

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب  
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib  
Faculté SCIENCES ET TECHNOLOGIE  
Département electrothechnique



Projet de Fin d'Etudes  
**Dans le cadre de l'arrêté ministériel 1275**  
**« Un diplôme, une startup / micro entreprise ou brevet d'invention »**  
Pour l'obtention du diplôme de Master  
Filière : electrothechnique  
Spécialité : commande électrique

## Convertisseur statique réversible

Présenté Par :

1/ GRAOUI SIDAHMED

M2 electrothechnique

Devant le jury composé de :

Dr. Benazza Baghdadadi

Dr. Attou Amine

Dr. Flitti Mohammed

MCA U.Ain Témouchent

MCB U.Ain Témouchent

MCB U.Ain Témouchent

Président

Examinateur

Encadrant (e)

*Année Universitaire 2022/2023*



---

# *TABLE DES MATIÈRES*

---



---

## *Table des matières*

---

<b>LISTE DES ABREVIATIONS</b>	<b>i</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b>	<b>ii</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b>	<b>iv</b>
<b>INTRODUCTION GENERAL</b>	<b>1</b>
<b>I. État de l'art</b>	
<b>I.1.INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
<b>I.2.DEFINITION</b>	<b>1</b>
<b>I.3.LES DIFFERENTES FORMES DES ENERGIES</b>	<b>1</b>
<b>I.4.TYPES D'ENERGIES</b>	<b>1</b>
<b>I.5.LES ENERGIES RENOUVELABLES DANS L'ALGERIE</b>	<b>7</b>
<b>I.6.LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS DE L'ENERGIE RENOUVELABLE</b>	<b>8</b>
<b>I.7.L'ENERGIE A L'HORIZON 2030</b>	<b>9</b>
<b>I.8 SOLUTION</b>	<b>9</b>
<b>I.9.CONCLUSION</b>	<b>10</b>
<b>II. Modélisation d'un convertisseur statique réversible</b>	
<b>II.1 INTRODUCTION</b>	<b>11</b>
<b>II.2 STRUCTURE DE BASE D'UN CONVERTISSEUR DC/AC :</b>	<b>11</b>
<b>II.2.1 Convertisseur à niveaux multiples -topologie "calée par diode "</b>	<b>11</b>
<b>III. Commande et modélisation d'un compensateur d'énergie réactive</b>	
<b>III.1 INTRODUCTION</b>	<b>16</b>
<b>III.2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT</b>	<b>16</b>
<b>III.2.1. CAS OU LE COMPENSATEUR INJECTE DE LA PUISSANCE REACTIVE</b>	<b>17</b>
<b>III.2.2. CAS OU LE COMPENSATEUR ABSORBE DE LA PUISSANCE REACTIVE</b>	<b>18</b>
<b>III.3. MODELISATION DES TENSIONS TRIPHASEE</b>	<b>18</b>
<b>III.4. COMMANDE DU COMPENSATEUR</b>	<b>20</b>
<b>III.4.1. MODELISATION DE LA BOUCLE INTERNE</b>	<b>21</b>
<b>III.4.2. MODELISATION DE LA BOUCLE EXTERNE</b>	<b>21</b>
<b>III.4.3. CALCUL DE LA PUISSANCE ACTIVE</b>	<b>22</b>
<b>III.4.4. CALCUL DE LA PUISSANCE REACTIVE</b>	<b>23</b>
<b>III.4.5. REGULATION ET CONTROLE DU STATCOM</b>	<b>23</b>
<b>III.4.6 ÉTUDE DES REGULATEURS</b>	<b>26</b>
<b>III.5. SIMULATION</b>	<b>30</b>
<b>III.6. CONCLUSION</b>	<b>32</b>
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	<b>33</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>34</b>
<b>WEBOGRAPHIE</b>	<b>36</b>



---

*LISTE DES FIGURES*

---



---

## *Liste des figures*

---

<b>Figure I.1</b>	Principe de centrale nucléaire	4
<b>Figure I.2</b>	Les énergies renouvelables	5
<b>Figure I.3</b>	Conversion de l'énergie cinétique du vent	6
<b>Figure I.4</b>	Pénétration des énergies renouvelables dans la production nationale en TWh	8
<b>Figure II.1</b>	Phase du convertisseur à deux niveaux	12
<b>Figure II.2</b>	Représente la tension à la sortie du convertisseur avec le courant qui est imposé par une charge quelconque.	12
<b>Figure II.3</b>	Formes d'ondes de la tension et du courant à la sortie d'un convertisseur (a) fonctionnement en mode redresseur (b) en mode onduleur (c) en mode capacitif (d) en mode inductif.	13
<b>Figure II.4</b>	Un bras de convertisseur à trois niveaux de la topologie « calée par diodes ».	13
<b>Figure II.5</b>	Forme d'onde de la tension de phase à trois niveaux	13
<b>Figure II.6</b>	Distribution du courant dans un convertisseur à trois niveaux (a) courant capacitif (b) courant inductif.	14
<b>Figure III.1</b>	Circuit équivalent d'un STATCOM.	16
<b>Figure III.2</b>	Le circuit équivalent en monophasé et le diagramme vectoriel de phase du compensateur	17
<b>Figure III.3</b>	Diagramme vectoriel de phase du compensateur ( $\varphi=+\pi/2$ )	17
<b>Figure.III.4</b>	Diagramme vectoriel de phase du compensateur ( $\varphi=-\pi/2$ )	18
<b>Figure III.5</b>	Passage du repère triphasé à d'autre diphasé.	19
<b>Figure III.6</b>	Schémas bloc de principe de la régulation du compensateur.	20
<b>Figure III.7</b>	Modélisation de la boucle interne.	21
<b>Figure III.8</b>	Modélisation de la boucle externe.	21
<b>Figure III.9</b>	Identification des courants de référence dans le repère dq.	24
<b>Figure III.10</b>	Régulation du courant réseau avec compensation de la tension réseau.	25
<b>Figure III.11</b>	Régulation du courant réseau avec découplage approché.	25
<b>Figure III.12</b>	Régulation de la boucle fermée avec correcteur (IP).	28
<b>Figure III.13</b>	Régulation de la boucle fermée avec correcteur (IP).	29
<b>Figure III.14</b>	Schéma bloc du compensateur.	31
<b>Figure III.15</b>	Réponses dynamiques d'un convertisseur type NPC à Trois niveaux utilisant la technique MLI sinusoïdale (avec un taux de modulation $m=25$ ).	32

# *RESUME*

"Two algorithms for reactive power compensation are presented. Both are based on controlling the voltage at the inverter output and fundamental frequency control. Both algorithms demonstrate that reactive power compensation is achieved by controlling the active power exchange between the grid and the DC side of the inverter. They are validated through simulation, using Simulink. Additionally, a prototype of a five-level converter is developed and applied as a static Var compensator. Practical results along with simulation results are presented."

# *LISTE DES SYMBOLES*

FACTS	Flexible alternatif courant transmission systèmes
TSR	Thyristor Switched Reactor
TSC	Thyristor Switched Capacitor
SVC	Static Var Compensator
STATCOM	Static Synchronous Compensator
VSC	Voltage Source Converter
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor
SSSC	Statcom Switch Série Capacitor
UPFC	Unified Power Flow Controller
$P_g$	Puissance active fournie par la source
QG	Puissance réactive fournie par la source
PL	Puissance active demandée par la charge
$Q_{svc}$	Puissance réactive
R	Résistance de la ligne de transport
X	réactance de la ligne de transport
L	L'inductance
$V_c$	Tension capacitive
C	Condensateur
TCSS	Thyristor Controlled/Switch Series
$Q_c$	Puissance réactive négative
QL	Puissance réactive positive
$Q_{ind}$	Puissance inductive
$Q_{cap}$	Puissance capacitive
TCR	Thyristor Controlled Reactor
TCSR	Thyristor Control Breaking Resistor
ASVC	Advanced Static Var Compensator



---

*INTRODUCTION GENERALE*

---





Les dispositifs électroniques de conversion d'énergie sont essentiels dans de nombreuses applications modernes, allant de la fourniture d'énergie pour les appareils électroniques personnels à la gestion de l'énergie dans les systèmes d'alimentation à grande échelle. Au coeur de ces systèmes, on trouve souvent un convertisseur de puissance. Les convertisseurs réversibles, en particulier, sont de plus en plus utilisés en raison de leur capacité à gérer efficacement l'énergie dans les deux sens.

Les convertisseurs réversibles sont des dispositifs électroniques qui peuvent convertir l'énergie électrique d'une forme à une autre et vice versa. Ils sont capables de convertir l'énergie entre les formes DC (courant continu) et AC (courant alternatif), ainsi que de changer les niveaux de tension. Les applications typiques de ces convertisseurs incluent les systèmes de stockage d'énergie, les alimentations sans interruption (ASI), les systèmes de véhicules électriques et les systèmes de production d'énergie renouvelable.

La réversibilité de ces convertisseurs offre de nombreux avantages. Par exemple, dans les systèmes d'énergie renouvelable, un convertisseur réversible peut permettre à un système de stockage d'énergie, comme une batterie, de charger à partir de la source d'énergie renouvelable et de décharger vers le réseau électrique. De même, dans un véhicule électrique, un convertisseur réversible peut permettre au véhicule de charger à partir du réseau électrique et de fournir de l'énergie au réseau lorsqu'il n'est pas utilisé.

Cependant, malgré leurs nombreux avantages, les convertisseurs réversibles présentent également des défis. Ils nécessitent des commandes complexes pour gérer les flux d'énergie dans les deux sens, et ils doivent être conçus pour gérer des niveaux de puissance élevés tout en maintenant une haute efficacité. De plus, ils doivent être capables de travailler de manière fiable dans une large gamme de conditions d'exploitation.

