi, on obtient des harmoniques se superposant à l'onde fondamentale. Cependant, avec un choix approprié des t_i , on peut minimiser les amplitudes des harmoniques. Elles diminuent aussi avec le nombre m des niveaux de tension adoptés.

Cette dernière méthode nécessite assez de dépenses pour la réalisation. Par conséquent, on ne l'utilise que dans des cas exceptionnels (voir § 6.4.6). [3]

CHAPITRE II

Modélisation du Système

II.1. Introduction :

Notre quotidien est marqué par l'utilisation indispensable de l'énergie électrique qui, depuis longtemps, a connu des évolutions et développements qui ont diversifié ses sources et manières de production. Cette dernière est produite dans des centrales électriques où se fait la transformation de différents types d'énergies de ressources mécanique, nucléaire, thermique, hydraulique ou solaire en énergie électrique. Ces centrales utilisent des manières différentes pour faire tourner les turbines directement couplées au rotor de l'alternateur servant à transformer cette énergie mécanique de rotation en énergie électrique qui sera fournie au réseau auquel est raccordée cette centrale.

Un alternateur peut être utilisé en plusieurs domaines, à petite échelle pour produire de petites puissances (alternateur de voiture) jusqu'à des utilisations de grandes envergures dans des centrales électriques où les puissances produites peuvent atteindre des centaines de milliers de Watts. Dans ces centrales à courants alternatifs, on a un choix entre l'utilisation d'un seul alternateur satisfaisant la puissance voulue ou de plusieurs alternateurs à puissances réparties. Ce dernier choix est plus employé car même en ayant un seul alternateur on aura besoin d'un autre de secours en cas de défaillance et aussi du fait que la puissance du réseau est variable. Un seul générateur prévu pour une charge maximale fonctionnerait souvent à fraction de charge et son rendement moyen serait médiocre. L'énergie produite par un ou plusieurs alternateurs est fournie au réseau auquel ils sont couplés.

En ayant plusieurs alternateurs, on procède à deux types de couplages :

- Un couplage en parallèle où s'ajoutent leurs courants.
- Un couplage en série où s'ajoutent leurs FEM.

Une question se pose alors : comment procéder au couplage d'alternateurs au réseau ?

II.2. Modélisation de la Machine Synchrone :

La modélisation de la machine électrique est une phase primordiale de son développement, les progrès de l'informatique et du génie des logiciels permettent de réaliser des modélisations performantes et d'envisager l'optimisation des machines électriques.

Ainsi la modélisation permet de guider les développements par une quantification des phénomènes. En outre elle est d'un apport précieux en permettant d'une part de restituer une image de ce que l'on peut observer expérimentalement

et d'autre part de prévoir des comportements de la machine plus variés que ceux de l'observation expérimentale.

II.2.1. Modèle triphasé (abc) du moteur synchrone : [8]

Soit un moteur synchrone triphasé (sans amortisseurs d, q) dont les bobinages statoriques a, b, c et rotoriques f. L'application de la loi de Faraday permet d'écrire:[5]

• **Equations électriques :**

Pour stator

$$V_{abc} = R_s i_{abc} + \frac{d\varphi_{abc}}{dt} \quad (II-01)$$

Pour rotor

$$V_f = R_f i_f + \frac{d\varphi_f}{dt} \quad (II-02)$$

Avec :

V_{abc} : Tensions instantanées des phases a, b et c statoriques.

V_f : Tension continue d'excitation rotorique

i_{abc} : Courants instantanées des phases a, b et c statoriques

i_f : Courant d'excitation du rotor

φ_{abc} : Flux totaux à travers les phases a, b, c statoriques.

φ_f : Flux à travers le circuit rotorique.

• **Relation flux- courants :[9]**

Pour le stator

$$\varphi_{abc} = L_{ss} i_{abc} + M_{sf} i_f \quad (II-03)$$

Pour rotor

$$\varphi_f = L_f i_f + M_{fs} i_{abc} \quad (II-04)$$

Avec :

$$V_{abc} = [v_a v_b v_c]^T \quad (II-05)$$

$$i_{abc} = [i_a i_b i_c]^T \quad (II-06)$$

$$\varphi_{abc} = [\varphi_a \varphi_b \varphi_c]^T \quad (II-07)$$

$$R_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (II-08)$$

R_s : est la résistance par phase statorique .

R_f : est la résistance rotorique (inducteur) .

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad (II-09)$$

L_s : inductance propre de phase statorique

M_s : Mutuelle inductance entre phases du stator La matrice inductance L_{ss} s'écrit sous la forme développée suivantes :

$$L_{ss} = L_{so} + L_{sv} \quad (II-10)$$

$$L_{so} = \begin{bmatrix} l_{so} & m_{so} & m_{so} \\ m_{so} & l_{so} & m_{so} \\ m_{so} & m_{so} & l_{so} \end{bmatrix} \quad (II-11)$$

$$L_{so} = l_{sv} \begin{bmatrix} \cos(2\theta) & \cos(2\theta - 2\pi/3) & \cos(2\theta + 2\pi/3) \\ \cos(2\theta - 2\pi/3) & \cos(2\theta + 2\pi/3) & \cos(2\theta) \\ \cos(2\theta + 2\pi/3) & \cos(2\theta) & \cos(2\theta - 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (II-12)$$

La mutuelle inductance entre bobinages du stator et celui du rotor est défini par:

$$M_{sf} = M_{sf}^T = m_{sf} \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (II-13)$$

m_{sf} : le mutuelle inductance entre phases statorique et circuit d'excitation du rotor.

• **Equation mécanique :[8]**

L'équation mécanique est donnée par :

$$C_{em} - C_r = J \cdot d_{\Omega} + f_{\Omega} \quad (II-14)$$

Avec :

$$\Omega = P \cdot \frac{d\theta}{dt} = \frac{\omega}{p} \quad (II-15)$$

Où:

J : Inertie totale des parties mobiles (kg.m²)

Ω : vitesse mécanique de rotation du rotor (rad /s)

C_{em} : Couple électromagnétique de la machine (N.m)

C_r : Couple de charge (N.m)

f : Coefficient de frottement (N.m.s/rad)

P : Nombre de paires de pôles de la machine.

ω : Pulsation électrique du rotor par rapport au stator.

II.2.2. Transformation de Park :

La transformation de Park est une transformation du repère triphasé fixe (abc) à l'un repère biphasé (dq). Cette transformation permet de réduire la complexité du système. La transformation de Park est obtenue à partir d'une matrice unique, définie comme suite :[8]

$$[P] = K \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos(\theta_s - 2\pi/3) & \cos(\theta_s + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta_s) & -\sin(\theta_s - 2\pi/3) & -\sin(\theta_s + 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II-16)$$

Où K est une constante qui peut prendre la valeur 2/3 pour la transformation avec conservation de l'amplitude ou la valeur $\sqrt{2}/3$ pour la transformation avec conservation de puissance. La matrice inverse est $[P]^{-1}$ donnée par:[9]

$$[P]^{-1} = K \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta s) & -\sin(\theta s) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta s - 2\pi/3) & -\sin(\theta s - 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta s + 2\pi/3) & -\sin(\theta s + 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II-17)$$

Le passage du système triphasé au système diphasé est défini par le système d'équations suivant:[5]

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = [P] \cdot \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (II-18)$$

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [P]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} \quad (II-19)$$

Avec

X : Grandeur statorique ou rotorique (représente le vecteur de tension, courant ou flux).

X_0 : La composante homopolaire choisie nulle pour un système équilibré.

II.2.3. Modèle de PARK de la machine synchrone : [8]

La transformation de Park se rattachant à un système d'axes déterminé, il est primordial d'en recenser les repères privilégiés. Ceux-ci sont au nombre de trois, liés soit au stator, soit au rotor, soit aux champs tournants dans l'entrefer. Pour une machine synchrone, il paraît naturel de fixer la transformation par rapport au rotor. Par contre, pour une machine asynchrone, le choix du repère dépend de l'utilisation du modèle.[5]

Après l'application de la transformation de PARK au système d'équations on obtient

- **Equations des tensions :[5]**

$$v_d = R_s i_d + \frac{d\varphi_d}{dt} + \omega \cdot \varphi_q \quad (II-20)$$

$$v_q = R_s i_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \omega \cdot \varphi_d \quad (II-21)$$

$$-v_f = R_r i_f + \frac{d\varphi_f}{dt} \quad (II-22)$$

- **Relation du flux courants :[8]**

$$\varphi_d = L_d i_d \quad (II-23)$$

$$\varphi_q = L_q i_q + m_{sf} i_f \quad (II-24)$$

$$\varphi_f = L_f i_f + m_{sf} i_q \quad (II-25)$$

- **Equation mécanique :[5]**

$$\text{S'écrit sous la forme : } \frac{d\Omega}{dt} = (C_{em} - C_r - f_\Omega) \quad (II-26)$$

- Expression du couple électromagnétique:[9]

$$C_{em} = P(\varphi_d i_q - i_d \varphi_q) \quad (II-27)$$

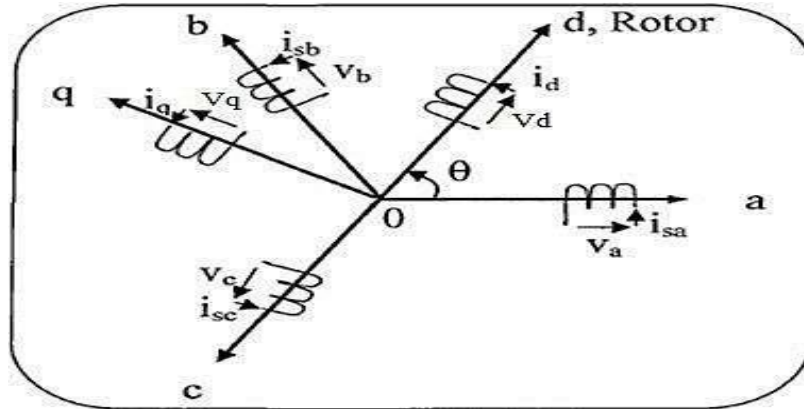


Figure (II.1) : Représentation vectorielle des Référentiel (a,b,c) , (d,q)

II.2.4. Représentation d'état du modèle de la machine : [5]

La représentation d'état du moteur synchrone dépend du repère choisi et du choix des variables d'état pour les équations électriques. Nous écrivons les équations dans le repère (d, q) en utilisant les flux et la vitesse du rotor comme variables. Le choix des variables d'état dépend des objectifs soit pour la commande soit pour l'observation.

- **Modèle de la machine synchrone sous forme d'état alimentée en tension repère lié au rotor (d, q) : [8]**

Le modèle de la machine synchrone à pôles lisses mise sous forme d'équation d'états est non linéaire, multi variable et fortement couplé, il s'écrit sous la forme :

$$[\dot{X}] = f(t, x, u) \quad (II-28)$$

$$[Y] = [C] \cdot [X] \quad (II-29)$$

Avec :

$$[U] = [V_d V_q - V_f]^T : \text{vecteur de commande}$$

$[Y]$: Vecteur de sortie

$$[X] = [d_{\varphi\varphi q} \varphi_{\varphi f} \Omega]^T : \text{Vecteur d'états}$$

Sous la forme développée :

$$\frac{d\varphi_q}{dt} = V_d \frac{-R_s}{L_s} \cdot \varphi_d + \Omega_{\varphi\varphi q} \quad (II-30)$$

$$\frac{d\varphi_q}{dt} = V_q + \frac{-R_s}{L_s \cdot \text{sig}} \cdot \varphi_q + \frac{-R_s M_{sf}}{L_f \cdot L_s \cdot \text{sig}} \varphi_f - \Omega_{\varphi\varphi d} \quad (II-31)$$

$$\frac{d\varphi_f}{dt} = -V_f + \frac{-R_f M_{sf}}{L_f \cdot L_s \cdot \text{sig}} \varphi_q + \frac{-R_f}{L_f \cdot \text{sig}} \cdot \varphi_{\varphi q} \quad (II-32)$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = (C_{em} - C_r - f_{\Omega})/J \quad (II-33)$$

Avec :

$$Sig = 1 - \frac{Ms f^2}{Lf.Ls} \quad (II-34)$$

$$C_{em} = P(\varphi_d i_q - i_d \varphi_q) \quad (II-35)$$

Pour notre machine citée en annexe, elle est à pôles lisses $L_s = L_d = L_q$: inductance statorique, L_f : inductance rotorique .

II.3. Utilisation de la machine synchrone en alternateur : [13]

II.3.1. Introduction :

La puissance distribuée par un réseau électrique est généralement produite par un ensemble des alternateurs débitants en parallèle sur ce réseau. Une centrale de production comporte donc plusieurs alternateurs couplés en parallèle au lieu d'un seul alternateur puissant. Non seulement parce qu'en cas d'une panne sur l'unique alternateur ou en cas de besoin de maintenance périodique, il faudrait disposer d'une machine de secours de même puissance, mais encore parce que la puissance demandée par un réseau est très variable. Ainsi un seul générateur prévu pour la charge maximale fonctionnerait avec un rendement médiocre à fraction de charge.[5]

II.3.2. Couplage d'un alternateur à un réseau puissant :

Le réseau puissant est supposé comme un alternateur à réactance négligeable devant celle de l'alternateur à coupler. Le réseau impose donc une tension V aux bornes de l'alternateur. Soient un alternateur de réactance X à coupler à vide avec le réseau. En supposant que les conditions de couplage sont déjà vérifiées. Le courant et la puissance de synchronisation sont déduits directement des relations (II-36) et (II-37) en remplaçant X_1 par X , X_2 par zéro et E par V comme suit : [5]

$$I_1 = I_2 = \frac{2E}{X_1 + X_2} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \quad (II-36) \quad \text{Et} \quad P_1 = \frac{3E^2}{X_1 + X_2} \sin \theta \quad (II-38)$$

$$I = \frac{2V}{X} \sin \frac{\theta}{2} \quad (II-37) \quad \text{Et} \quad P_1 = \frac{3V^2}{X} \sin \theta \quad (II-39)$$

Remarques : En pratique, pour vérifier les conditions de couplage en basses puissances, on utilise des lampes montées aux bornes des interrupteurs.

- Les lampes doivent supporter $2V$, sinon, on utilise deux lampes en série qui supportent que V .
- Les lampes doivent s'allumer et s'éteindre en même temps, sinon, on corrige l'ordre de succession de phases.
- Le cycle d'allumage et d'extinction des lampes doit être très lent, sinon, on règle la vitesse de rotation de l'alternateur.
- L'extinction des lampes doit être complète, sinon, on règle la **f.é.m** en agissant sur l'excitation.