Notre mémoire est divisé en trois chapitres. Dans le premier chapitre une vue globale des énergies et dilemmes énergétique, Le deuxième fait l'objet de la présentation des généralités sur les systèmes de L'électronique de puissance, en troisième chapitre un algorithme de commande pour la compensation de la Puissance réactive est proposé est validés par le moyen de simulation sur logiciel MATLAB



---

*CHAPITRE 1: ETAT DE L'ART*

---



## I.1 Introduction :

L'énergie joue un rôle essentiel à la fois dans les événements quotidiens et dans les phénomènes scientifiques. Vous pouvez sans aucun doute nommer de nombreuses formes d'énergie, de celle fournie par nos aliments à l'énergie que nous utilisons pour faire fonctionner nos voitures, en passant par la lumière du soleil qui nous réchauffe sur la plage. Vous pouvez également citer des exemples de ce que les gens appellent de l'énergie mais qui peut ne pas être scientifique, comme une personne ayant une personnalité énergétique. Non seulement l'énergie a de nombreuses formes intéressantes, mais elle est impliquée dans presque tous les phénomènes et est l'un des concepts les plus importants de la physique. Ce qui la rend encore plus importante, c'est que la quantité totale d'énergie dans l'univers est constante. L'énergie peut changer de forme, mais elle ne peut pas apparaître de nulle part ou disparaître sans laisser de trace. Ainsi, l'énergie est l'une des poignées de grandeurs physiques que nous disons être conservées.

## I.2 Définition :

L'énergie représente la puissance qui anime tous les phénomènes naturels tels que la croissance des plantes, le vent, les courants des rivières, les vagues et la chute des objets. En physique, elle est définie comme la capacité d'un système à accomplir un travail. Elle se présente sous diverses formes (thermique, cinétique, électrique, etc.) et l'une de ses caractéristiques majeures est sa faculté de conversion d'une forme à une autre. [1]

## I.3 Les différentes formes des énergies :[2][4][11]

- Énergie chimique : Cette énergie provient des atomes, des molécules et de leurs Interactions.
- Énergie Électrique : Générée par le mouvement des électrons ;
- L'énergie d'attraction : Les objets volumineux tels que la terre et le soleil créent La gravité et le pouvoir d'attraction.
- Énergie thermique : Elle provient des molécules résultant de différentes réactions Thermiques.
- Énergie solaire : La lumière est appelée énergie radioactive et la terre tire une Grande partie de son énergie de la lumière du soleil.
- Énergie cinétique : Tout ce qui bouge a de l'énergie et cette énergie est appelée Carte de mouvement.
- Énergie nucléaire : Les divisions massives de cette énergie peuvent être générées

Par la division successive des atomes.

- Énergie potentielle (l'énergie d'état) : Il s'agit de l'énergie stockée dans un objet Particulier.

## I.4 Types d'énergies :

Les énergies ont été divisées en deux types selon l'étendue de la possibilité de renouvellement et De continuation de cette énergie, l'énergie non renouvelable et l'énergie renouvelable.

### I.4.1. Energie non renouvelable :

L'énergie non renouvelable est une source d'énergie qui n'est pas inépuisable (pour l'homme) et qui n'a pas été renouvelée ou qui a été renouvelée mais pas en quantité suffisante. Les sources d'énergie non renouvelables peuvent être divisées en deux grandes catégories : les combustibles fossiles et l'énergie nucléaire.

#### I.4.1.1. Les énergies fossiles : [3][4][5][11][1]

L'énergie fossile se renouvelle très lentement et est très consommée. Elle est composée principalement de pétrole, gaz naturel et le charbon.

##### a- Le pétrole :

Le pétrole brut, est une huile minérale foncée et visqueuse qui vient du sous-sol, et qui provient des restes d'animaux et de végétaux morts, le pétrole est donc une source d'énergie fossile non renouvelable.

Le raffinage permet d'isoler ses divers constituants et d'obtenir, après épuration, des carburants. La combustion de ce carburant crée de l'énergie.

- L'essence,
- Le gazole,
- Le kérosène.

##### b- Le gaz naturel :

Le constituant principal des gisements de gaz naturel est le méthane. Le méthane est un hydrocarbure composé d'un atome de carbone et de quatre atomes d'hydrogène. Pour être utilisable, le gaz naturel peut nécessiter un adoucissement (retrait de la majeure partie des composants acides, gaz carbonique et sulfure d'hydrogène essentiellement) et un dégazolinage (retrait des fractions lourdes du gaz). Il doit dans tous les cas être déshydraté. Toutes ces opérations visent à éliminer les impuretés présentes avec le gaz en sortie de puits.

##### • Le gaz de schiste :

Gaz non conventionnel contenu dans des roches sédimentaires argileuses très denses et imperméables, contenant au moins 5 à 10 % de matière organique. Le gaz de schiste est généralement extrait à des profondeurs d'environ 1 500 à 3 000 mètres, c'est-à-dire de 1 à plusieurs kilomètres sous l'aquifère d'eau potable. La fracturation de roche implique également l'injection de 10 à 15 000 mètres cubes d'eau et de sable à haute pression. Une partie de l'eau injectée par la fracturation hydraulique peut être récupérée (20 à 50 %) lors de sa mise en production après traitement. Le but du sable injecté combiné à des additifs chimiques est de maintenir les fractures ouvertes après la fracturation hydraulique pour créer un canal de drainage permanent à travers lequel le gaz peut être produit.

Cependant, une grande partie des sédiments est enfouie sous la nappe phréatique et, à mesure que le gaz monte, le fluide de fracturation peut parfois atteindre la nappe phréatique et se mélanger à l'eau, ce qui le rend impropre à l'utilisation. Selon un rapport du comité de l'énergie et du commerce de la Chambre des représentants des États-Unis, le développement du gaz de schiste a entraîné l'utilisation de « plus de 2 500 produits de fracturation hydraulique contenant 750 produits chimiques, dont 29 sont connus ou soupçonnés de causer le cancer ou de présenter des risques pour la santé et l'environnement ».

##### c- Le charbon :

Le charbon est la source d'énergie fossile la plus abondante et la mieux répartie dans le monde. Le charbon s'est formé il y a plus de 280 millions d'années à partir de végétaux engloutis par les eaux lors de bouleversements géologiques importants. Moteur essentiel du développement économique au XIX<sup>ème</sup> siècle, le charbon a marqué la première révolution industrielle. Ainsi, entre 1800 et 1900, la consommation mondiale de charbon a connu une progression annuelle moyenne de +4,3%.

Il existe différents types de charbon (l'antracite, la houille, le lignite, la tourbe) qui n'ont pas tous le même pouvoir énergétique. Au début du XX<sup>ème</sup> siècle, le charbon était l'énergie fossile dominante ; aujourd'hui il a été supplanté par le pétrole mais reste très présent. Puisque le charbon représente près de 26% de la consommation mondiale d'énergie primaire dans le monde.

#### I.4.1.2. Énergie nucléaire [5][11]

En comparaison des énergies fossiles, le nucléaire est une source d'énergie relativement récente, basée sur la fission de l'atome d'uranium en vue de créer la chaleur servant à produire la vapeur nécessaire à la production de l'électricité. Il existe sept filières principales de production : graphite-gaz (le gaz est le caloporteur, le graphite, le modérateur), eau lourde, eau ordinaire sous pression, eau ordinaire bouillante, la filière à neutrons rapides, la filière eau-graphite et la filière eau ordinaire bouillante-eau lourde. Il convient de mentionner que, parmi toute cette panoplie de filières, émergent les centrales à eau pressurisée PWR (Pressurized Water Reactor) qui représentent 80% de la puissance nucléaire installée et qui utilisent des combustibles classiques d'uranium enrichi en vue d'augmenter la proportion d'atomes fissionables. Quant aux réacteurs canadiens CANDU (Canada Deutérium Uranium), ils fonctionnent à l'uranium pur et à l'eau lourde. Malgré la multitude des types de réacteurs, ils reposent tous sur un même principe de base, soit celui des chaudières dans les centrales thermiques (charbon, gaz ou mazout).

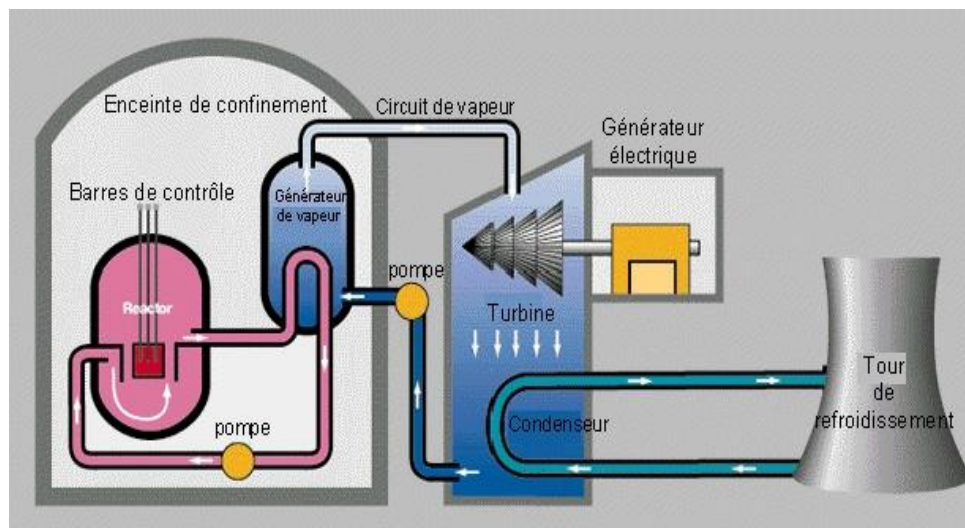


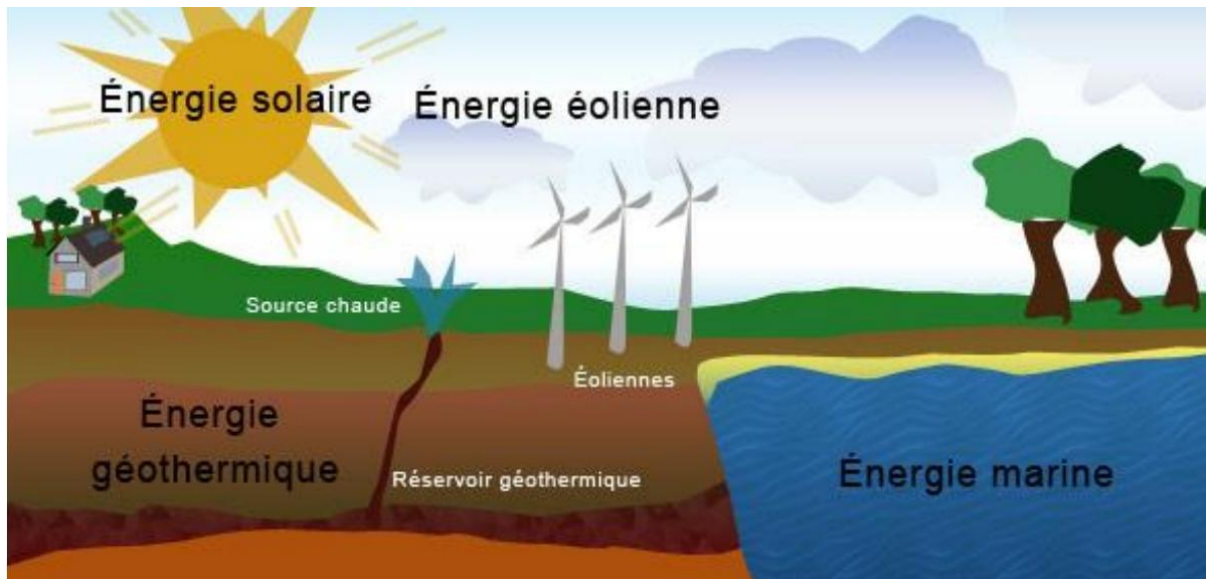
Figure I. 1 Principe de centrale nucléaire [11]

Même si la réalisation de la première réaction nucléaire a été concrétisée dès 1942 par Enrico Fermi et que la première centrale nucléaire industrielle a été construite dès 1956 par les États-Unis, le développement de l'énergie nucléaire n'a réellement commencé qu'une vingtaine d'années plus tard, après le premier choc pétrolier de 1973. À partir de cette date, cette filière a connu une croissance particulièrement élevée, grâce à la conjonction de trois facteurs :

- La forte augmentation des besoins énergétiques, en général, et électriques, en particulier ;
- Le contexte mondial caractérisé par le prix du pétrole qui a été brutalement multiplié par quatre, d'une part, avec des réserves estimées à moins de quarante années de consommation et dont l'épuisement est soudainement apparu inéluctable, d'autre part ;
- La volonté politique des pays développés d'obtenir leur indépendance énergétique, ce qui s'est fait avec l'assentiment des opinions publiques.

### I.4.2. Energie renouvelable :[3][4]

L'Energie renouvelable est connue aussi sous le nom d'énergie alternative, dérivant de ressources Naturelles inexploitées et inépuisables, notamment l'énergie solaire, éolienne, aérienne et l'eau .



**Figure I. 2** Les énergies renouvelables

D'une façon générale, les énergies renouvelables sont des modes de production d'énergie utilisant Des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités. L'eau des rivières faisant tourner les Turbines d'un barrage hydroélectrique, le vent brassant les pales d'une éolienne, la lumière solaire Excitant les photopiles, mais aussi l'eau chaude des profondeurs. De la terre alimentant des réseaux De chauffage. Sans oublier ces végétaux, comme la canne à sucre ou le colza, grâce auxquels on Peut produire des carburants automobiles ou des combustibles pour des chaudières très Performantes. Tout cela constitue les énergies nouvelles et renouvelables, "ENR". En plus de leur Caractère illimité, ces sources d'énergie sont peu ou pas polluantes [4].

#### I.4.2.1. Les différents types d'énergie renouvelables : [1][3][4][6][7][8][10][12]

Il y a cinq familles principales d'énergies renouvelables. Dans l'ordre d'importance de leur exploitation actuelle, sont :

- L'énergie biomasse.
- L'énergie hydraulique.
- L'énergie éolienne.
- La géothermie.
- L'énergie solaire.

##### a- L'énergie solaire

L'énergie solaire vient des rayonnements du soleil, la chaleur du soleil dans les photons est utilisée pour créer de l'électricité, c'est l'énergie solaire photovoltaïque et de la chaleur c'est l'énergie solaire thermique.

Il y a deux types de technologie pour l'exploitation des rayonnements du soleil. Il y a les technologies actives et les technologies passives. Les premières transforment l'énergie solaire en une forme électrique ou thermique que nous pouvons utiliser directement. Les secondes, par contre, consistent à pratiquer des techniques pour bien orienter les bâtiments par rapport au soleil, à utiliser des matériaux spéciaux, et des modèles architecturaux pour les maisons d'habitation ou des bâtiments qui permettent d'exploiter l'énergie solaire.

- **Le solaire photovoltaïque :**

C'est Edmond Becquerel qui a découvert les cellules photovoltaïques en 1839. Les cellules photovoltaïques sont des panneaux qui captent le rayonnement solaire, les photons contenus dans le rayonnement sont ainsi transformés directement en électricité par ces cellules photovoltaïques de ces panneaux. L'électricité obtenue peut être utilisée directement ou être stockée dans des batteries pour un usage ultérieur. L'électricité produite par le solaire photovoltaïque peut être autonome ou raccordée à un réseau.

- **Le solaire thermique :**

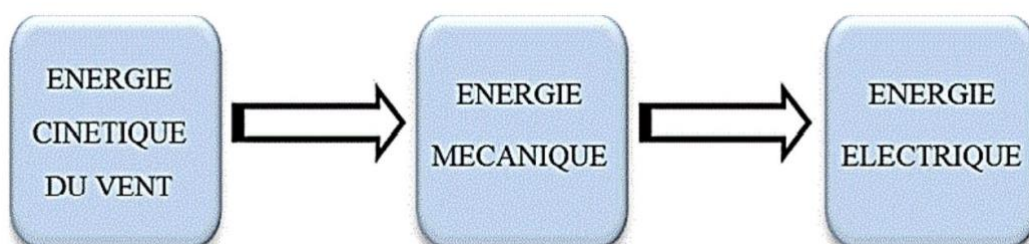
L'énergie solaire thermique est utilisée principalement pour le chauffage de l'eau et des locaux. Le principe est voisin du solaire électrique, un capteur absorbe les photons solaires et les transforme en chaleur. Le matériau à partir duquel le capteur est fabriqué doit ainsi être très absorbant. La chaleur capturée est ensuite conduite par un liquide, généralement l'eau ou par des gaz vers un réservoir de stockage. Il existe différents systèmes pour la capture et le stockage de la chaleur, il y a par exemple le chauffe-eau solaire auto stockeur et le chauffe-eau à thermosiphon. L'énergie solaire thermique peut aussi produire de l'électricité par le système thermodynamique à partir d'un système de chauffage d'eau à très haute température.

### **b- Les énergies éoliennes :**

Les énergies éoliennes tirent leur caractéristique principale des mouvements de masse d'air à l'intérieur de l'atmosphère. C'est l'énergie mécanique engendrée par ces mouvements qui forme la base de l'énergie éolienne. Cette énergie mécanique est exploitée à travers l'utilisation d'un rotor et de pales. L'énergie éolienne est une source non polluante. Toutefois, elle est intermittente, ce qui signifie qu'elle n'est pas constante dans sa disponibilité. De plus, l'installation de parcs éoliens peut avoir des impacts sur le paysage environnant et générer du bruit.

L'énergie éolienne est utilisée de trois manières :

- Conservation de l'énergie mécanique
- Transformation en force motrice
- Production d'énergie électrique.



**Figure I. 3** Conversion de l'énergie cinétique du vent

### c- Energie biomasse :

Dans le domaine de l'énergie, le terme biomasse est tout ce que produisent la terre et les milieux aquatiques sous l'action du rayonnement solaire arbres, plantes, algues. Les végétaux contiennent de l'énergie, ils ont d'ailleurs constitué pendant des millénaires l'unique source d'énergie utilisée par l'homme les aliments de l'homme lui-même et du bétail qui étaient les seuls moteurs, et le bois, seul combustible connu, employé avec un rendement énergétique désastreux jusqu'à la découverte des combustibles fossiles

La biomasse comprend trois familles principales :

- Le biogaz ou La méthanisation.
- Les bois énergie ou biomasse solide.
- Les granules de bois sont le combustible au rendement le plus élevé.

### d- La géothermie

Le terme géothermie provient du grec <Ge> et <thermos>, signifiant respectivement : la Terre et la chaleur. La géothermie peut se définir comme étant la technique qui consiste à Puiser dans le sous-sol ou dans les roches, les calories qui y sont contenues, afin de les rendre Disponibles en surface pour des applications de chauffage ou de production d'électricité. Dans Des cas particuliers, la géothermie peut consister à injecter de la chaleur dans le sous-sol afin De refroidir les installations de surface. Différents sources de chaleurs sont à l'origine de la Chaleur interne de la terre : la radioactivité, la chaleur initiale, la chaleur de différenciation et Les mouvements différentiels .Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie Présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques ; c'est donc une énergie Fiable et disponible dans le temps. Cependant, il ne s'agit pas d'une énergie entièrement Inépuisable dans le sens où un puits verra un jour son réservoir calorifique diminuer. Si les Installations géothermiques sont technologiquement au point et que l'énergie qu'elles Prélèvent est gratuite, leur coût demeure, dans certains cas très élevé [.

### e- L'énergie hydraulique :

De nombreuses civilisations se sont servies de la force de l'eau, qui représentait une des Sources d'énergie les plus importantes avant l'être de l'électricité. De nos jours l'énergie Hydraulique est utilisée au niveau des barrages et sert principalement à la production d'électricité.