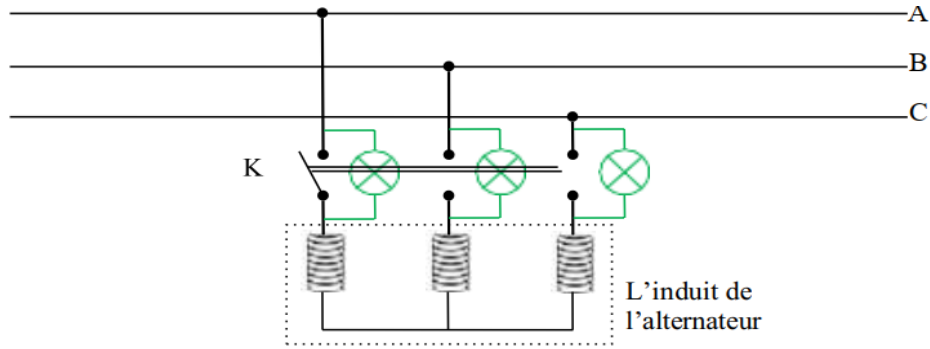


Figure (II.2) : Schéma de principe du couplage d'un alternateur au réseau

Pour les machines de fortes puissances, on utilise le synchronoscope. Un petit moteur qui tourne à la différence des fréquences de l'alternateur et le réseau. Il ferme l'interrupteur dès que sa vitesse est suffisamment lente.

II.3.3. Fonctionnement en Moteur Synchrone :

Soit un moteur synchrone alimenté directement par un alternateur de réactances différentes. Ainsi, la projection des points de fonctionnement donne les puissances actives et réactives à des échelles différentes. La puissance active (réactive) du moteur et de l'alternateur sont égale mais de signes différents (figure II.3). La projection du point de fonctionnement M_1 du moteur donne :[5]

$$P_1 = -\frac{3V}{X_1} AM_1^1 \text{ et } Q_1 = \pm \frac{3V}{X_1} AM_1^2 \quad (\text{II-40})$$

La projection du point de fonctionnement M_2 de l'alternateur donne :

$$P_2 = +\frac{3V}{X_2} AM_2^1 \text{ et } Q_2 = \mp \frac{3V}{X_2} AM_2^2 \quad (\text{II-41})$$

La puissance s'exerçant entre le moteur et l'alternateur est égale à la puissance synchronisante calculée précédemment mais dans ce cas elle n'est pas oscillatoire (sens unique).

$$P = \frac{3E_1 E_2}{X_1 + X_2} (\theta_1 + \theta_2) \quad (\text{II-42})$$

Dans le cas où le moteur est relié à un réseau puissant donc de faible impédance et de f.é.m égale à sa tension aux bornes du moteur, la puissance échangée sera déduite directement de l'équation précédente comme suit : $P = \frac{3VE}{X} (\theta)$ (II-43)

Avec : E , X et θ désignent la f. é. m du moteur, sa réactance et son angle interne successivement .

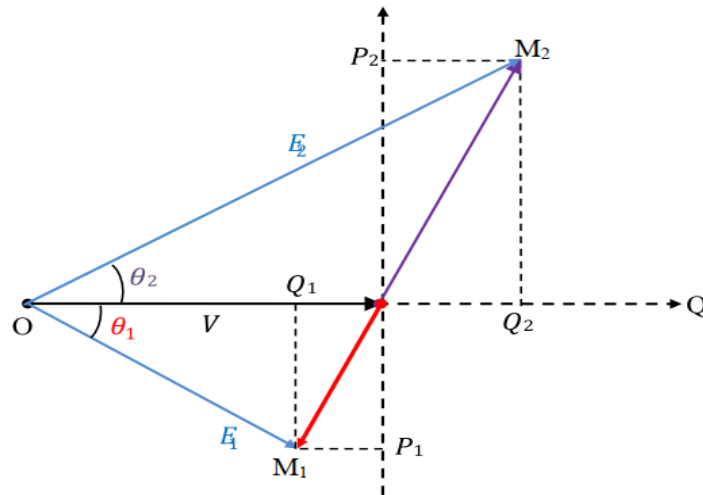


Figure (II.3) : Représentation vectorielle d'un moteur synchrone alimenté directement par un alternateur

Remarques : Brancher un moteur synchrone triphasé sur le réseau est une opération assez délicate. Il faut, en plus de réaliser les mêmes conditions de couplage d'un alternateur au réseau, utiliser un des deux procédés suivants. Entraîner le moteur synchrone jusqu'à une vitesse très proche du synchronisme à l'aide d'un moteur auxiliaire, puis le coupler lorsque toutes les conditions de couplage sont réunies: En fait, le moteur d'entraînement peut être de puissance nettement inférieure à celle du moteur synchrone si le démarrage s'effectue à vide. Dans le cas des machines synchrone munies des excitatrices, cette dernière joue le rôle du moteur auxiliaire lors du démarrage. [13]

- Démarrer le moteur synchrone en asynchrone : Au départ, l'inducteur n'est pas alimenté, mais refermé sur une résistance additionnelle. De ce fait, le système est équivalent à un moteur asynchrone (à cela près que le rotor est monophasé ici). En régime établi, la vitesse de rotation étant proche de celle de synchronisme, l'alimentation en courant continu de l'inducteur permettra alors au moteur de s'accrocher et de tourner en moteur synchrone.

Dans la pratique, cette opération peut être refaite plusieurs fois si l'accrochage n'est pas atteint.

II.4. Bilan des puissances de machines synchrones couplées au réseau :

Une machine synchrone couplée au réseau fonctionne donc sous la tension et la fréquence du réseau supposées constantes. Nous nous contenterons ici d'un bilan simplifié, en ne prenant en compte que les pertes les plus importantes, qui sont:

- les pertes mécaniques au niveau du rotor
- les pertes Joule dans le circuit d'excitation
- les pertes fer dans le stator
- les pertes Joule dans le circuit d'induit

Parmi ces pertes, on trouve des pertes constantes et des pertes variables.[5]

II.4.1. Les pertes variables :

Ce sont les pertes par effet Joule. Si nous ne négligeons pas les pertes de l'excitation, alors les pertes variables sont localisées dans le circuit de l'induit et le circuit de l'excitation. Elles se calculent selon les relations suivantes :[5]

II.4.1.1. Pertes par effet Joule du circuit de l'induit : [14]

$$P_{js} = 3RI^2 \quad (II-44)$$

où " R " est la résistance d'une phase de l'enroulement de l'induit.[5]

II.4.1.2. Pertes par effet Joule du circuit de l'inducteur :

$$P_{jd} = R_d J_d^2 \quad (II-45)$$

où " R_d " et " J_d " est la résistance de l'inducteur et le courant d'excitation successivement.[5]

II.4.2. Les pertes constantes *pcst* : [14]

Pour une vitesse de rotation constante et un courant d'excitation " J_d " donnés, les pertes suivantes sont considérées comme constantes :

- Les pertes mécaniques rotationnelles , qui sont dues aux frottements et à la résistance de l'air ;
- Les pertes fer p_{fer} du circuit magnétique qui sont dues l'effet d'hystérésis et par courant de Foucault, et qui ont pour cause l'échauffement du circuit magnétique de la machine

Ces pertes ne sont pas mesurables mais, comme elles sont constantes, on peut les déterminer en fonctionnement moteur à vide. La puissance absorbée dans ce cas égale pratiquement les pertes constantes car les pertes par effet Joule sont négligeable à vide.[5]

$$P_{cst} = P_{fer} + P_{mec} \quad (II-46)$$

II.4.3. La puissance absorbée :

- **Cas du fonctionnement alternateur : [13]**

Si l'alternateur n'est pas auto-excité, en plus de la puissance mécanique, l'alternateur absorbe une puissance d'excitation qui se transforme totalement en pertes par effet Joule du circuit de l'inducteur:

$$P_a = P_{mec} + P_{jd} \quad (II-47)$$

Le dispositif d'entraînement (la turbine en générale) fournit une puissance mécanique :

$$P_{mec} = \Gamma_{mec} \Omega_s \quad (II-48)$$

Avec : " Γ_{mec} " est le couple mécanique sur l'arbre de l'alternateur et " Ω_s " est la vitesse angulaire de synchronisme.[5]

- **Cas du fonctionnement moteur :**

Si le moteur synchrone n'est pas auto-excité, en plus de sa puissance active, il absorbe une puissance d'excitation qui se transforme totalement en pertes par effet Joule du circuit de l'inducteur:[5]

$$P_a = P + P_{jd} = \sqrt{3UI.\cos\varphi} + P_{jd} \quad (II-49)$$

II.4.4. La puissance utile :

- **Cas du fonctionnement alternateur : [14]**

La puissance utile d'un alternateur est la puissance électrique fournie par son induit. Puisque l'induit fournit une puissance triphasée, alors nécessairement :[5]

$$P_u = P = \sqrt{3UI.\cos\varphi} \quad (II-50)$$

- **Cas du fonctionnement moteur : [13]**

La puissance utile d'un moteur synchrone est la puissance mécanique développée sur son arbre sous forme d'une vitesse constante (vitesse de synchronisme) et un couple mécanique variable:[5]

$$P_u = P_{mec} = \Gamma_{mec}\Omega_s \quad (II-51)$$

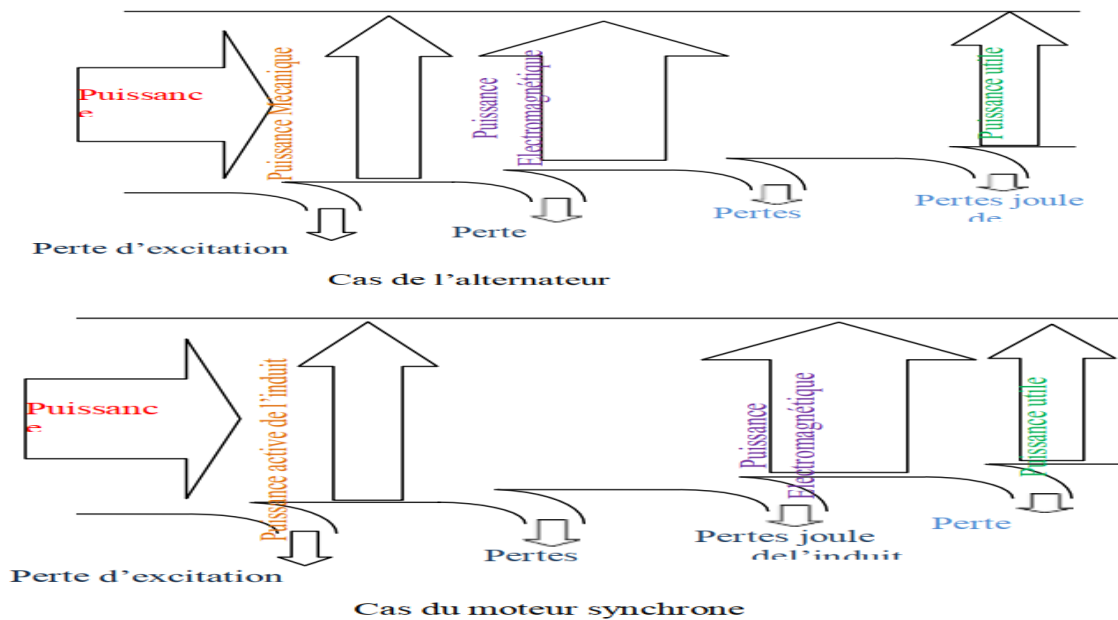


Figure (II.4) : Représentation du bilan de puissances des machines synchrone



Figure (II.5) : Image d'un Alternateur Automobile

II.5. Modélisation du redresseur

triphasé :

Les redresseurs triphasés sont des convertisseurs de l'électronique de puissance qui assurent directement la conversion AC/DC[19]. Ils sont alimentés par une source de tension alternative triphasée et ils permettent d'assurer l'alimentation en courant continu les récepteurs branchés à la leurs sortie [21].

Les redresseur à MLI peuvent s'adaptés aux évolutions de la charge et du réseau électrique est ceci sans modifier les installations [22]. Ces redresseurs sont appliqué dans plusieurs domaines, exemple les entrainements par machines électriques triphasé, les éoliennes...etc[20]

Pour mieux comprendre le fonctionnement des redresseurs triphasés, et ainsi aborder leur commande, nous devons présenter quelques généralités sur le redresseur de tension triphasé, et effectuer la modélisation du redresseur MLI triphasé, qui sera le sujet des commandes à suivre. Et donc, les divers points en questions sont les suivants:[6]

- Petite simulation d'un redresseur triphasé à diodes
- Plusieurs topologies de redresseurs triphasés.
- Principe de fonctionnement du redresseur MLI triphasé.
- Modélisation du redresseur MLI triphasé
- Représentation du redresseur MLI triphasé dans plusieurs référentiels.

II.5.1. THD et FFT d'un redresseur triphasé à diodes:

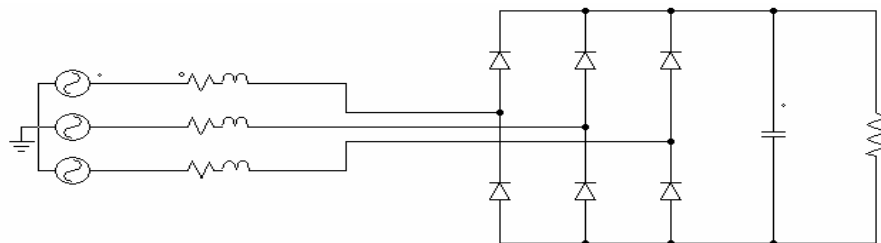


Figure (II.6) :Topologie de base d'un redresseur triphasé à diodes

Une simulation d'un redresseur triphasé à diodes, réalisée grâce au logiciel PSim, pour connaître le THD et la FFT du courant de ligne, et ceci, afin de juger de la différence existante entre les redresseurs commandés et non commandés. Tout cela, concernant ces mêmes THD et FFT, c'est-à-dire, lissage du courant et taux d'harmoniques présents en celui-ci.

En sachant que le THD peut être calculé comme suit[11]

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=H} Q_h^2}}{Q_1} \quad (II-52)$$

Où Q_1 est la valeur efficace de l'harmonique au rang h du courant ou de la tension, et Q_1 la composante fondamentale[6]

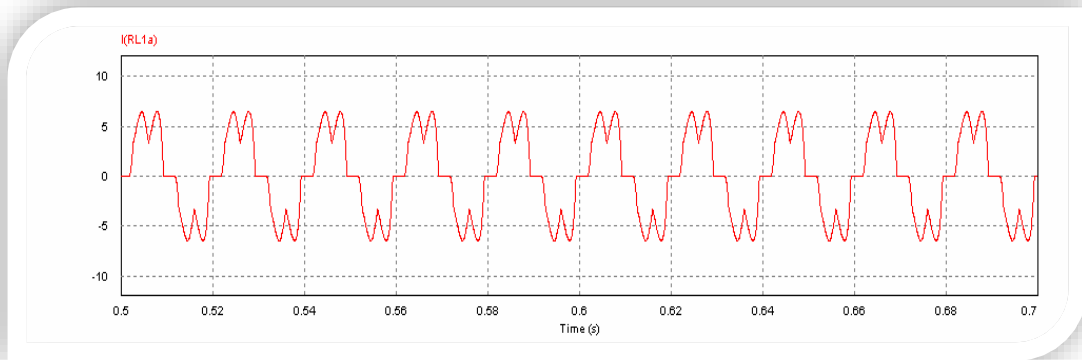


Figure (II.7) : Courant de ligne (THD = 31.7%).

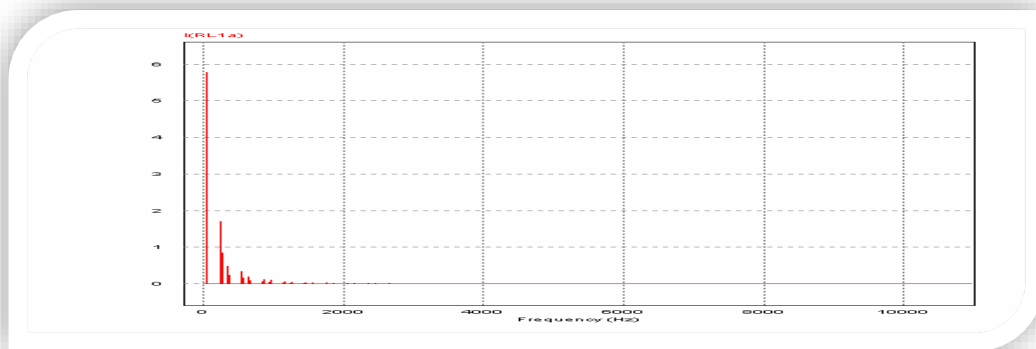


Figure (II.8) : FFT du courant de ligne



Figure (II.9) : Image d'un Redresseur triphasé à diodes

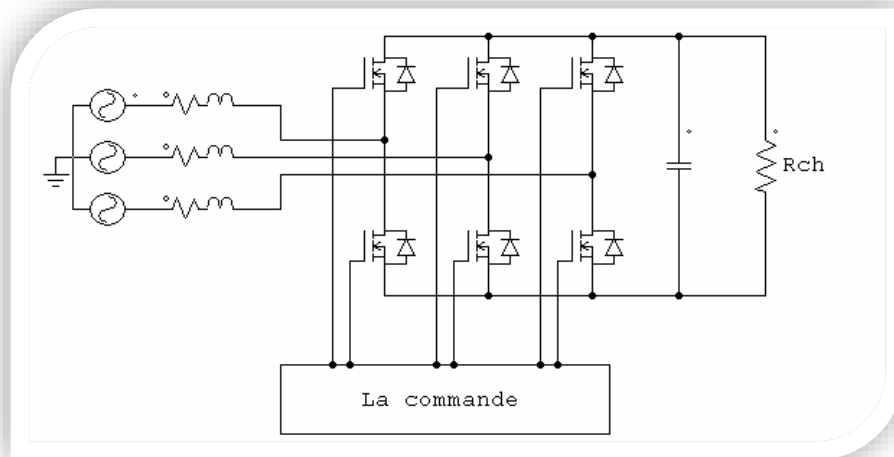


Figure (II.10) : Topologie de base d'un redresseur de tension

II.5.2. Différentes topologies de redresseurs triphasés : [11]

La topologie (a) présente une simple solution d'un convertisseur Boost avec la possibilité d'augmenter la valeur de la tension continue de sortie. Ceci est une importante caractéristique pour les convertisseurs ASD donnant une tension de sortie maximale. L'inconvénient majeur de ce redresseur est le stress sur les composants et la basse fréquence de distorsion du courant d'entrée. Les topologies (b) et (c) utilisent des modules de redresseurs MLI avec une très basse évaluation du courant (20-25% du courant efficace comparé à la topologie (e)). De là, ils sont moins coûteux, et procurent la possibilité d'un freinage par récupération (b) ou filtre actif (c). La topologie (d) représente le redresseur de vienne. L'avantage principal est la faiblesse de la tension de commutation, ce qui requiert des interrupteurs non conventionnels. La topologie (e) représente la plus populaire des topologies et utilisée en ASD et récemment comme redresseur MLI. Cette topologie universelle a l'avantage d'utiliser un module triphasé peu coûteux avec un écoulement d'énergie dans les deux sens. Parmi ses inconvénients, des pertes à la commutation et une faible protection face aux courts-circuits. Les caractéristiques de toutes les topologies sont présentées dans le tableau (II.1).[6]

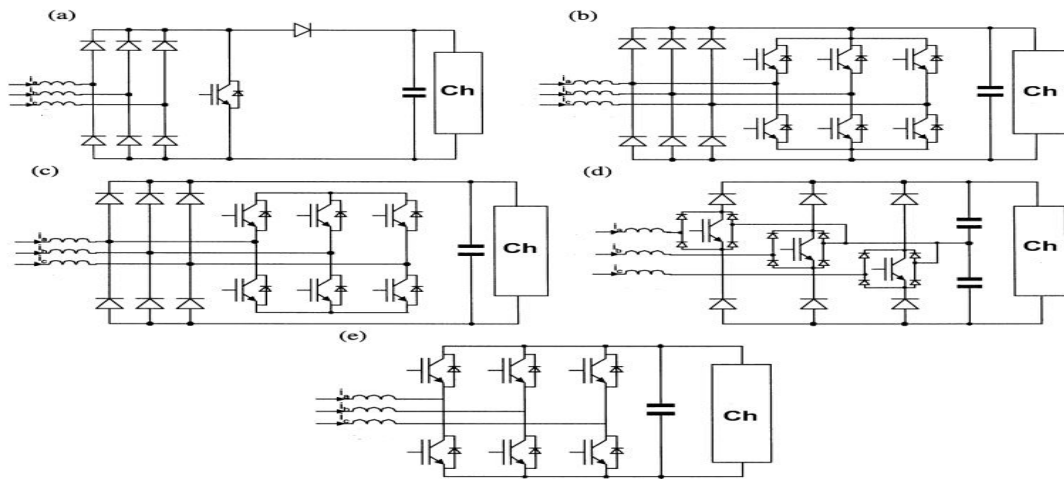


Figure (II.11) : Les topologies les plus communes d'un redresseur triphasé.

La dernière topologie est la plus prometteuse, et est ainsi choisie par la plupart des compagnies (Siemens, ABB...etc.) Dans un système continu de distribution de puissance, ou un convertisseur AC/DC/AC, la puissance alternative est transformée premièrement en continue grâce au redresseur triphasé. Elle fournit un facteur de puissance unitaire, et de faibles courants harmoniques.[6]

La topologie	Régulation de la tension de sortie continue	Peu de courants harmoniques de ligne	Forme d'ondes du courant quasi-sinusoïdale	Correction du facteur de puissance	Ecoulement de puissance dans les deux sens	R_q
Redresseur à diodes	-	-	-	-	-	
(a)	+	-	-	+	-	
(b)	-	-	-	-	+	
(c)	-	+	+	+	-	UPF(*)
(d)	+	+	+	+	-	UPF(*)
(e)	+	+	+	+	+	UPF(*)

Tableau (II.1) : Caractéristiques des topologies d'un redresseur à diodes.

(*) UPF: Facteur de puissance unitaire

II.5.3. Principe de fonctionnement du redresseur MLI triphasé: [11]

Contrairement aux redresseurs classiques (non commandés), les redresseurs **MLI** sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. La possibilité de

commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, par ce que les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, à l'ouverture comme à la fermeture avec une fréquence assez élevée. Il y a deux manières de mettre en application des redresseurs **MLI**, redresseur à source de courant ou redresseur à source de tension. Comme ces derniers sont de loin les plus utilisés, seulement ce type du redresseur sera abordé.

Le redresseur de tension fonctionne en gardant la tension du bus continu à une valeur de référence désirée, en utilisant une commande en boucle fermée. Pour accomplir cette tâche, la tension du bus continu est mesurée et comparée avec une tension de référence, le signal d'erreur produit de cette comparaison est employé pour commuter les six interrupteurs du redresseur à la fermeture et à l'ouverture. De cette façon, la puissance peut s'écouler dans les deux sens selon les conditions sur la tension du bus continu mesurée aux bornes du condensateur C. Quand le courant I_{ch} est positif, le condensateur C est déchargé, et le signal d'erreur demande au bloc de commande plus de puissance de la source alternative. Le bloc de commande prend la puissance de la source alternative en produisant un signal **MLI** approprié pour les six interrupteurs. De cette façon, un écoulement plus de courant de la source alternative au côté continu, et la tension de condensateur est récupérée. Inversement, quand le courant I_{ch} est négatif, le condensateur C est surchargé, et le signal d'erreur demande au bloc de commande pour décharger le condensateur, et la puissance retourne à la source alternative. [6]

La commande **MLI** peut, non seulement, contrôler la puissance active, mais également la puissance réactive, et donc ce type de redresseur permet la correction du facteur de puissance. En outre, les formes d'ondes des courants de la source peuvent être maintenus comme presque sinusoïdales, ce qui réduit la distorsion de la source. [6]

II.6. Modélisation du redresseur MLI triphasé

L'auteur a considéré la relation (Eq. I.1) pour représenter les huit états possibles de la tension d'entrée u dans un plan complexe $\alpha - \beta$ [6]

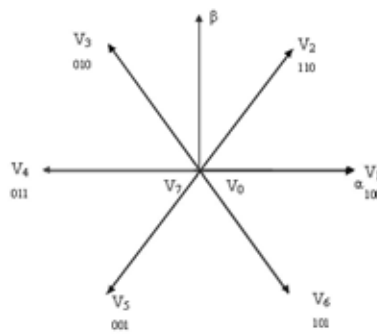


Figure (II.12) :Présentation du vecteur de tension u_k

$$U_{K+1} = \begin{cases} \left(\frac{2}{3}\right) U_{dc} e^{\frac{jk\pi}{3}} & \text{pour } k = 0 \dots 5 \\ U_7 = U_0 = 0 & \end{cases} \quad (II-53)$$

Les huit états de commutation sont représentés ci-dessous

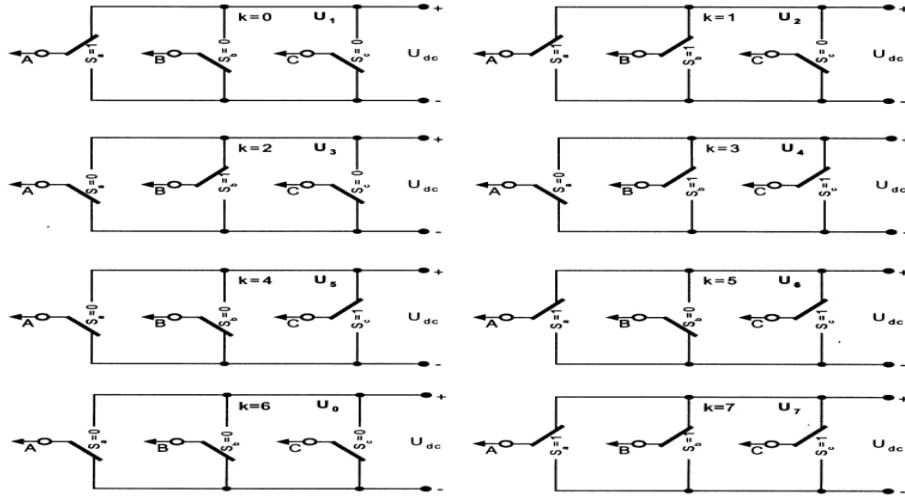


Figure (II.13) : Etats de commutation du pont d'un redresseur MLI.

Et sont résumés dans le tableau qui suit :

k	S_a	S_b	S_c	$u_{S\ ab}$	$u_{S\ bc}$	$u_{S\ ca}$
0	1	0	0	U_{dc}	0	$-U_{dc}$
1	1	1	0	0	U_{dc}	$-U_{dc}$
2	0	1	0	$-U_{dc}$	U_{dc}	0
3	0	1	1	$-U_{dc}$	0	U_{dc}
4	0	0	1	0	$-U_{dc}$	U_{dc}
5	1	0	1	U_{dc}	$-U_{dc}$	0
6	0	0	0	0	0	0
7	1	1	1	0	0	0

Tableau (II.2) : Tableau retraçant les états de commutation.

Du tableau, on peut écrire les tensions d'entrée du redresseur d'une manière générale comme suit:

$$u_{sab} = (S_a - S_b)U_{dc} \quad (II-54)$$

$$u_{sbc} = (S_b - S_c)U_{dc} \quad (II-55)$$

$$u_{sca} = (S_c - S_a)U_{dc} \quad (II-56)$$

D'où on peut déduire les tensions simples:

$$u_{sa} = f_a U_{dc} \quad (II-57)$$

$$u_{sb} = f_b U_{dc} \quad (II-58)$$

$$u_{sc} = f_c U_{dc} \quad (II-59)$$

Avec:

$$f_a = \frac{2S_a - (S_b + S_c)}{3} \quad (II-60)$$

$$f_b = \frac{2S_b - (S_a + S_c)}{3} \quad (II-61)$$

$$f_c = \frac{2S_c - (S_a + S_b)}{3} \quad (II-62)$$

II.6.1. Représentation dans le référentiel triphasé $a - b - c$: [6]

Les équations de la tension pour le système triphasé équilibré sans neutre peuvent être écrites comme:

$$u_L = u_l + u_s \quad (II-63)$$

$$u_L = R \cdot I_L + L \frac{di_l}{dt} + u_s \quad (II-64)$$

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} \quad (II-65)$$

Et la tension d'entrée du redresseur peut être écrite comme suit

$$u_{sn} = U_{dc} \left(S_n - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) \quad / S \in \{0, 1\} \quad (II-66)$$

Par ailleurs, on peut écrire le courant du bus continu sous la forme

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = i_c \quad (II-67)$$

Le courant dans la capacité peut aussi être écrit comme

$$i_c = i_{dc} - i_{ch} \quad (II-68)$$

Aussi, le courant i_c est la somme du produit des courants de chaque phase par l'état des on interrupteur

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = s_a i_a + s_b i_b + s_c i_c - i_{ch} \quad (II-69)$$

Donc, le côté alternatif du redresseur

$$L \frac{di_a}{dt} + R i_a = u_a - U_{dc} \left(S_a - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) = u_a - U_{dc} \left(s_a - \frac{1}{3} (s_a + s_b + s_c) \right) \quad (II-70)$$

$$L \frac{di_b}{dt} + R i_b = u_b - U_{dc} \left(S_b - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) = u_b - U_{dc} \left(s_b - \frac{1}{3} (s_a + s_b + s_c) \right) \quad (II-71)$$

$$L \frac{di_c}{dt} + R i_c = u_c - U_{dc} \left(S_c - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) = u_c - U_{dc} \left(s_c - \frac{1}{3} (s_a + s_b + s_c) \right) \quad (II-72)$$