Les types de l'énergie hydraulique :

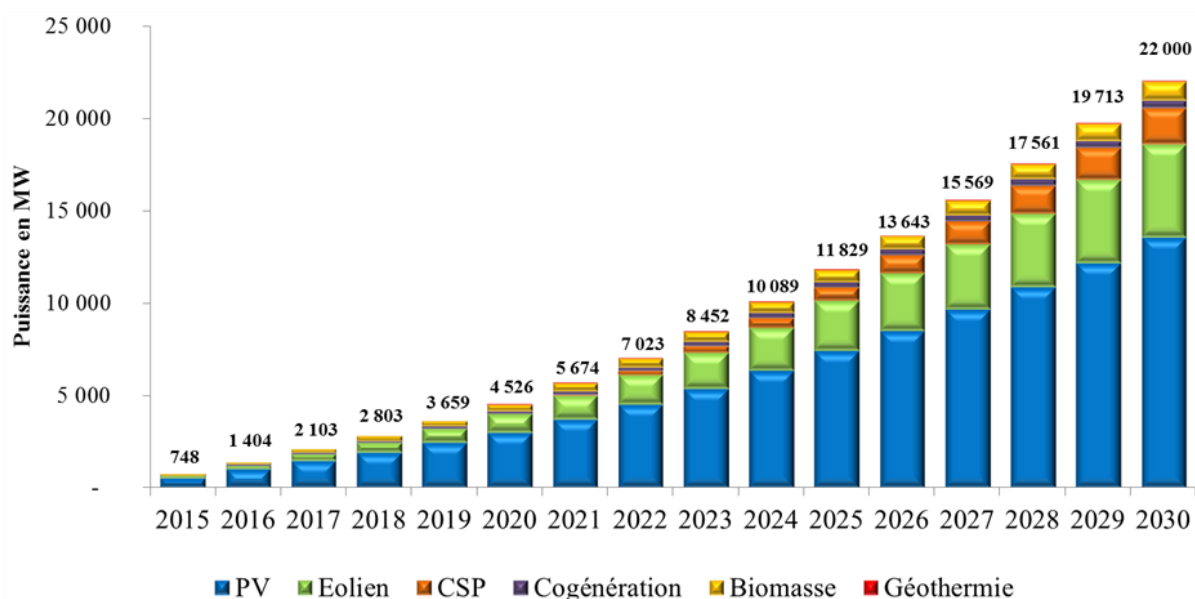
- L'énergie des vagues
- L'énergie marémotrice
- L'énergie hydrolienne
- L'énergie maréthermique
- L'énergie osmotique.

## I.5 Les énergies renouvelables dans l'Algérie :

L'Algérie est l'un des pays candidats les plus importants pour que les experts en énergie Jouent un rôle majeur dans le domaine de la capacité renouvelable en raison de la présence D'énormes capacités naturelles dans notre pays Selon la figure (I.4) . D'ici à 2030, la production d'électricité dépend en grande partie de L'énergie solaire et éolienne, environ 40% de la production d'électricité destinée à la Consommation nationale sera d'origine renouvelable, mais pour atteindre cet objectif dans la Réalité, les efforts doivent être intensifiés et les projets innovés. Bien qu'il s'agisse d'un Investissement coûteux, mais avec



le temps il contribue au développement du pays, d'autant Plus que l'Algérie dans les circonstances actuelles perd un grand pourcentage des énergies Fossiles.



**Figure I.4** Pénétration des énergies renouvelables dans la production nationale en TWh

## I.6 les avantages et les inconvénients de l'énergie renouvelable :

### I.6.1 les avantages de l'énergie renouvelable : [2][4][5]

- La sécurité est l'un des principaux avantages, car les risques d'accidents sont très faibles.
- La décentralisation des énergies renouvelables joue également un rôle positif très important dans le développement de certaines régions et de l'économie locale. De plus, ces sources d'énergie renouvelable permettent une réduction considérable des émissions de CO<sub>2</sub>.
- Bien que l'énergie nucléaire ne contribue pas à l'effet de serre, ses implications suscitent de graves préoccupations. Les dangers potentiels tels que les risques d'explosion ou d'accident, la prolifération des armes nucléaires et la gestion des déchets nucléaires sont des problèmes majeurs associés à cette forme d'énergie.
- Les énergies renouvelables jouent un rôle essentiel dans la réduction significative des émissions de CO<sub>2</sub>.

### I.6.2 les inconvénients de l'énergie renouvelable : [4][7][10]

- La disponibilité des énergies renouvelables dépend du climat. Les centrales solaires, par exemple, ne peuvent utiliser que 50 % de leur capacité maximale dans les zones équatoriales, et encore moins aux pôles en raison de l'absence de soleil pendant plusieurs mois. De plus, en présence de nuages, le rayonnement solaire est réduit. Pendant les périodes anticycloniques, il n'y a pas de vent, ce qui rend cette source d'énergie peu fiable.
- La responsabilité des énergies renouvelables dans le réchauffement climatique est un défi majeur. Elles sont souvent présentées comme une solution pour résoudre ce problème, mais pour que cela se concrétise, il est nécessaire de réduire considérablement la consommation des énergies fossiles telles que le pétrole, le charbon et le gaz, tout en optimisant l'utilisation des énergies renouvelables afin de les économiser davantage.
- Il est important de considérer l'impact visuel sur le paysage lors de la construction de grandes centrales solaires ou de champs d'éoliennes. Bien que ces installations décentralisées puissent contribuer à réduire le nombre de lignes à haute tension, elles

peuvent néanmoins constituer une source de pollution pour la faune. De plus, certaines expériences menées dans certains pays ont montré qu'elles peuvent en réalité conduire à une augmentation du nombre de ces mêmes lignes.

- Les barrages hydroélectriques posent de graves problèmes pour la faune, car ils entraînent l'inondation de vallées entières et ont un impact significatif et négatif sur l'écosystème. Les poissons ont du mal à migrer vers leurs sites de reproduction, même lorsque des passes à poissons sont construites. Les éoliennes représentent un danger pour les oiseaux et les chauves-souris.

### **I.7 L'énergie à l'horizon 2030 :**

Il est difficile de prédire avec certitude les projections futures de la demande énergétique, car des politiques volontaristes et des percées technologiques pourraient bouleverser les projections. Cependant, les projections récentes de différentes organisations indiquent que la demande mondiale d'énergie continuera à croître fortement, principalement en raison de la croissance économique et démographique, ainsi que de l'urbanisation.

La croissance économique, en particulier dans les pays asiatiques émergents, est fortement liée à la croissance de la consommation énergétique. Les pays en développement devraient absorber une grande partie de l'accroissement global de la demande énergétique, avec la Chine en tête. La croissance démographique et l'urbanisation contribuent également à la demande croissante d'énergie, en particulier dans les régions urbaines concentrées.

Les énergies fossiles, telles que le charbon, le pétrole et le gaz, continueront à représenter la majeure partie de la consommation mondiale d'énergie dans les décennies à venir. Selon les estimations, la consommation mondiale d'énergie devrait augmenter de plus de 50% d'ici 2030. Les réserves de combustibles fossiles sont suffisantes pour satisfaire la demande prévue, mais elles s'épuiseront à moyen terme.

La consommation de pétrole devrait rester la première source d'énergie, suivie par le charbon et le gaz. Les plus gros consommateurs seront les États-Unis, l'Europe, la Chine et l'Inde. La consommation de charbon devrait doubler d'ici 2030, ce qui pose des défis en termes d'émissions de CO<sub>2</sub> et d'impact sur l'environnement. La consommation de gaz devrait également doubler, principalement en raison de l'augmentation de la production d'électricité.

La demande mondiale d'énergie devrait continuer à croître de manière significative en raison de la croissance économique, de la croissance démographique et de l'urbanisation. Les énergies fossiles resteront les principales sources d'énergie, mais des efforts doivent être faits pour développer des technologies plus propres et durables. [5]

### **I.8 Solutions :**

Pour répondre à la demande croissante d'énergie, il est nécessaire de développer des technologies plus propres, telles que l'utilisation de l'électricité et de l'hydrogène. Des investissements dans la recherche et le développement de ces technologies sont essentiels pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et garantir un approvisionnement énergétique durable à long terme.

Les éoliennes peuvent aussi être une réponse au besoin énergétique. Le principe est simple : une éolienne se compose d'un moteur qui tourne sous l'effet du vent, ce qui produit de l'électricité. Évidemment, le rendement de l'éolienne est proportionnel à la force et à la direction du vent. Et bien sûr, il faut aussi une installation de stockage pour que l'énergie produite soit utilisable quand vous en avez besoin.

Il est nécessaire de renforcer la durabilité et de passer à des sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire, éolienne et hydraulique, ainsi que de développer des technologies propres et d'améliorer l'efficacité énergétique.

**I.9 Conclusion :**

En conclusion, les dilemmes énergétiques posent des défis complexes qui nécessitent des efforts de collaboration et des solutions innovantes. Équilibrer la demande énergétique, l'impact environnemental et les considérations sociales et économiques est essentiel. La transition vers les énergies renouvelables, la promotion de l'efficacité énergétique et les investissements dans la recherche et la coopération internationale sont essentiels pour relever ces dilemmes et construire un avenir énergétique durable.



---

*CHAPITRE 2 : Modélisation d'un  
convertisseur statique réversible*

---



## II.1 INTRODUCTION :

Depuis la fin du XIXe siècle, ils ont inventé en électrotechnique, des machines utilisant les propriétés du magnétisme, et plus particulièrement du ferromagnétisme pour réaliser les diverses conversions possibles des formes d'énergie électriques.

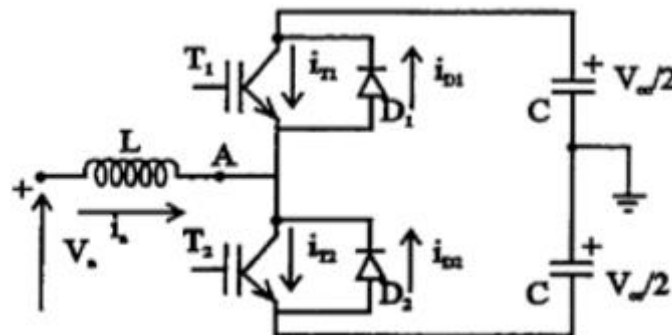
Avec le développement de l'automatique, de l'électronique et de l'informatique, on peut remplacer les « machines » par des convertisseurs statiques utilisant des composants électroniques en commutation. Les avantages de ces convertisseurs sont nombreux :

- Contrôle et même régulation électronique possible du transfert de puissance.
- Système moins lourd et moins encombrant.
- Excellent rendement.
- Facilité de mise en œuvre grâce à l'automatisation.
- Protections de plus en plus efficaces.