Où les tension du réseau sont exprimées par

$$u_a = E_m \sin(\omega t) \quad (II-73)$$

$$u_b = E_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (II-74)$$

$$u_c = E_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (II-75)$$

Les équations précédentes peuvent alors être résumées comme suit

$$\left(L \frac{d}{dt} + R\right) i_n = u_n - U_{dc} \left(S_n - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n\right) \quad (II-76)$$

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = \sum_{n=a}^c S_n i_n - i_{ch} \quad (II-77)$$

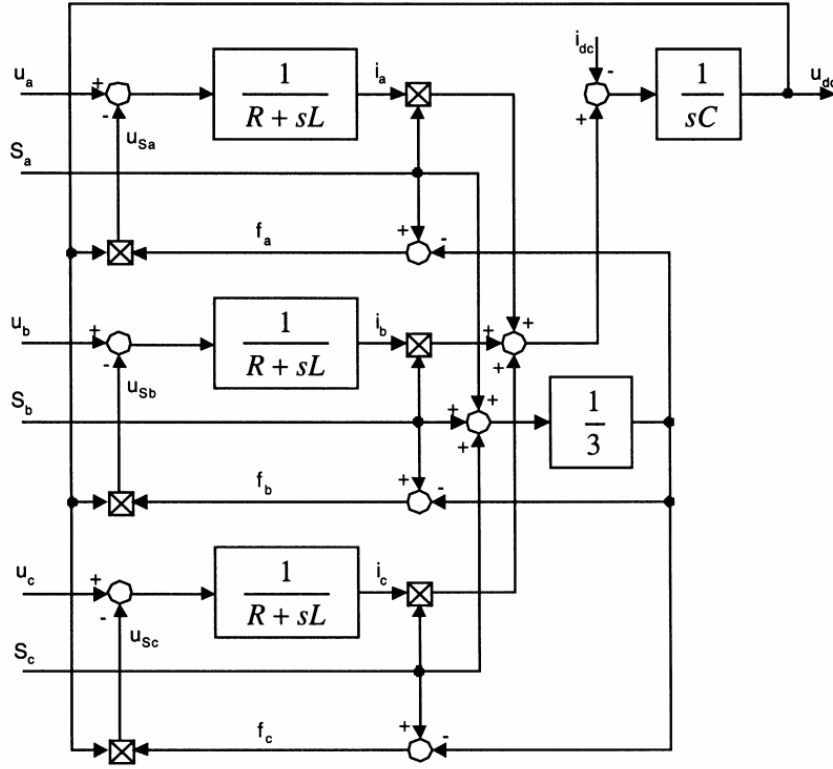


Figure (II.14) : Schéma fonctionnel d'un redresseur MLI dans les coordonnées triphasées normales.

II.6.2. Représentation dans le référentiel fixe : [11]

Les équations des tensions dans le repère fixe $\gamma - \beta$ sont obtenues par l'application des équations... avec:

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/2 & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (II-78)$$

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma \\ -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (II-79)$$

Ce qui donne

$$R i_{L\alpha} + L \frac{di_{L\alpha}}{dt} = u_{s\alpha} - U_{dc} S_\alpha \quad (II-80)$$

$$R i_{L\beta} + L \frac{di_{L\beta}}{dt} = u_{s\beta} - U_{dc} S_\beta \quad (II-81)$$

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = \sum_{n=\alpha}^\beta S_n i_{Ln} - i_{ch} = \frac{3}{2} (S_\alpha i_{L\alpha} + S_\beta i_{L\beta}) - i_{ch} \quad (II-82)$$

Où

$$S_\alpha = \frac{1}{\sqrt{6}}(2S_a - S_b - S_c), S_\beta = \frac{1}{\sqrt{2}}(S_b - S_c) \quad (II-83)$$

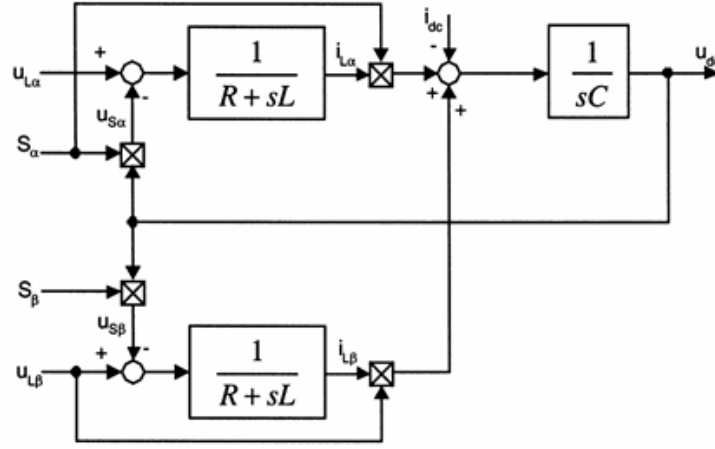


Figure (II.15) : Schéma fonctionnel d'un redresseur MLI dans les coordonnées fixes $d-q$

II.6.3. Représentation dans le référentiel tournant d,q : [6]

Les équations dans le repère tournant $d-q$ sont aussi obtenues à l'aide de la transformation

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/2 & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (II-84)$$

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma \\ -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (II-85)$$

$$\text{Ainsi: } u_{Ld} = Ri_{Ld} + L \frac{di_{Ld}}{dt} - \omega Li_{Lq} + u_{sd} \quad (II-86)$$

$$u_{Lq} = Ri_{Lq} + L \frac{di_{Lq}}{dt} - \omega Li_{Ld} + u_{sq} \quad (II-87)$$

$$\text{Où } S_d = S_\alpha \cos(\omega t) + S_\beta \sin(\omega t), S_q = S_\beta \cos(\omega t) - S_\alpha \sin(\omega t) \quad (II-88)$$

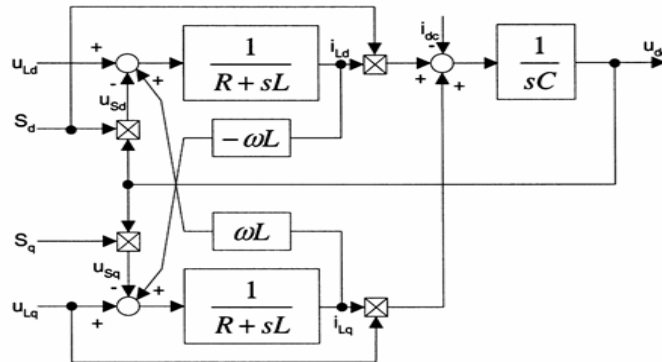


Figure (II.16) : Schéma fonctionnel d'un redresseur MLI dans le référentiel tournant $d-q$

II.6.4. Les Puissances active et réactive

$p, q : [11]$

Les puissances active et réactive données par la source sont données par

$$p = \text{Re}\{\underline{u} \cdot \underline{i}^*\} = u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c \quad (\text{II-89})$$

$$q = \text{Im}\{\underline{u} \cdot \underline{i}^*\} = u_\beta i_\alpha - u_\alpha i_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}(u_{bc} i_a + u_{ca} i_b + u_{ab} i_c) \quad (\text{II-90})$$

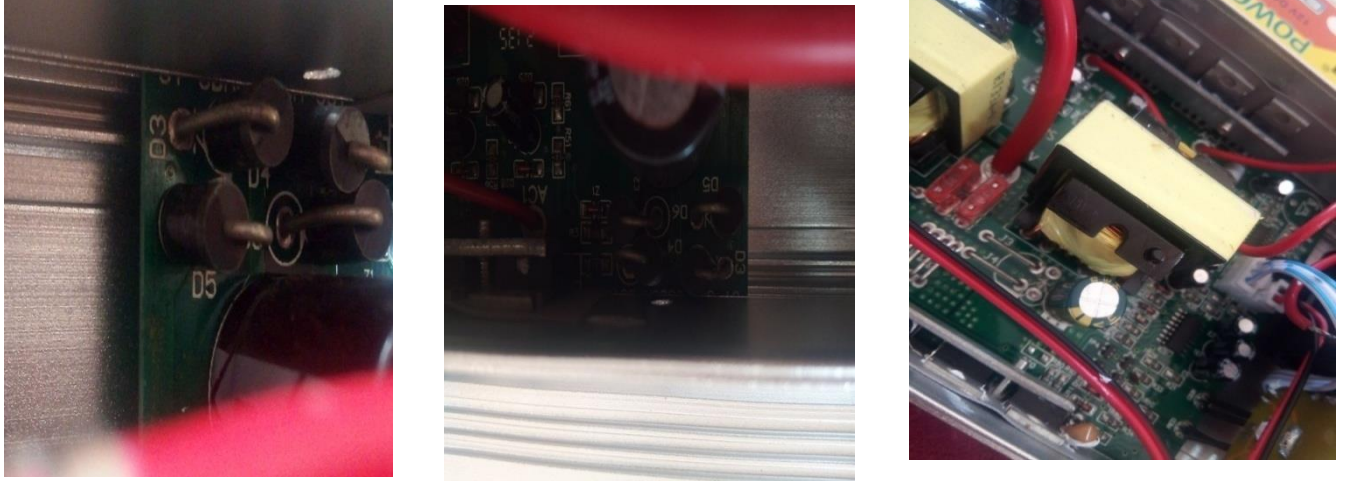


Figure (II.17) : Images d'un Redresseur triphasé à diodes

II.7. Modélisation de l'onduleur triphasé :

La modélisation de l'onduleur de tension permet de donner une vue mathématique de leur principe de fonctionnement, c'est-à-dire grâce à cette vue on peut comprendre bien leur fonctionnement.

La grande importance de ce modèle mathématique c'est la simulation numérique de l'onduleur, par ce que la simulation numérique est une simulation analogique sa réalisation est faite par logiciel exécuté par un ordinateur, donc on a besoin d'un modèle mathématique. [4]

II.7.1. Représentation structurelle d'un onduleur de tension triphasé:

L'onduleur de tension est constitué de trois bras de commutation à transistors ou à thyristors. Chaque bras composé de deux cellules comportant chacune une diode et un transistor ou un thyristor. Tous ces éléments sont considérés comme des interrupteurs idéaux.

En mode commandable, le bras est un commutateur à deux positions qui permet d'obtenir à la sortie deux niveaux de tension. Un bras de l'onduleur est représenté par la Figure (II.18). [4]

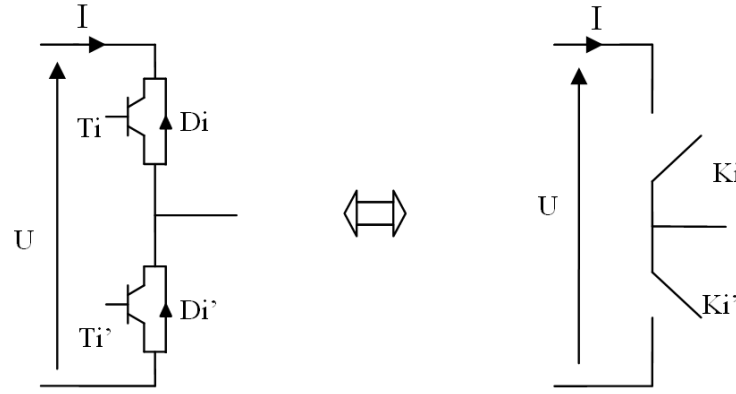


Figure (II.18) : schéma d'un bras de l'onduleur de tension

Schéma équivalent de l'onduleur est représenté par la Figure (II.19).

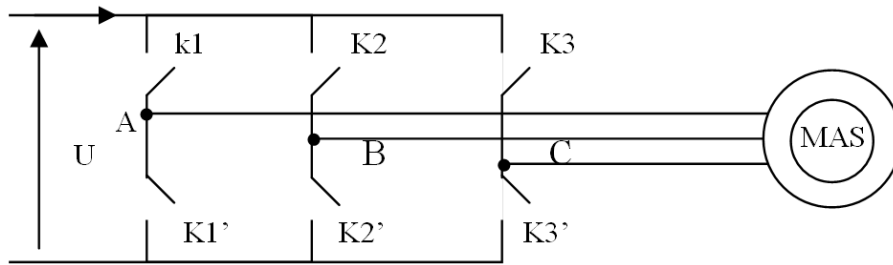


Figure (II.19) : Schéma équivalent de l'onduleur de tension

II.7.2. Modélisation matriciel de l'onduleur de tension :

L'onduleur est modélisé en associant à chaque bras une fonction logique F_i ($i=1, 2, 3, 4, 5, 6$)

$$F_i = \begin{cases} +1 & \text{Si } T_i \text{ est fermé, } T'_i \text{ est ouvert} \\ 0 & \text{Si } T_i \text{ est ouvert, } T'_i \text{ est fermé} \end{cases} \quad (\text{II-91})$$

Ainsi que les tensions :

$$V_{AB1} = V'_{A1} - V'_{B1} = U(F_1 - F_2) \quad (\text{II-92})$$

$$V_{BC1} = V'_{B1} - V'_{C1} = U(F_2 - F_3) \quad (\text{II-93})$$

$$V_{CA1} = V'_{C1} - V'_{A1} = U(F_3 - F_1) \quad (\text{II-94})$$

$$V_{AB2} = V'_{A2} - V'_{B2} = U(F_4 - F_5) \quad (\text{II-95})$$

$$V_{BC2} = V'_{B2} - V'_{C2} = U(F_5 - F_6) \quad (\text{II-96})$$

$$V_{CA1} = V'_{C1} - V'_{A1} = U(F_6 - F_4) \quad (\text{II-97})$$

Dans l'hypothèse on a les tensions V'_A, V'_B, V'_C forment un system de tension triphasée équilibrée alors :[4]

$$\text{De (II-88) et (II-89) on trouve : } V'_{B1} = \frac{U}{3}(2F_2 - F_1 - F_3) \quad (\text{II-98})$$

$$\text{De (II-89) et (II-90) on trouve : } V'_{B1} = \frac{U}{3}(2F_2 - F_1 - F_3) \quad (\text{II-99})$$

De (II-88) et (II-90) on trouve : $B'_{B1} = \frac{U}{3}(2F_2 - F_1 - F_3)$ (II-100)

De même procédé on trouve : $B'_{B1} = \frac{U}{3}(2F_2 - F_1 - F_3)$ (II-101)

$B'_{B1} = \frac{U}{3}(2F_2 - F_1 - F_3)$ (II-102)

$B'_{B1} = \frac{U}{3}(2F_2 - F_1 - F_3)$ (II-103)

Donc : $\begin{bmatrix} V'_{A2} \\ V'_{B2} \\ V'_{C2} \end{bmatrix} = \frac{U}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_4 \\ F_5 \\ F_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V'_{A1} \\ V'_{B1} \\ V'_{C1} \end{bmatrix} = \frac{U}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix}$ (II-104)



Figure (II.20) : Image représente un onduleur Monophasé

II.8. Transformateur monophasé :

Le transformateur monophasé est constitué d'un circuit magnétique fermé de deux circuits électriques sans liaison entre eux, enroulés autour du circuit magnétique.

Dans la pratique, les enroulements sont imbriqués l'un dans l'autre pour améliorer le rendement du transformateur.[10]

II.8.1. Schéma électrique équivalent :

Un transformateur réel, monophasé, peut être électriquement modélisé par la figure suivante :[7]

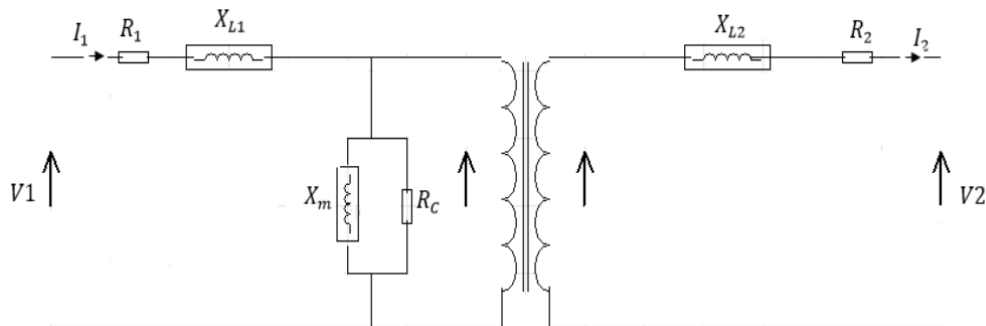


Figure (II.21) : schéma électrique équivalent d'un transformateur.

Soit une impédance Z soumise à une tension monophasée de valeur efficace V est traversé par un courant efficace/ alors : V et I sont déphasés de ϕ . $\cos \phi$ est appelé le facteur de puissance

L'impédance consomme (ou dissipe) une puissance active[7].

$$P = VI \cos \varphi \text{ (W) watt} \quad (II-105)$$

L'impédance consomme une puissance réactive.

$$Q = VI \sin \varphi \text{ (VAR) Volt Ampère Réactif} \quad (II-106)$$

On définit une puissance apparente $S = VI$ de sorte que $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ (VA)

Le rapport de transformation est donné par : $m = \frac{V_2}{V_1}$

Si $m > 1$ $V_1 < V_2$ Transformateur élévateur*

* Si $m < 1$ $V_1 > V_2$ transformateur abaisseur

* Si $m = 1$ $V_1 = V_2$ Transformateur d'isolement

a . Constitution des transformateurs monophasés :

Le transformateur en général est constitué de deux parties essentielles :[10]

- La partie électrique qui correspond au bobinage .
- La partie magnétique qui est constitué par le noyau.

Les deux parties on peut les représenter schématiquement comme le montre la figure suivante :

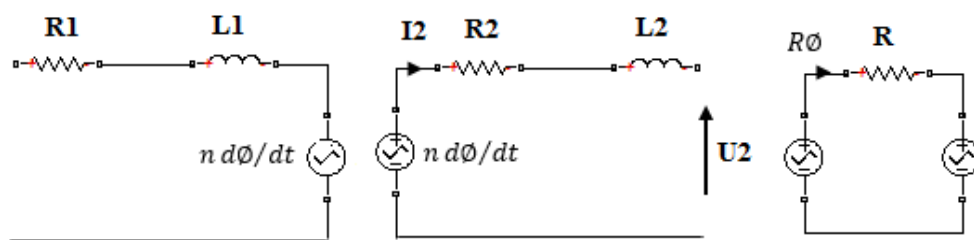


Figure (II.22) : Les circuits électrique et magnétique du transformateur.

$$U_1 - R_1 I_1 - L_1 \frac{di_1}{dt} - n_1 d\Phi/dt = 0 \quad (II-107)$$

$$n_2 \frac{d\Phi}{dt} - R_2 I_2 - L_2 \frac{di_2}{dt} - U_2 = 0 \quad (II-108)$$

b. Modification de la forme d'énergie:

Le transformateur parfait modifie la forme de l'énergie électrique et rien d'autre c'est-à-dire pas de conversion énergétique (e. g pas d'échauffement) aucune pertes $\eta = 100\%$

η : le Rendement comme indiquée dans la figure suivante :[7]

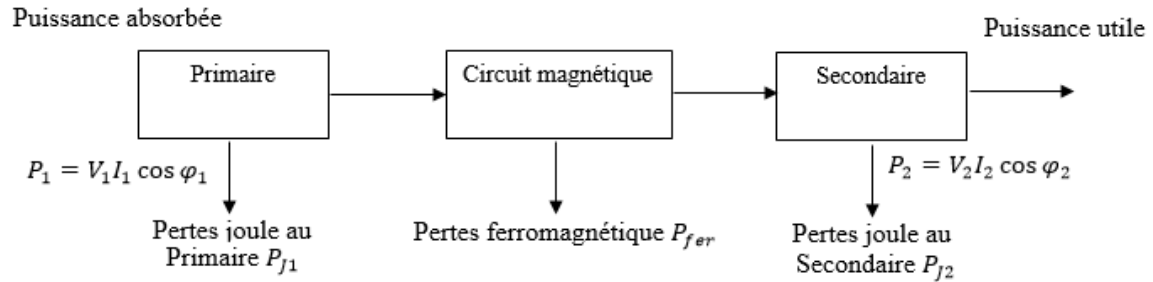


Figure (II.23) : Le transformateur modifie la forme de l'énergie électrique.

II.8.2. Modélisation des transformateurs:

$$\eta = \frac{(P - P_{j1} - P_{j2} - P_{fer})}{P_2} \times 100\% \quad (II-109)$$

Comme pour tout composant d'un réseau électrique, sa modélisation dépend du type de phénomènes à étudier, c'est-à-dire de la gamme de fréquences concernée.

Il est connu que l'impédance des composantes inductives augmente avec la fréquence, alors que, inversement, l'impédance des composantes capacitatives diminue avec la fréquence :[10]

$$Z_l = \omega * L \quad (II-110)$$

$$Z_c = 1 / \omega * c \quad (II-111)$$

Ainsi, avec l'augmentation de la fréquence considérée, l'importance des composantes inductives s'amenuise et celle des composantes capacitatives croît. Autrement dit, à basse fréquence, Z_c est très grand, le composant capacitif peut être considéré comme un circuit ouvert.[10]

II.8.3. Transformateur monophasé linéaire sans saturation:

Un transformateur présente un comportement non linéaire dû principalement à la caractéristique de l'inductance. Lorsque le fonctionnement du transformateur se situe dans la zone linéaire de cette caractéristique, alors la modélisation devient simple. Celle-ci se traduit par un schéma équivalent où l'on représente ses impédances linéaires et son rapport de transformation m .

L'impédance linéaire est composée, pour chaque enroulement, d'une inductance modélisant le flux magnétique de fuite et d'une résistance modélisant les pertes par effet Joule et les pertes supplémentaires. [12] Il faut aussi ajouter une branche parallèle pour représenter l'inductance démagnétisation. On a donc le schéma classique de la figure suivante :[7]

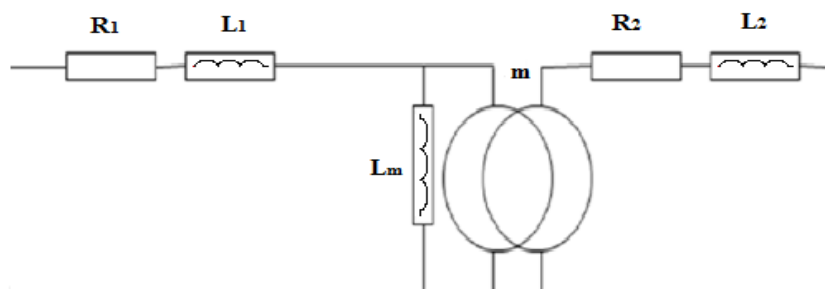


Figure (II.24) : Modélisation d'un transformateur monophasé en basse fréquence sans saturation.

Il existe éventuellement des pertes à vide, nous pouvons les représenter au moyen d'une résistance R_m en parallèle :

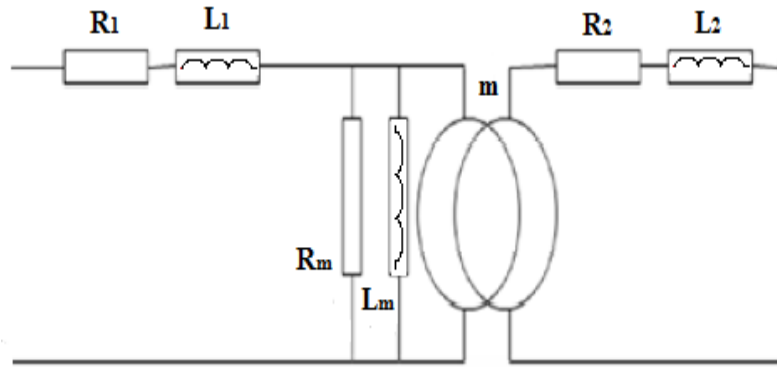


Figure (II.25) : Modélisation d'un transformateur monophasé en basse fréquence avec pertes fer, Sans saturation.

II.8.4. Transformateur monophasé avec saturation :

L'enclenchement et le ré-enclenchement avec flux rémanent font que la zone de fonctionnement non-linéaire du transformateur est sollicitée.

La caractéristique de saturation donnée par une courbe du flux dans le noyau en fonction du courant magnétisant est représentée par une inductance non-linéaire (Figure II.26).

Notons que l'inductance non linéaire peut être placée indifféremment côté primaire ou côté secondaire tant que le rapport de transformation est respecté.

Ce modèle étant le circuit de base, pour disposer d'un modèle général adapté à tous les phénomènes qui peuvent apparaître dans l'étude dans ces conditions.[10]

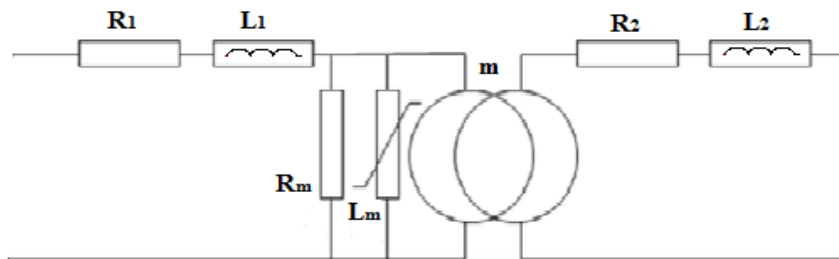


Figure (II.26) : Modélisation d'un transformateur monophasé en basse fréquence avec saturation.

A partir de ce modèle, il est possible de retrouver la forme du courant d'appel par un calcul analytique. Soient V_p , V_s les tensions au primaire et au secondaire, i le courant au primaire et φ le flux traversant la bobine. Quand le transformateur est alimenté du côté primaire avec côté secondaire à vide, soit $V_p = V_m(\sin \omega t + \theta_0)$ avec ω la pulsation angulaire, V_m la tension de source nominale en valeur crête et θ_0 la phase initiale, l'équation décrivant le comportement du noyau saturable est :

$$V_p = R_1 i(t) + \frac{L_1 di(t)}{dt} + \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (II-112)$$

$$V_p = R_1 i(t) + \frac{L_1 di(t)}{dt} + \frac{d\varphi(t)}{di} \frac{di(t)}{dt} \quad (II-113)$$

Dans le cas où la résistance de magnétisation est très grande, le courant dans le noyau du transformateur peut être approximé par le courant au primaire i . $\frac{d\varphi(t)}{dt}$ peut être ainsi représenté par une inductance égale à la pente de la fonction $\varphi(i)$. L'équation (I.20) peut être réécrite comme :[7]

$$V_p = R_1 i(t) + L_1 di(t) / dt + L_{noyau}(\varphi) \frac{di(t)}{dt} \quad (II-114)$$

$$L_{noyau}(\varphi) = \begin{cases} L_{mpourt} & \leq t_s \\ L_{spourt} & \geq t_s \end{cases} \quad (II-115)$$

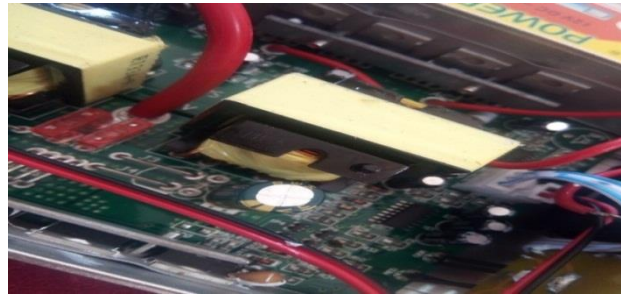


Figure (II.27) : Image représente un transformateur monophasé

Conclusion :

Ce chapitre est consacré purement à la modélisation du système à étudier. Nous avons commencé par la modélisation de la machine synchrone par utilisation la transformation de *park* qui permet le passage de la représentation triphasée au celle biphasée, ensuite on a présenté utilisation de la machine synchrone en alternateur. Finalement, une modélisation du redresseur et de l'onduleur ainsi que le transformateur.

Il est utile de mentionner que la modélisation de notre système nous l'avons fait pour la simulation numérique sous l'environnement *Mathlab/Simulink* (chapitre III).

CHAPITRE III

***Simulation, Réalisation
Et Interprétation des
Résultats***

III-1 Introduction :

Le principe est semblable à celui utilisé pour la simulation analogique mais tout ce qui était réalisé avec du "matériel" sera remplacé par un logiciel exécuté par un ordinateur. Le réglage des paramètres effectué à l'aide du clavier est beaucoup plus aisé que sur les simulateurs analogiques, une liaison "physique" avec l'extérieur est possible grâce aux cartes de conversion analogique numérique d'entrée et numérique de sortie.

Donc les performances des logiciels par exemple *Matlab*, *Matrix*, *Syssi*,..., nous permet de simuler les modèles non linéaires, ces logiciels permet aussi de :

- Tracer le schéma fonctionnel sur l'écran de l'ordinateur.
- Entrer en mémoire les valeurs des coefficients des fonctions de transfert.
- Simuler les entrées.
- Enregistrer les grandeurs significatives.
- Tracer les réponses temporelles ou fréquentielles à l'écran puis les sortir sur "papier" à l'aide d'une
- Imprimante en mode graphique.

Cette partie de notre travail est partagé en deux tache comme suite :

- Simulation numérique sous l'environnement *MATLAB/SIMULINK*.
- Réalisation pratique du système à étudier.