Coût relatif en baisse, grâce aux progrès dans la fabrication et le montage des composants [1] [Michel Pinard 2007].

## II.2 Structure de base d'un convertisseur DC/AC :

Afin de comprendre le fonctionnement du convertisseur CC/CA on l'a représenté dans un montage



**Figure 1:** phase du convertisseur à deux niveaux

Ce montage représente une phase du convertisseur à deux niveaux et il est constitué de deux cellules. Dans les deux cellules on trouve un interrupteur à base de semi-conducteur qui est unidirectionnel en tension et en courant, avec une diode en antiparallèle qui permet le passage réversible du courant.

Le côté CC comprend une source de tension continue qui peut être réalisée à l'aide d'un ou plusieurs condensateurs ou des sources indépendantes (batterie)

Le côté CA peut avoir un récepteur actif et passif

**Récepteur actif :** la source de CA

**Récepteur passif :** sans source et une inductance.

Le rôle de l'inductance est double : lisser le courant et permettre l'échange d'énergie entre les deux côtés.

L'échange d'énergie est possible seulement dans le cas du récepteur actif du côté CA (qui peut jouer le rôle de la source ou le rôle de récepteur) et des condensateurs a côté CC (qui peuvent également jouer les deux rôles). Le fait que chaque cellule est réversible en courant et irréversible en tension nous permet de constater qu'une telle cellule fonctionne en deux quadrants, mais que par contre le convertisseur fonctionne en quatre quadrants.

Il y a deux interrupteurs T1 et T2 comportent deux états stables : état ouvert et état fermé, ce qui fait l'ensemble de quatre combinaisons possibles :

- 1) T1 ouvert et T2 fermé
- 2) T1 ouvert et T2 ouvert
- 3) T1 fermé et T2 ouvert
- 4) T1 fermé et T2 fermé

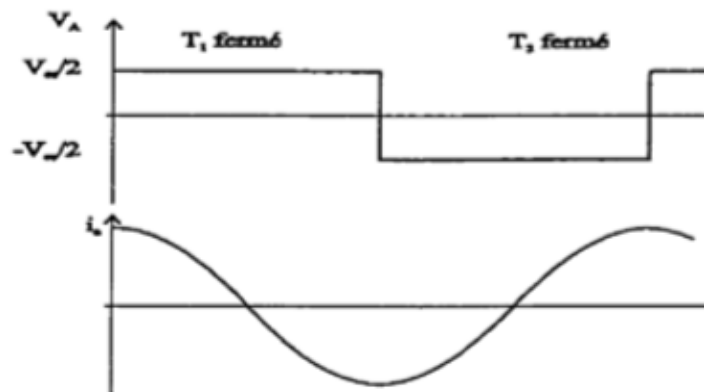
Généralement les combinaisons 1 et 3 sont permises, donc on dit que les deux interrupteurs sont complémentaires (toujours en état opposé) l'état 4 cause un court-circuit du côté CC et l'état 2 dont une tension indéterminée du côté CA

Dans le cas où l'interrupteur T1 est fermé (état de conduction) et T2 ouvert (état blocage), la tension vue au point A est  $V_{cc}/2$

Dans le cas où l'interrupteur T1 est ouvert et T2 fermé la tension est  $-V_{cc}/2$

Le courant du convertisseur est imposé par la charge

Le signe de ce courant et sont déphasage par rapport à la tension à la sortie du convertisseur détermine la direction et le taux de transfert de l'énergie entre les côtés CC et CA.



**Figure2:** représente la tension à la sortie du convertisseur avec le courant qui est imposé par une charge quelconque.

Au début, le courant  $i > 0$  et  $V_A > 0$ ,

T1 est fermé. Dans ce cas, le courant passe par la diode D1 et  $i_a = i_{d1}$ . Le convertisseur fonctionne comme redresseur et le transfert d'énergie s'effectue du côté CA au côté CC. Grâce à l'inductance L ce transfert s'effectue, malgré le fait que la tension du côté CA peut être plus élevée que la tension du côté CC.

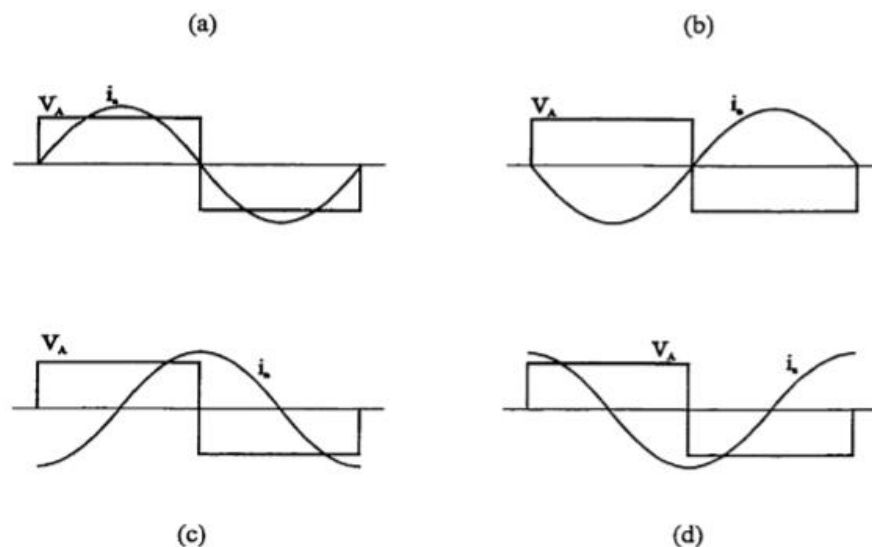
La diode D1 est polarisée inverse et c'est l'énergie magnétique stockée dans le champ magnétique de l'inductance qui va pousser le courant par la diode. Si le courant passe par zéro et devient négatif pendant que le T1 est fermé, le courant commutera naturellement dans la même cellule et il va passer par T1  $i_a < 0$ ,  $i_{D1} = 0$ ,  $i_{T1} = -i_a$

Le transfert d'énergie se fait maintenant du côté CC au côté CA et le convertisseur Fonctionne comme un onduleur.

Si le transistor T2 est commandé à la fermeture et le transistor T1 commandé à l'ouverture pendant que le courant est négatif le courant commutera de T1 à la diode D2 et  $i_a < 0$ ,  $i_{D1} = 0$ ,  $i_{T1} = 0$ ,  $i_{T2} = 0$  et  $i_{D2} = -i_a$ .

Le transfert d'énergie se fait du côté CA au côté CC et le convertisseur fonctionne en mode redresseur.

Finalement, si le courant devient positif et que T1 reste fermé, le courant Commutera de la diode D2 au transistor T2 et  $i_a = i_{T2}$ ,  $i_{D2} = 0$ . Le convertisseur devient un onduleur



**Figure 3 :** Formes d'ondes de la tension et du courant à la sortie d'un convertisseur (a) fonctionnement en mode redresseur (b) en mode onduleur (c) en mode capacitif (d) en mode inductif

**Le Cas a :** le courant  $I(a)$  et la tension  $V(a)$  sont en phase. L'écoulement d'énergie se fait du côté CA au côté CC et le convertisseur fonctionne en mode redresseur.

**Le Cas B :** représente le fonctionnement en mode onduleur (le déphasage entre le courant et la tension est de 180 degrés) et l'énergie est transférée du côté CC au côté CA.

**Le Cas C et D :** le déphasage entre la tension et le courant est de 90 degrés.

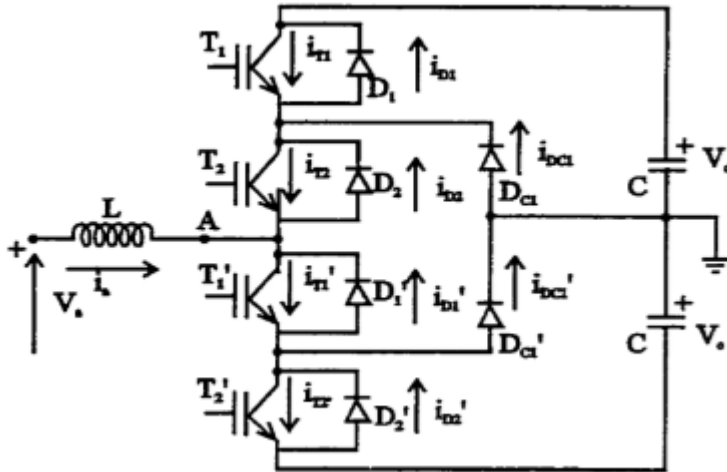
Le convertisseur change le mode de fonctionnement de redresseur en onduleur et vice-versa chaque quart de cycle. Cela permet de constater que, malgré l'échange d'énergie instantanée entre les deux côtés existants, le transfert d'énergie moyen est zéro et le convertisseur prend le comportement de charge réactive pure.

### Convertisseur à niveaux multiples -topologie "calée par diode"

#### Convertisseur à trois niveaux :

En ajoutant deux cellules de commutation et deux diodes de calage tel que démontrée (figure 7) on obtient un convertisseur à trois niveaux de la topologie (Calée par diode), Une phase de convertisseur a trois niveaux comprend quatre interrupteurs principaux T1, T2, T1' et T2', quatre diodes mises en antiparallèles avec eux, et deux diodes de calage.