III.2. Présentation de l'environnement *MATLAB/SIMULINK*™ :

MATLAB est un logiciel destiné principalement au calcul scientifique, à la modélisation et à la simulation. Le noyau de calcul est associé à l'environnement *SIMULINK*, permettant une modélisation basée sur *des schémas-blocs*.

Des bibliothèques spécialisées sont disponibles (*les "Toolboxes"*) pour la plupart des domaines scientifiques nécessitant des moyens de calcul importants : automatique, traitement de signal, mathématiques appliquées, télécommunications, etc.....Des modules temps réel, développés autour des produits *dSPACE* (*Real Time Interface*, *TRACE*, *COCKPIT*) sont également proposés et rendent l'environnement de travail.

Particulièrement attractif : l'utilisateur dispose en effet de tous les outils nécessaires à l'élaboration d'une application sur procédé réel, de la simulation à la supervision.

III.2.1. *Matlab*:

Un système interactif et convivial de calcul numérique et de visualisation graphique, destiné aux ingénieurs et scientifiques. Il possède un langage de programmation à la fois puissant et simple d'utilisation. Il permet d'exprimer les problèmes et solutions d'une façon aisée, contrairement à d'autres langages de programmation. Il intègre des fonctions d'analyse numérique, de calcul matriciel, de traitement de signal, de visualisation graphique 2D et 3D, etc..., il peut être utilisé de façon interactive ou en mode programmation. En mode interactif,

L'utilisateur à

la possibilité de réaliser rapidement des calculs sophistiqués et d'en présenter les résultats sous forme numérique ou graphique. En mode programmation, il est possible d'écrire des scripts (programmes) comme avec d'autres langages l'utilisateur peut aussi créer ses propres fonctions pouvant être appelées de façon interactive ou par des scripts. Ces fournissent à *MATLAB* un atout inégalable : son extensibilité. Ainsi, l'environnement *MATLAB* peut facilement étendu. Dans *MATLAB*, l'élément de base est la matrice. L'utilisateur ne s'occupe pas des allocations de mémoire ou de redimensionnement comme dans les langages classiques. Les problèmes numériques peuvent être résolus en un temps record, qui ne représente qu'une infime du temps à passer avec d'autres langages comme le Basic, C, C++ ou le fortran. *MATLAB* s'est imposé dans les milieux universitaire et industriel comme un outil puissant de modélisation, de simulation et de visualisation de problèmes numériques. Dans le monde universitaire *MATLAB* est utilisé pour l'enseignement de l'algèbre linéaire, traitement du signal, l'automatique, etc., ainsi que dans la recherche scientifique.

Dans le domaine industriel, il est utilisé pour la résolution et la simulation de problèmes d'ingénierie et de prototypage. *MATLAB* est une abréviation de *MATrix LA Boratore*. écrit à l'origine, en Fortran, par *Cleve Moler*, *MATLAB* était destiné à faciliter l'accès au logiciel matriciel développé dans les projets *LINPACK* et *EISPACK*.

III.2.2.Simulink:

(*SIMULINK*) est un programme pour la simulation des systèmes dynamique linéaires et non linéaires ; une (*MATLAB*), dans laquelle la définition des modèles se fait par schémas blocs (diagramme structurel). Le diagramme structurel permet la représentation graphique d'un système d'équations linéaires et non linéaires. Il met en évidence la structure du système et permet de visualiser les interactions entre les différentes grandeurs internes et externes. On distingue alors particulièrement bien les contre- réactions, les couplages réciproques, les non-linéarités, etc. les éléments qui composent le diagramme structurel représentent des opérations mathématiques, à savoir addition, soustraction, multiplication avec un coefficient, intégration et différentiation, ainsi que la multiplication et la division de deux variables et la fonction non linéaire d'une variable. *SIMULINK* possède une interface outils nécessaires à l'élaboration d'une application sur procédé réel, de la simulation à la supervision graphique. pour visualiser les résultats sous forme de graphiques ou de valeurs numériques en cours de simulation. Les paramètres régissant le fonctionnement des systèmes peuvent être modifiés en ligne, c'est-à-dire en cours de simulation, et l'on peut observer leur effet immédiatement. *SIMULINK* est bâti autour d'une bibliothèque de blocs (bibliothèques) classés par catégories. Les principales bibliothèques sont montrées dans le tableau.

III.3. Simulation sous l'environnement matlab/Simulink:

Cette partie de notre travail a pour but de tester la performance et la robustesse du système avant la réalisation pratique.

III.3.1. Description du système numérique:

La figure ci-dessous représente le modèle générique de notre système de simulation. Le fonctionnement est en boucle ouverte.

Le système à étudier est composé de :

- Un moteur diesel de 70 KW.
- Un alternateur synchrone de 480V, 300KVA.
- Un redresseur triphasé à diode (*non commandé*).
- Une batterie de 216,94 V avec une capacité de 1,3 Ah
- Un onduleur monophasé à MLI.
- Une charge de 315 KV.
- Transformateur 250MVA / phase (735 / 315 kV)

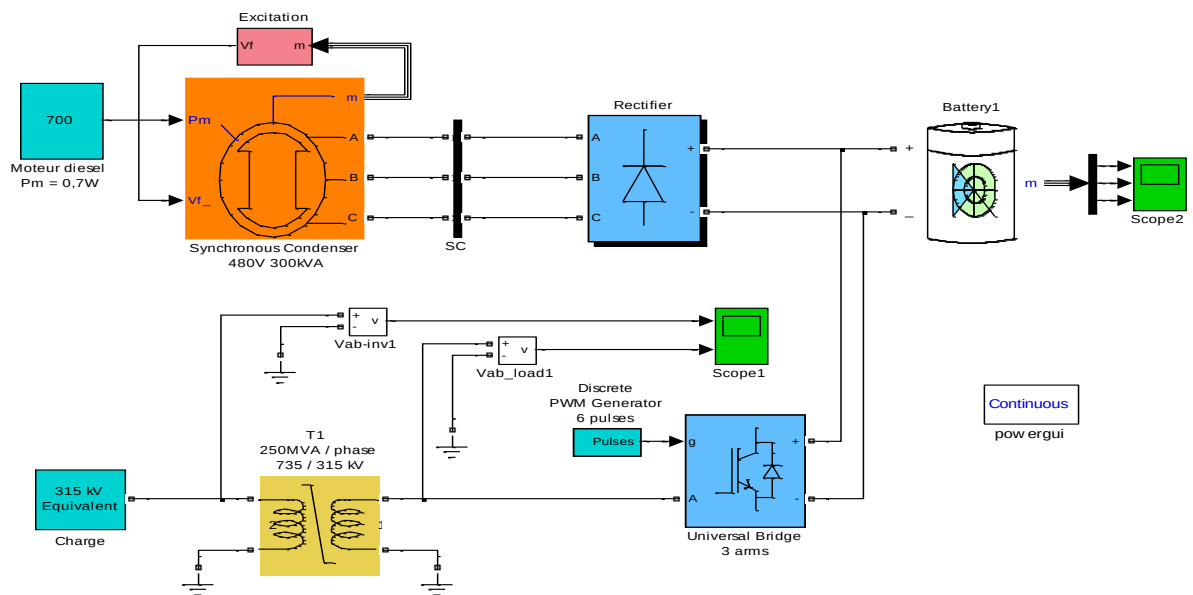


Figure (III.1) : Schéma bloc du système.

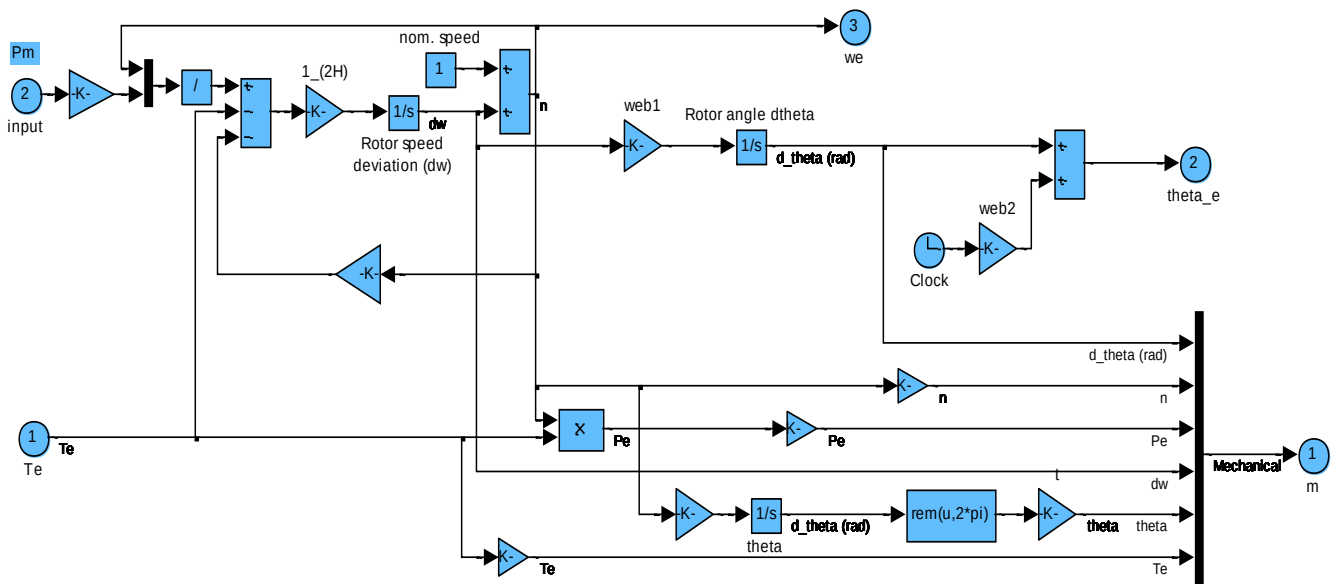


Figure (III.2) : Schéma bloc du Générateur Synchrone (Modèle Mécanique)

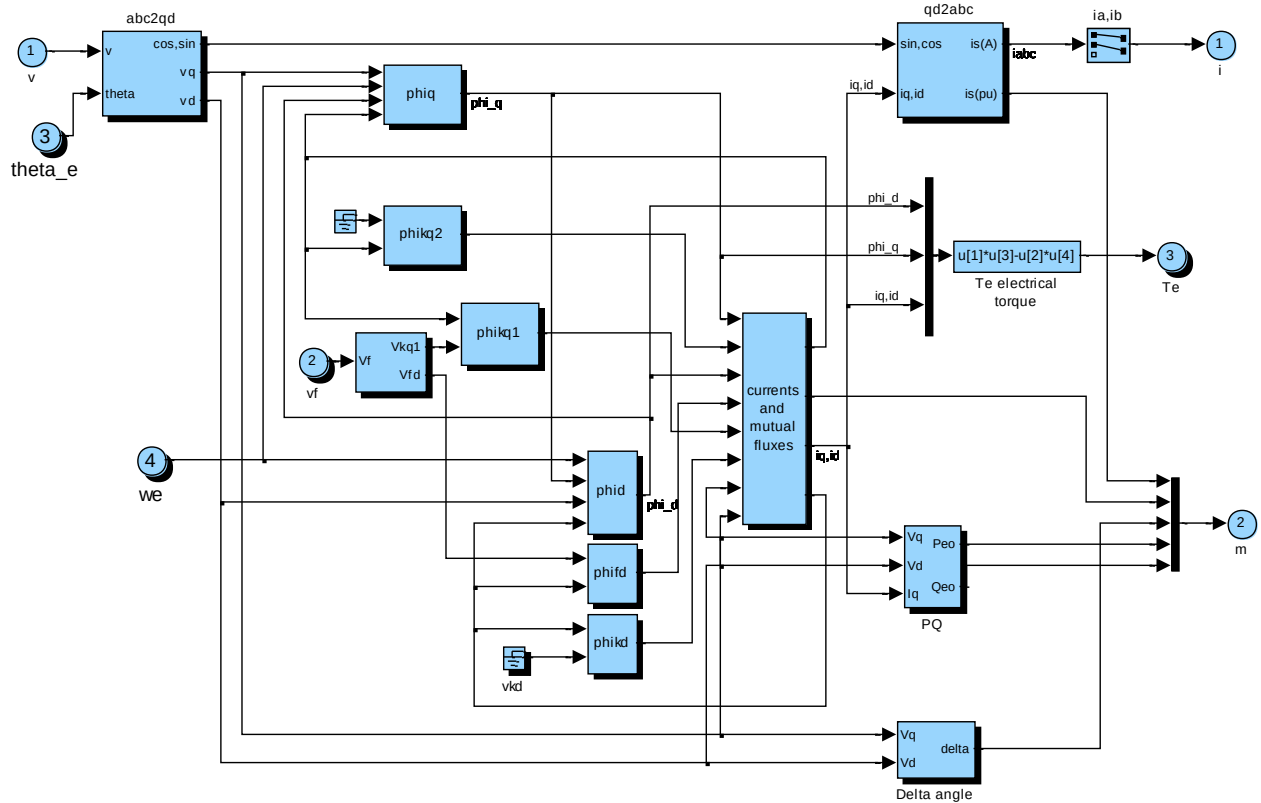


Figure (III.3) : Schéma bloc du Générateur Synchrone (Modèle Electrique)

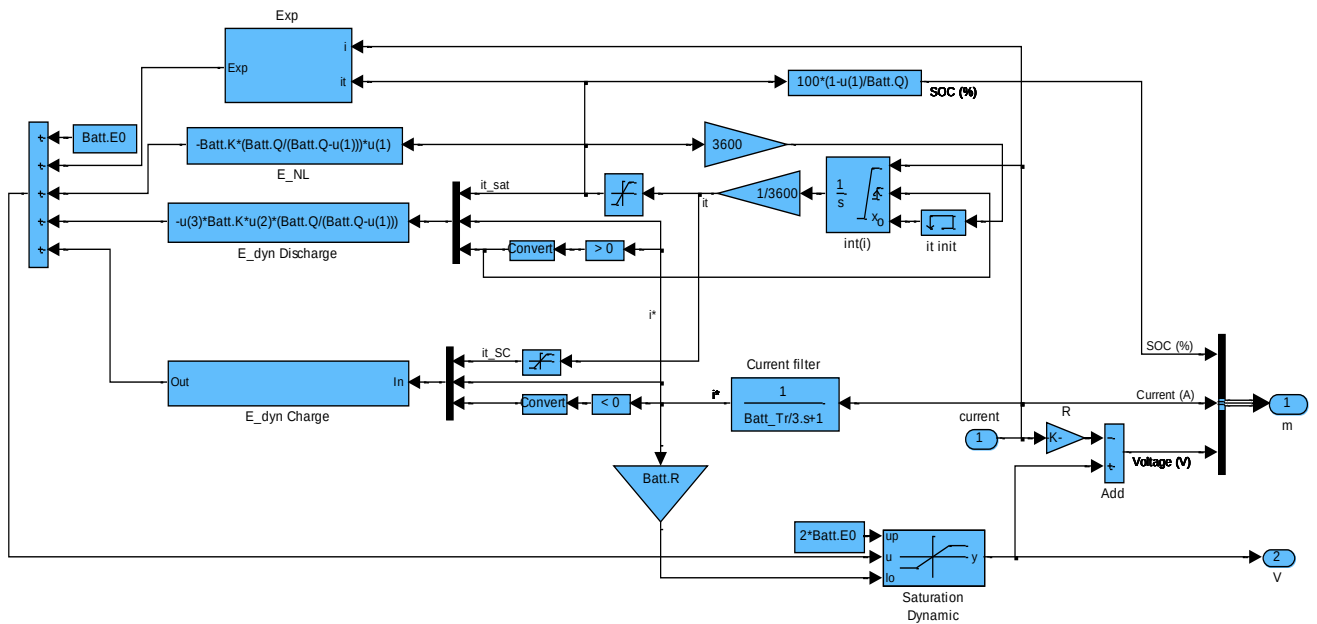


Figure (III.4) : Schéma bloc de la batterie (Modèle Electrique)