- les interrupteurs T1 et T1' sont complémentaires donc pendant que T1 conduit l'interrupteur T1' est en état de blocage et quand T1 est en état de blocage T1' conduit
- les interrupteurs T2 et T2' sont complémentaires aussi même logique



**Figure 4 :** Un bras de convertisseur à trois niveaux de la topologie « calée par diodes »

Les séquences de fonctionnement sont les suivantes :

-T1 et T2 sont fermés donc T1' et T2' ouverts

On observe la tension du côté CA du convertisseur est  $V_c$

Quand le signe du courant est positif, le courant passe par les diodes principales D1 et D2,

Quand le signe du courant est négatif, le courant passe par les deux transistors T1 et T2,

-Le transistor T1 est commandé à l'ouverture et T1' à la fermeture

\*On observe la tension du côté CA du convertisseur est zéro

Quand le signe du courant est positif, le courant passe par le transistor T1' et la diode de calage Dc1'

Quand le signe du courant est négatif, le courant passe par la diode Dc1 et le transistor T2

Le transistor T1 bloque la tension  $V_c$ .

-le transistor T2 est commandé en ouverture et le transistor T2' à la fermeture

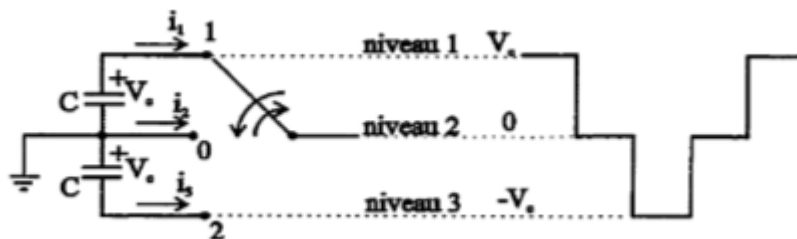
\*on observe la tension du côté CA du convertisseur est  $-V_c$

Quand le signe du courant est positif, le courant passe par les transistors T1' et T2'

Quand le signe du courant est négatif, le courant passe par les diodes D1' et D2'

Les transistors T1 et T2 bloquent chacun la tension  $V_c$ , et la diode de calage Dc1' bloque la même tension.

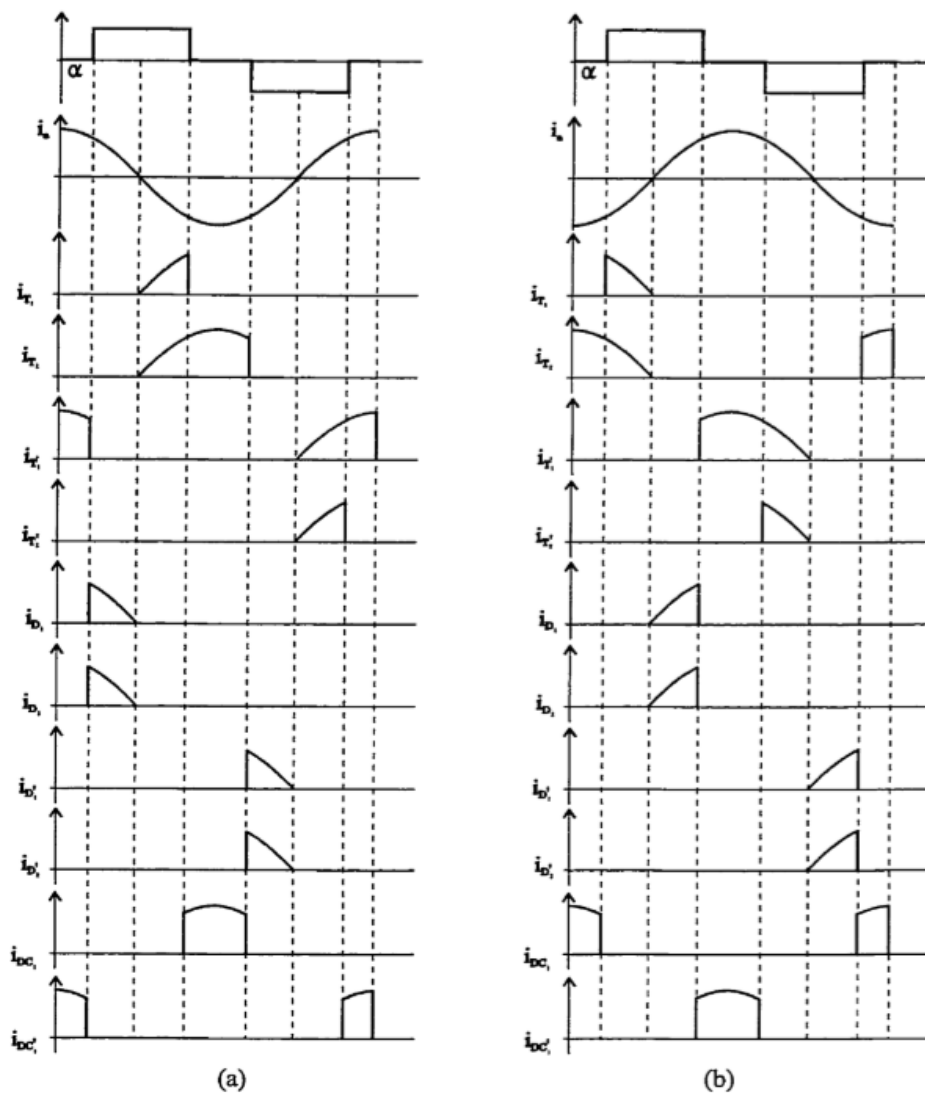
En répétant les trois séquences, la forme d'ondes de la tension de phase générée au côté CA est à trois niveaux, ce qui est présenté schématiquement dans la Figure 8. La tension de Ligne est conçue à cinq niveaux.



a) **Figure 5 :** Forme d'onde de la tension de phase à trois niveaux



- b) Il faut remarquer qu'il est possible de choisir l'angle d'amorçage des interrupteurs afin de minimiser la distorsion
- c) Quand la tension au côté CA du convertisseur est zéro :
- d) T2 et T1' sont en état de conduction
- e) En commandant la fermeture de l'interrupteur T1 et l'ouverture de T1' au moment  $\omega t = \alpha$  ou  $\omega = 2\pi f$  (f la fréquence de la tension au côté CA produite par l'onduleur)
- f) Si l'angle  $\alpha$  est choisi en avant et en répétant les séquences symétriquement par rapport à cet angle et à la période de la tension  $T = 1/f$
- g) La tension résultante a la sortie de l'onduleur sera optimisée, ce qui donne un degré de liberté.
- h) Pour les cas de courant purement capacitif et purement inductif la distribution du courant dans le convertisseur et son parcours sont démontrés dans la figure 9 : (Il est possible de voir que le stress du courant n'est pas également distribué parmi les composants).



**Figure 6 :** Distribution du courant dans un convertisseur à trois niveaux (a) courant capacitif (b) courant inductif



---

*CHAPITRE 3 : COMMANDE ET  
MODELISATION D'UN  
COMPENSATEUR  
D'ENERGIE REACTIVE*

---



### III.1. INTRODUCTION

Les principes de la compensation de la puissance réactive à l'aide d'un convertisseur à base de semi-conducteurs sont expliqués dans le deuxième chapitre.

Pour une meilleure compréhension du mécanisme de la compensation, nous allons présenter, dans ce chapitre, le réglage d'un compensateur statique de puissance réactive.

Ce compensateur est un onduleur à niveaux multiples. Nous suivrons, plus particulièrement.

### III.2. L'évolution et le contrôle de ses courants dans le repère dq ainsi que sa tension continue. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT [42], [48], [2]

Le compensateur synchrone de l'énergie réactive est une source de puissance réactive branchée en parallèle avec le réseau comme la montre la figure (3.1), Nous supposons donc que l'onduleur permet de générer, à partir d'une tension continue, un jeu de tension triphasée  $V_1, V_2, V_3$ . Chacune de ces tension est en phase et couplée avec la tension correspondante du réseau par l'intermédiaire d'une réactance  $X_s$  (qui habituellement constituée par l'inductance de fuite par phase du transformateur de couplage associé a un condensateur comme source de tension continu [11],[12].

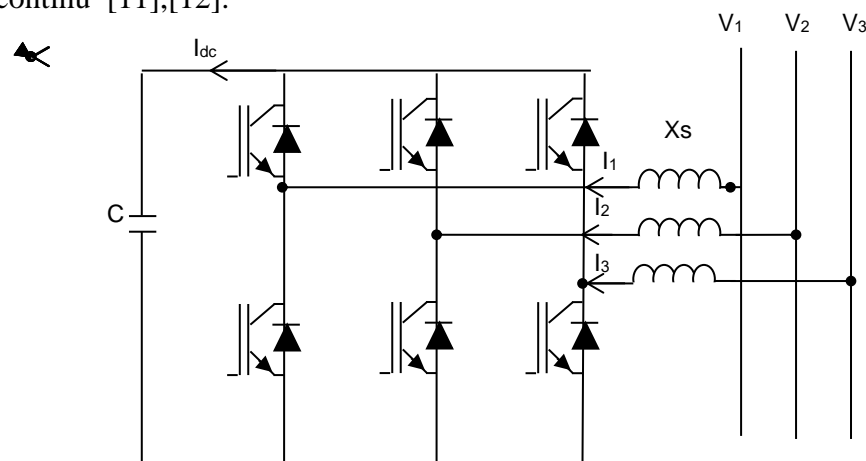


Figure (3.1) : Circuit équivalent d'un STATCOM.

$X_s$  : représentant la réactance de fuite du transformateur.

$i_1, i_2, i_3$  : Courants de compensateur shunt.

$V_1, V_2, V_3$ : Tensions de source du réseau.

$I_{dc}$  : Courant du côté continu.

L'onduleur qui la pièce maîtresse du STATCOM, est constitué par six commutateurs à semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à fermeture. Chaque commutateur est shunté par une diode en antiparallèle.

Le principe du fonctionnement du compensateur est illustré par le circuit équivalent du réseau qu'on reproduit sur la (fig. 3.2), on suppose que le circuit continu consiste en une source de tension constante et le circuit DC ne sera pas inclus dans ce modèle.