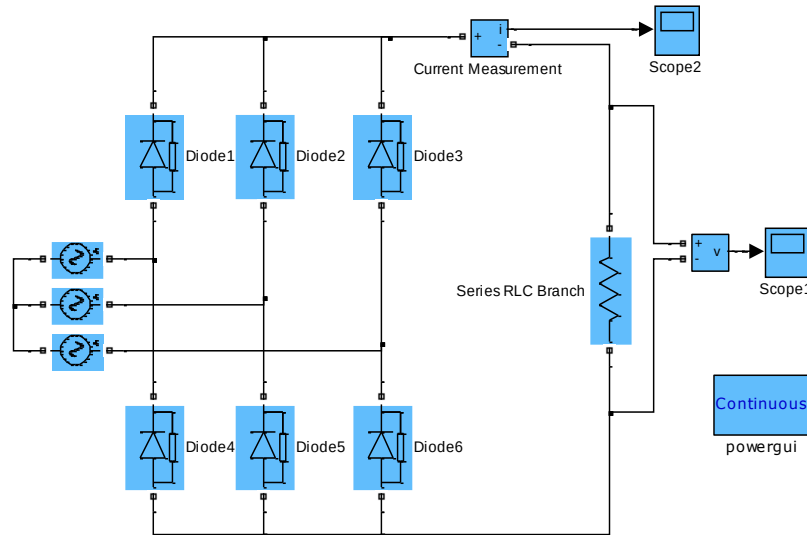


Figure (III.5) : Schéma bloc d'un redresseur triphasé à diode (non commandé)

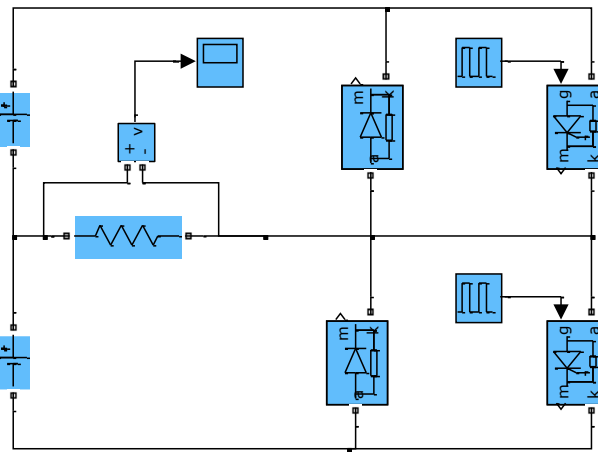


Figure (III.6) : Schéma bloc d'un onduleur monophasé

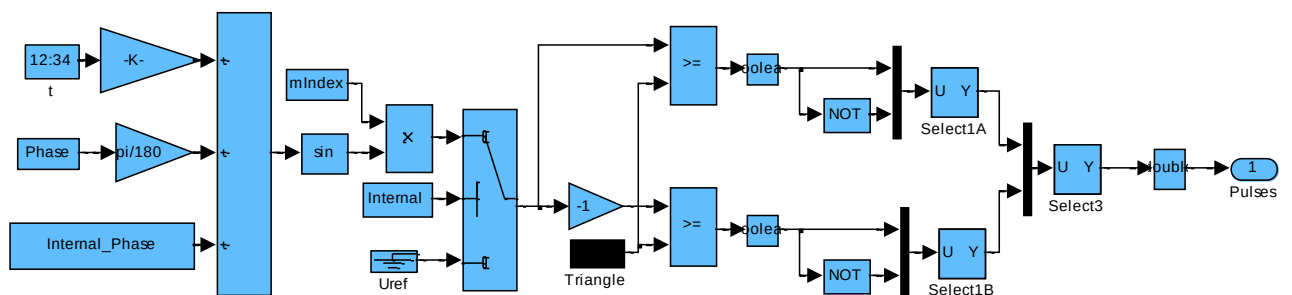


Figure (III.7) : Schéma bloc de la commande MLI de l'onduleur monophasé

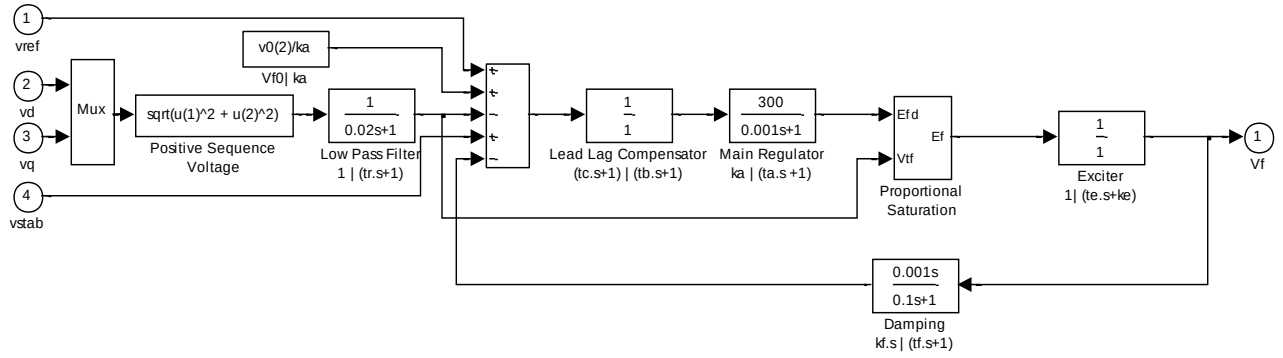


Figure (III.8) : Schéma bloc de l'excitation du l'alternateur synchrone.

III.3.2. Les résultats de simulation :

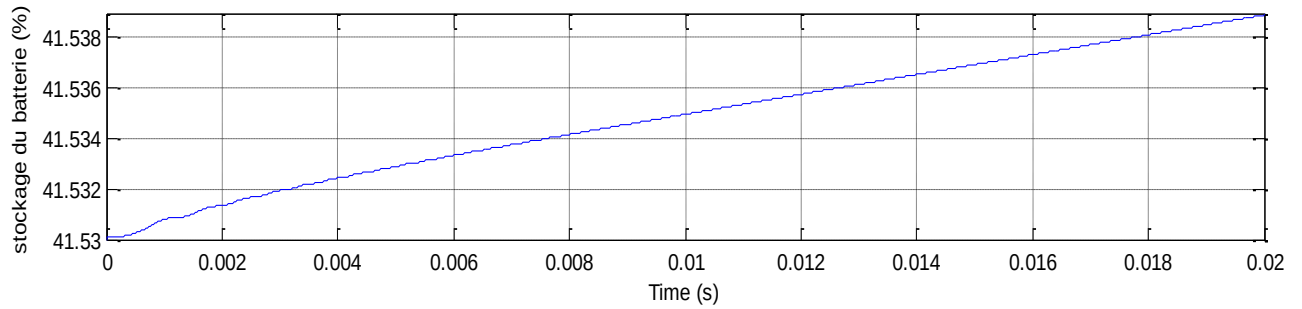


Figure (III.9) : Allure du stockage de la batterie (%).

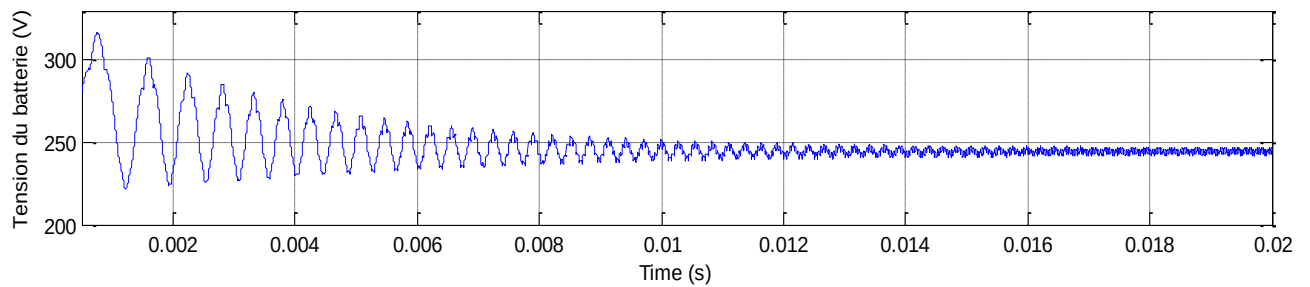


Figure (III.10) : La tension aux borne de la batterie (V).

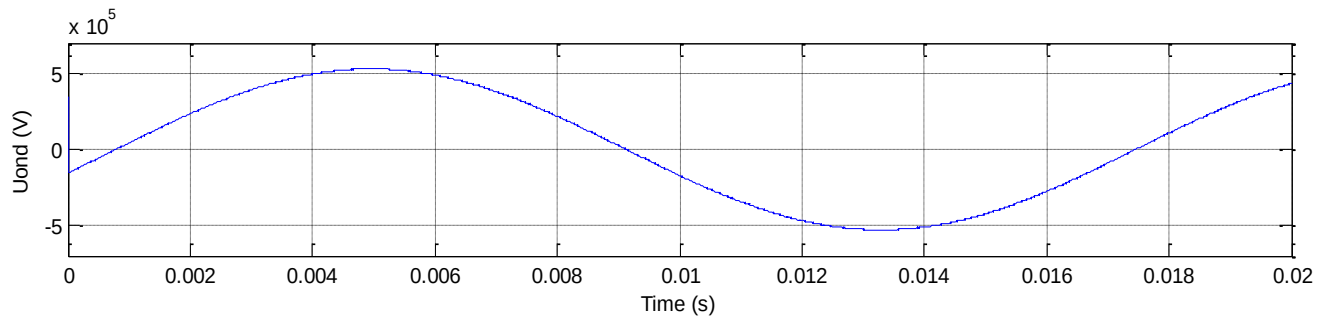


Figure (III.11) : La tension à la sortie de l'onduleur (V) .

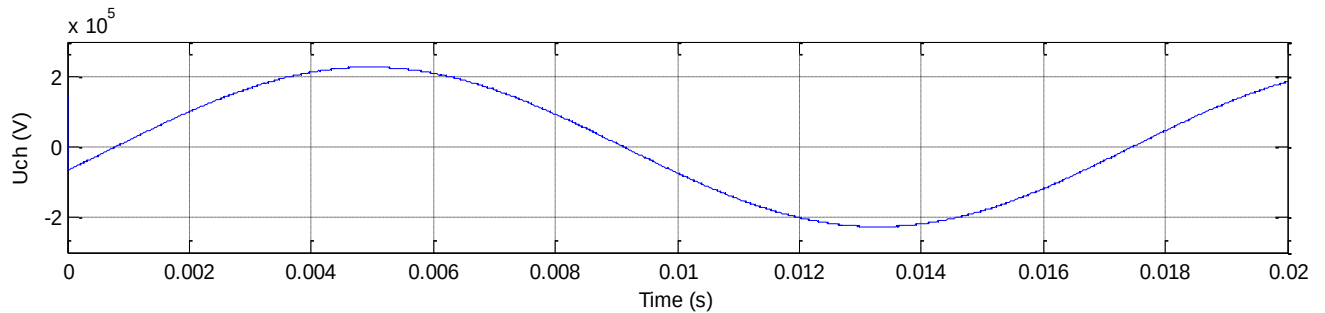


Figure (III.12) : La tension de la charge (V) .

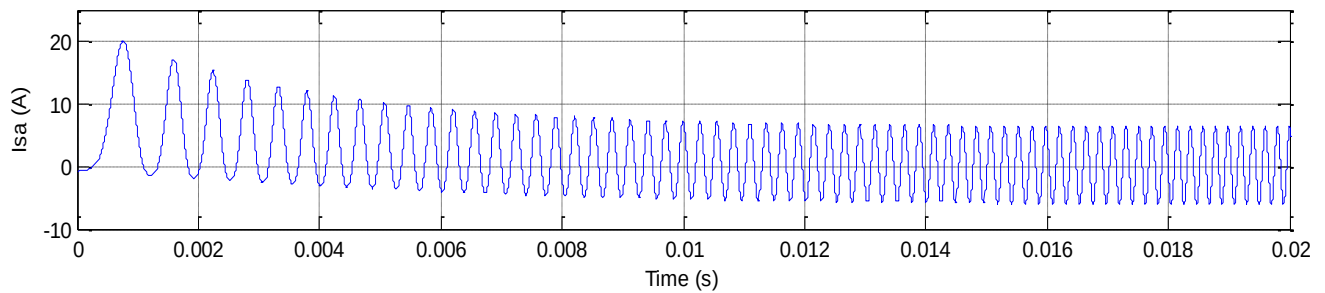


Figure (III.13) : Le courant généré par l'alternateur (A) .

III.3.3. Interprétation des résultats de simulation :

Dans cette partie nous avons simulé quelques paramètres fondamentaux pour illustrer la performance de notre système. Les résultats des simulations numériques montrent que :

- Le rythme du stockage de la batterie est de 0,4 % par seconde.
- L'allure de la tension de la batterie se stabilise après un régime transitoire de 0,014 s.
- Le signal de la tension à la sortie de l'onduleur est sinusoïdale, ce qui montre le bon fonctionnement de la commande de l'onduleur (MLI).
- La tension aux bornes de la charge est assurée avec une bonne qualité du signal.
- Le courant généré par l'alternateur se stabilise après une augmentation au démarrage de la machine.

Donc on peut dire que notre système est performant, et prêt à la réalisation pratique.

III.4.

Réalisation pratique du système:**III.4.1. Description du système pratique:**

Figure (III.14) illustre la description de notre système, il est composé de :

- Deux moteurs à aimants.
- Un alternateur synchrone de **14V, 120 A**.
- Un redresseur triphasé à diode (*non commandé*).
- Une batterie de 12 V avec une capacité de 95Ah
- Un onduleur monophasé de (12V DC / 230V AC) avec une puissance maximal de 1 Kw.
- Une charge de [0 - 1000 W].
- Double transformateur le premier est de (14/ 300V) et le second (300/ 230V) .

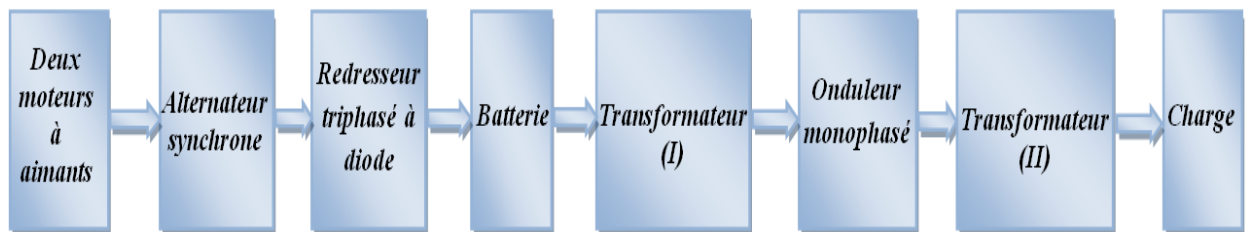


Figure (III.14) : Représentation et description du système.

Cette partie de notre travail est basé sur les mêmes notions que celle de la simulation par *matlab/simulink*, la différence ici c'est de changé le moteur à combustion interne (diesel) par deux autres à aimant. Ce dernier à été confectionné comme la montre la Figure (III.15).

Nous avons fixé des aimants aux bout des pitons (Figure (III.15)) des deux moteurs à trois piston pour chacun. Le système fonctionne par la force de la répulsion magnétique entre les aimants, ce qui provoque la rotation des vilebrequins.

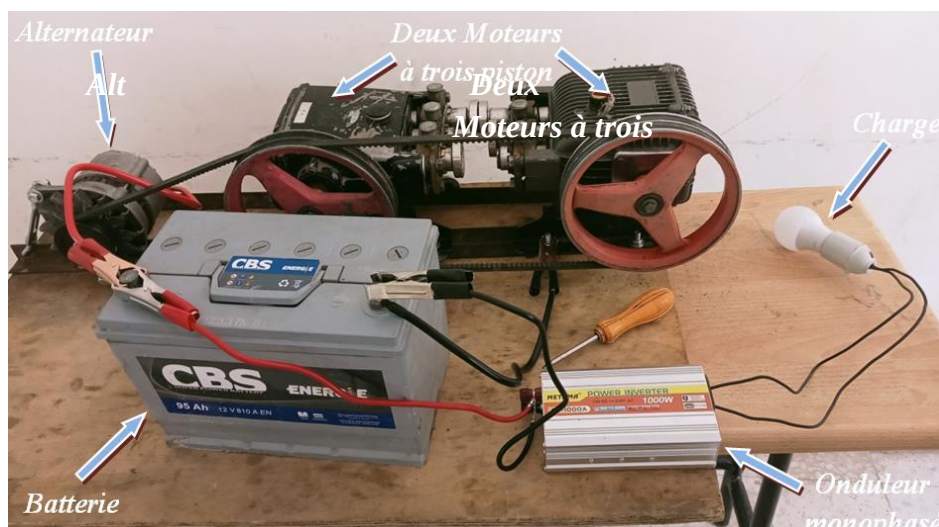


Figure (III.15) : Image représente l'installation du système.

Nous avons fixé des aimants aux bout des pitons (Figure (III.15) des deux moteurs à trois piston pour chacun. Le système fonctionne par la force de la répulsion magnétique entre les aimants, ce qui provoque la rotation des vilebrequins.

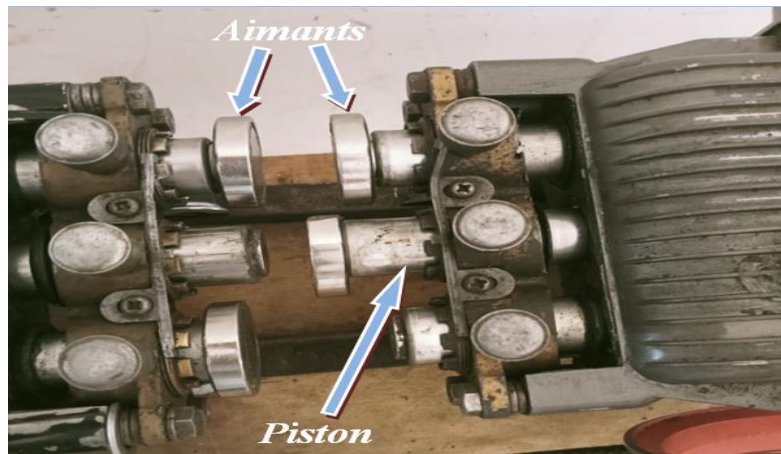


Figure (III.16) : Image représente le montage Piston-Aimant .

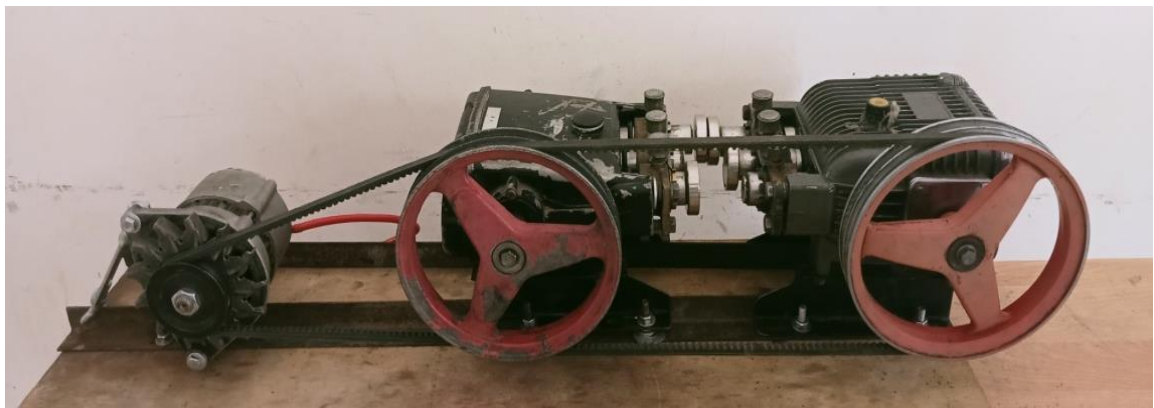


Figure (III.17) : Image représente le couplage Moteurs-Alternateur.



Figure (III.18) : Image représente l'Alternateur.



Figure (III.19) : Images représente l'Onduleur monophasé et la Batterie de stockage.



Figure (III.20) : Images représente la mise en marche du système.

III.4.2. Discussion:

Notre système présente une nouvelle méthode pour la production de l'énergie électrique propre, l'utilisations du notre système est divers (véhicule électrique, train de haute vitesse (TGV), les motopompes d'irrigation,...etc.). on peut dire aussi que ce type de production d'énergie permet de nous donne une autre solution pour les compagne isolé, il a présente plusieurs avantage technique, économique et écologique.

Reste de dire qu'il faux bien choisi le type et les caractéristiques du l'aimant, pour avoir le couple mécanique suffisent.

III.5.Conclusion:

Ce chapitre est consacré à la simulation numérique et la réalisation pratique d'un système de production de l'énergie électrique, ce système est basé sur la force de la répulsion magnétique entre les aimants pour faire tourné deux vilebrequins. Donc notre travail est partagé en deux tache comme suite :

- Simulation numérique sous l'environnement *MATLAB/SIMULINK*.
- Réalisation pratique du système à étudié.

D'abord nous avons présenté les avantages de la simulation numérique sous l'environnement Mathlab/Simulink , puis la description du système de la simulation numérique. Touts les résultats sont simulé et interprété.

En suite nous avons montré une description pratique de notre système, et finalement une discussion sur les résultats obtenus.

Conclusion

Générale

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale :

Aujourd'hui, notre production d'électricité ne cesse d'augmenter afin de répondre à une demande toujours croissante. L'énergie électrique ne se trouvant pas à l'état naturel, nous transformons une ressource disponible sur terre en électricité. En devenant dépendant à l'électricité, nous sommes également devenu dépendant aux matières premières permettant sa production, à l'image de la Chine basant sa production d'électricité sur le charbon. L'un des enjeux des prochaines décennies sera donc de multiplier l'origine des ressources énergétiques afin de diminuer notre dépendance et préserver notre planète pour les générations futures.

Notre projet est basé sur l'application d'une nouvelle technique de production de l'énergie électrique, Il s'agit d'un système utilise la force de la répulsion magnétique entre les aimants pour faire tourner des vilebrequins suivis par la rotation d'un alternateur associé.

Pour se faire nous avons fixé des aimants aux bout des pitons des deux moteurs à trois pitons pour chacun, l'harmonie est assurée mécaniquement à 120° par la structure des vilebrequins.

L'utilisations du système proposé est divers (véhicule électrique, train de haute vitesse (TGV), les motopompes d'irrigation,...etc.). on peut dire aussi que ce type de production d'énergie permet de nous donne une autre solution pour les compagne isolé, il a présenté plusieurs avantages technique, économique et écologique.

Comme perspective on peut dire que cette nouvelle technique est encore en développement sur la base des éléments suivants :

- ✓ L'utilisation des aimants plus puissants pour augmenter le couple mécanique.
- ✓ L'application des mécanismes multi piston pour que la rotation être plus harmonié.

La réalisation d'un système en boucle fermée pour améliorer les performances électromécaniques.

REFERENCES

Références :

[1] : Jean Chatelain un livre (machines électriques) le traite d'électricité est une publication des presses polytechnique romandes, fondation scientifique dont le but est la diffusion des travaux de la polytechnique fédérale de Lausanne. Le catalogue de ces publications peut être obtenu aux presses polytechniques romandes, CH-1015 Lausanne deuxième Edition revue et corrigé ISBN 2-BB074-050-9 ©1983,1989 presses polytechniques romandes CH-1015 Lausanne Imprime en Suisse par Corbaz S.A. Montreux.

[2] : <https://energieplus-liste.be/techniques/ascenseurs7/moteur-asynchrone/>

[3] : Hans Ruedi Buehler (convertisseurs statiques) si vous désirez être au courant des publications de cet ouvrage, envoyez vos nom et adresse aux presses polytechniques et universitaires romandes, 2015 Lausanne, Suisse qui vous enverront leur catalogue général. Première édition ISBN 2-88074-230-7 ©1991, presses polytechniques et universitaires romandes tous droits réservés. Reproduction, même partielle, interdite sous quelque forme ou sur quelque support que ce soit sans l'accord écrit de l'éditeur. Imprime en France.

[4] G. Séguier : * Electronique de puissance *. Dunod, Paris [1999]

[5] LAKHAL AMEUR M 2021, ETUDE ET MODELISATION DE LA MACHINE SYNCHRONNE MEMOIRE DE LICENCE, Université Badji Mokhtar –ANNABA.

[6] Belambri Mohand Idir. M, 2012, Modélisation et Commande des Convertisseurs AC-DC Mémoire Master, UNIVERSITE LARBI BEN M, HIDI OUM EL BOUAGHI

[7] HAMMOUCHE Karima ET CHERFA Marouane. M 2020, Modélisation magnétothermique du Transformateur monophasé Mémoire Master, Université Abderrahmane Mira de Béjaia.

[8]: Mr BADRAOUI MOURAD et M^{lle} BEREKSI REGUIG MERIEM. M, 2016, étude et modélisation de moteur synchrone simple et double étoile avec application de la commande backstepping à la machine synchrone Mémoire Master Académique Université Abou Bekr Belcaïd-Tlemcen

[9]: B.YACOEBI, Modélisation des machines électriques, Complément de cours, Faculté de Technologie, Tlemcen, 2010.

[10]: Tian.LIU, "Manoeuvre contrôlée des transformateurs de puissance avec flux résiduel" Ecole Doctorale «Sciences et Technologies de L' Information des Telecommunications et des Systèmes», 7 Juillet 2011.

[11]: M.P. Kazmierkowski, R. Krishnan, F. Blaabjerg, Control in Power Electronics: *Selected Problems*. Academic Press, London, UK, 2002.

[12]: V.COSTAN, "Convertisseurs Parallèles Entrelacés: Etude des Pertes Fer dans les Transformateurs Inter-celleles", Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, octobre 2007.

[13]: <https://docplayer.fr/48783160-Universite-de-mascara-polycopie-du-cours-machines-electriques-a-courant-alternatif.html>

[14]: https://www.researchgate.net/profile/AbdelfettahKerboua/publication/280492899_Electrotechnique_II_MACHINES_ELECTRIQUES_A_COURANT_ALTERNATIF_Machines_Synchrone_et_Asynchrone/links/5768308508ae8ec97a424225/Electrotechnique-II-MACHINES-ELECTRIQUES-A-COURANT-ALTERNATIF-Machines-Synchrone-et-Asynchrone.pdf

REFERENCES

- [15]: Henri FOCH « les convertisseurs statiques » Professeur à l'Institut National Polytechnique de Toulouse. Responsable de l'Équipe de Recherche Convertisseurs Statiques.
- [16]: Mr HAMMACHI Oualid et CHAABANA Salah, PROMOTION 2017/2018, "ETUDE EXPERIMENTALE DE QUELQUES VARIATEURS DE VITESSE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE" MEMOIRE MASTER 2, Université Abderrahmane Mira de Bejaia
- [17]: <http://dspace.univmsila.dz:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/15820/727.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [18]: DAHMANE Ayoub et BOUGUERRA Khalil, Année universitaire : 2018 / 2019, "Etude et Commande d'un Convertisseur Statique AC/DC à Prélèvement Sinusoïdal" Master Académique, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA
- [19]: https://www.ummtto.dz/dspace/bitstream/handle/ummtto/8668/SaidiAghiles_RachediT.pdf?sequence=1
- [20]: Aghiles Saidi et Tahar Rachedi, le 26 /09/2016," Contrôle direct de puissance d'un redresseur triphasé à MLI", MASTER PROFESSIONNEL , UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU
- [21] : B.Nicolas, «Contribution à la commande des convertisseurs statique», thèse de Doctorat, institut National Polytechnique de Toulouse, septembre 1996.
- [22]: S.Nia Ahmed, «Contribution à l'étude théorique et expérimentale d'un filtre actif parallèle à commande analogique et numérique temps réel» Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), Lorraine, 1996.
- [23]: B.Imane ; S.Fadhila, « Contrôle direct de puissance appliqué au filtre actif parallèle» Mastère Académique, Juin 2014.