Dans cette représentation  $L_s$  est l'inductance de fuite par phase du transformateur reliant le STATCOM au réseau,  $R_s$  représente les pertes actives du transformateur et les pertes dans les interrupteurs de l'onduleur[16][17],  $V_1$  et  $V_2$  sont les amplitudes fondamentales des tensions de sortie de l'onduleur et celle de réseau respectivement, l'onduleur peut être remplacé par une source de tension et le réseau compris entre deux bornes

peut être remplacé par le circuit équivalent de Thévenin .Ainsi on a le diagramme vectoriel, en notant  $\varphi$  le déphasage entre la tension simple réseau et le courant de ligne de la même phase:

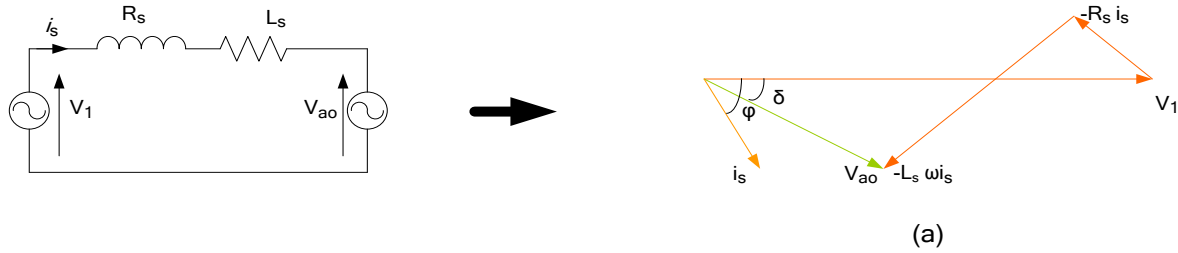


Figure (3.2) : Le circuit équivalent en monophasé et le diagramme vectoriel de phase du compensateur

$$\begin{cases} V_{ao}(t) = V_1 \sqrt{2} \sin(\omega t) - R_s i_s \sin(\omega t - \varphi) - L_s \omega i_s \cos(\omega t - \varphi) \\ V_{bo}(t) = V_1 \sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) - R_s i_s \sin(\omega t - \varphi - \frac{2\pi}{3}) - L_s \omega i_s \cos(\omega t - \varphi - \frac{2\pi}{3}) \\ V_{co}(t) = V_1 \sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) - R_s i_s \sin(\omega t - \varphi - \frac{4\pi}{3}) - L_s \omega i_s \cos(\omega t - \varphi - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (3.1)$$

En faisant varier l'amplitude des tensions alternative de sorties produites, on peut réguler l'échange de puissance réactive entre le STATCOM et le réseau [36]. Autrement dit, si l'amplitude de la tension de sortie de l'onduleur est augmentée au-delà de celle de la tension du réseau, figure (3.3.a), le courant circule à travers la réactance en provenance du STATCOM vers le réseau et le STATCOM produit (injecté) de la puissance réactive (capacitive) pour le réseau.

D'autre part, si l'amplitude de la tension de sortie de l'onduleur est réduite à une valeur inférieure à celle du réseau, comme la montre la figure (3.3.b) alors le courant réactif circule depuis le réseau vers le STATCOM et donc, le STATCOM absorbe de la puissance réactive (inductive). Enfin si la tension de sortie est égale à celle du réseau l'échange de puissance réactive est égal à zéro [37].

### III.2.1. Cas où le compensateur injecte de la puissance réactive : ( $\varphi = +\frac{\pi}{2}$ ) (fig. 3.3)

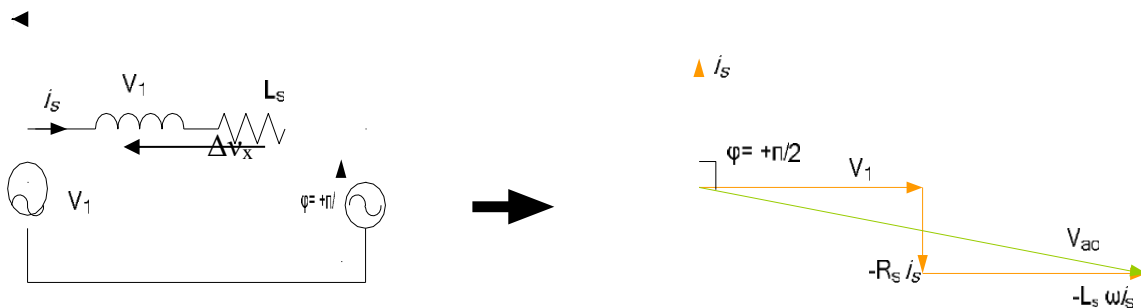


Figure (3.3): diagramme vectoriel de phase du compensateur ( $\varphi=+\pi/2$ )

$$\begin{cases} V_{co}(t) = V_1 \sqrt{2} \sin(\omega t) - R_s i_s \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) - L_s \omega i_s \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) \\ V_{bo}(t) = V_1 \sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) - R_s i_s \sin(\omega t - \frac{5\pi}{6}) - L_s \omega i_s \cos(\omega t - \frac{5\pi}{6}) \\ V_{co}(t) = V_1 \sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) - R_s i_s \sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) - L_s \omega i_s \cos(\omega t + \frac{\pi}{6}) \end{cases}$$

(3.2)

### III.2.2. cas où le compensateur absorbe de la puissance réactive : ( $\varphi = -\frac{\pi}{2}$ ) (fig. 3.4)

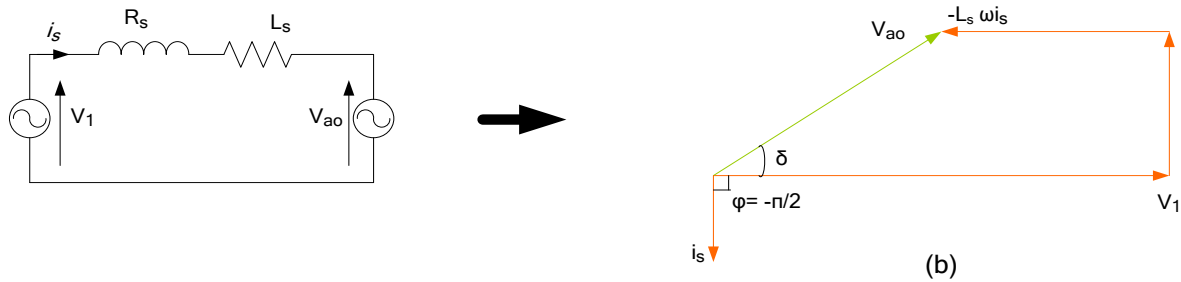


Figure (3.4) : diagramme vectoriel de phase du compensateur ( $\varphi = -\pi/2$ )

$$\begin{cases} V_{ao}(t) = V_1 \sqrt{2} \sin(\omega t) - R_s i_s \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) - L_s \omega i_s \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) \\ V_{bo}(t) = V_1 \sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) - R_s i_s \sin(\omega t - \frac{\pi}{6}) - L_s \omega i_s \cos(\omega t - \frac{\pi}{6}) \\ V_{co}(t) = V_1 \sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) - R_s i_s \sin(\omega t - \frac{5\pi}{6}) - L_s \omega i_s \cos(\omega t - \frac{5\pi}{6}) \end{cases}$$

(3.4)

### III.3. MODELISATION DES TENSIONS TRIPHASEE [40], [41], [42]

La technique proposée, permet de tenir compte d'une grande partie des perturbations des réseaux basse fréquence (distorsions, creux de tension, variation de phase, variation d'amplitude) [42].

- Tous les interrupteurs sont supposés idéals.
- Les trois tensions de la source alternative sont équilibrées.
- Toutes les chutes de tensions dans le compensateur sont représentées par les résistances  $R_s$ .
- Les harmoniques causés par l'action d'ouverture et de fermeture des interrupteurs sont supposés négligeables [40].

L'étude analytique du comportement de notre système est complexe. Il est donc indispensable d'utiliser des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement du système à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants. Les transformations de Concordia ou de Park permettent d'obtenir un système équivalent formé

de trois vecteurs orthogonaux. Deux de ces vecteurs sont situés dans le même plan que les vecteurs a, b, et c. Le troisième vecteur est situé dans le plan orthogonal au plan formé par les axes de phases a, b, et c et représente la composante homopolaire. La transformation de Park permet de passer d'une représentation dans le repère triphasé (a, b, c) à une représentation dans un repère dit de Park à axes orthogonaux (d, q, o).

Dans notre étude, on s'intéresse à la transformation de Concordia car elle conserve la puissance instantanée elle est donc invariante en puissance. L'hypothèse de départ consiste à considérer que le système est équilibré, ce qui veut dire que la composante homopolaire est nulle. Cette transformation d'un système triphasé en un système diphasé peut se décomposer en deux étapes (figure 3.5).

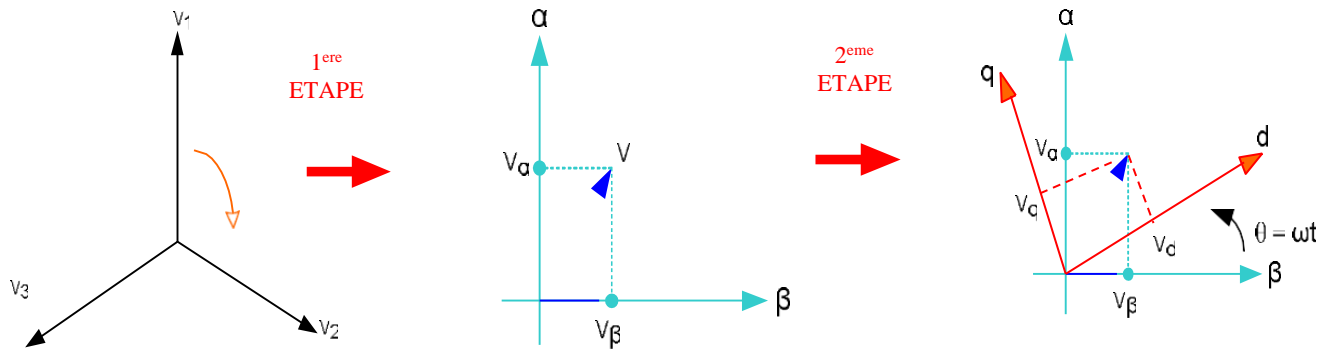


Figure (3.5) : passage du repère triphasé à d'autre diphasé.

La première étape consiste à passer d'un système triphasé à un système diphasé. Les coordonnées dans le repère de CLARKE sont notées par  $V_\alpha$ ,  $V_\beta$  suivant les axes "α" et "β". La formule (3.1) fournit le système triphasé équilibré direct issu des coordonnées  $V_\alpha$ ,  $V_\beta$  dans le repère de CLARKE. [42]

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = M_{32} \cdot \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-1}{2} \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-1}{2} \end{bmatrix} \cdot V \cdot \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \sin(\omega t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-1}{2} \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

On peut alors exprimer  $V_\alpha$ ,  $V_\beta$  issus d'un système triphasé équilibré direct, ce qui donne:

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = M_{32}^{-1} \cdot V = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \\ 0 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \end{bmatrix} \cdot V \quad (3.5)$$

$$M_{32}^{-1} = \frac{2}{3} M_{32}^t \quad (\text{Propriété de CLARKE}).$$

Dans la deuxième étape, on passe par une rotation de  $(-\theta = -\omega t)$  du système diphasé dans le repère de CLARKE au système diphasé dans le repère tournant de PARK, dans lequel les coordonnées de la composante équilibrée directe ont la propriété d'être constantes :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = R(-\theta) \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = R(-\theta) \cdot \frac{2}{3} \cdot M'_{32} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Donc :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = [R(\theta)]^{-1} \cdot \frac{2}{3} \cdot M'_{32} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Avec :

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \Rightarrow R(-\theta) = [R(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

D'où :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

### III.4. Commande du compensateur [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48],

D'une manière générale, la partie commande du compensateur est constituée de deux boucles internes et une boucle externe.

L'objectif des boucles internes est de réguler les courants du réseau afin de minimiser leurs contenus harmoniques et d'échanger avec le réseau une certaine puissance réactive, tandis que la boucle externe, son objectif est de réguler la tension de sortie du compensateur. La figure (3.6) présente un schéma bloc de principe de la régulation d'un compensateur.

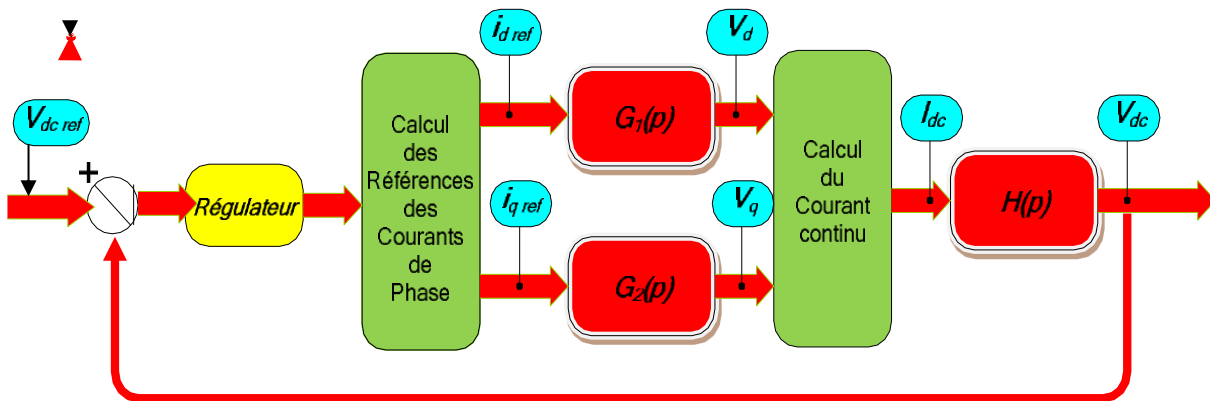


Figure (3.6) : schémas bloc de principe de la régulation du compensateur.

**G1(p) : boucle de régulation du courant  $i_d$**

**G2(p) : boucle de régulation du courant  $i_q$**

**H(p) : boucle de régulation de la tension coté continu  $V_{dc}$**

#### III.4.1. Modélisation de la Boucle Interne :

Comme l'illustre la figure (3.7), la modélisation de la boucle interne est représentée par une maille composée d'une tension alternative ( $V_{s1}$ ) en série avec une impédance

constituée d'une résistance ( $R_s$ ) et d'une inductance ( $L_s$ ). La sortie de cette maille est la tension  $V_{ao}$  que fournit le compensateur.

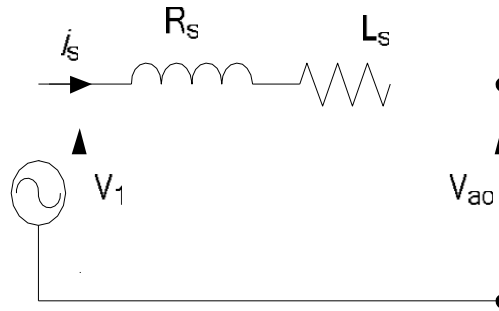


Figure (3.7) : modélisation de la boucle interne.

Pour cette maille, on peut écrire :

$$V_1(t) = R_s i_s(t) + L_s \frac{di_s(t)}{dt} + V_{ao}(t) \quad (3.10)$$

Donc sa transformée de Laplace est de la forme :

$$V_1(p) = R_s i_s(p) + L_s p i_s(p) + V_{ao}(p) \quad (3.11)$$

Donc

$$V(p) - V_{ao}(p) = (R_s + L_s p) i_s(p) \quad (3.12)$$

Alors :

$$G_1(p) = \frac{i_s(p)}{V(p) - V_{ao}(p)} = \frac{1}{R_s(1 + \tau p)} ; \tau = \frac{L_s}{R_s} \quad (3.13)$$

#### III.4.2. Modélisation de la Boucle Externe :

La figure (3.8) nous donne une représentation de la boucle externe qui maintient la tension de capacité " $V_{dc}$ " à une tension de référence  $V_{dcref}$ .

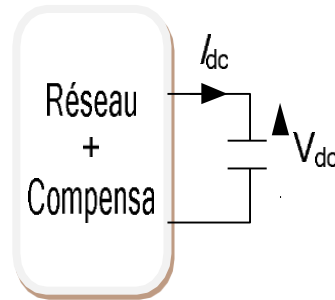


Figure (3.8) : modélisation de la boucle externe.

Pour le calcul de la fonction de transfert de cette boucle, on a :

$$V_{dc}(t) = \frac{1}{C} \int I_{dc}(t) \cdot dt \quad (3.14)$$

Ce qui donne :

$$I_{dc}(t) = C \frac{dV_{dc}(t)}{dt} \quad (3.15)$$

La transformation de Laplace nous donne :

$$I_{dc}(p) = C \cdot p \cdot V_{dc}(p) \quad (3.16)$$

D'où :



$$\frac{V_{dc}}{I_{dc}} = \frac{1}{Cp} \quad (3.17)$$

Donc :

$$H(p) = \frac{1}{Cp}$$

(3.18)

### III.4.3. Calcul de la Puissance Active :

La puissance active dans un réseau triphasé s'obtient par la relation :

$$P = V_1 i_1 + V_2 i_2 + V_3 i_3 \quad (3.19)$$

Sous forme matricielle :

$$P = [V_1 \quad V_2 \quad V_3] \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Dans le repère dq la puissance active devient :

$$P = \left[ M_{32} \cdot R(\theta) \begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix} \right]^t \cdot \left[ M_{32} \cdot R(\theta) \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} \right] \quad (3.21)$$

$$P = \left[ \begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix}^t \cdot R(\theta)^t \cdot M_{32}^t \right] \cdot \left[ M_{32} \cdot R(\theta) \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} \right] \quad (3.22)$$

$$P = \left[ \begin{bmatrix} V_d & V_q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -1 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \right]$$

$$\text{Donc :} \quad P = \frac{3}{2} (V_d i_d + V_q i_q) \quad (3.23)$$

### III.4.4. Calcul de la Puissance Réactive : [42]

Cette puissance n'est définie qu'en régime sinusoïdal. Elle est associée à la composante réactive du courant. On présente ici une méthode de calcul de telle façon on utilise la tension en quadrature (90°). La puissance obtenue est alors équivalente à la puissance réactive pour un système triphasé équilibré. Pour le calcul de la tension en quadrature, on utilise les tensions composées du réseau.

$$Q = \left( \frac{V_3 - V_2}{\sqrt{3}} \right) i_1 + \left( \frac{V_2 - V_1}{\sqrt{3}} \right) i_3 + \left( \frac{V_1 - V_3}{\sqrt{3}} \right) i_2 \quad (3.24)$$

Sous forme matricielle :

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot [i_1 \quad i_2 \quad i_3] \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}^t \cdot R(\theta)^t \cdot M_{32}' \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot M_{32} \cdot R(\theta) \cdot \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} i_d & i_q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{0}{2} \\ \frac{-1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{-1}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix}$$

Après calculs, on trouve :

$$Q = \frac{3}{2} (V_d i_q - V_q i_d) \quad (3.26)$$

### III.4.5. Régulation et contrôle du STATCOM : [42], [48]

e.1 Consignes de régulation de courant dans le repère dq :

Dans la totalité des applications pratiques le STATCOM est utilisé principalement pour compenser la puissance réactive au jeu de barre de connexion et par conséquent maintenir la tension de ce dernier. Pour cet objectif ce dispositif injecte ou absorbe un courant (i), qui est l'image de la puissance à compensée, ces courants ( $i_d, i_q$ ) sont donc les grandeurs de références du STATCOM qu'on déterminera à partir des puissances à injectées. Les consignes des puissances actives et réactives étant fixées, les composantes suivant les axes (d) et (q) des courants de consignes se calculent après mesure des composantes de PARK de la tension de réseau. On peut écrire :

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} V_d & V_q \\ -V_q & V_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Où les tensions  $V_d$  et  $V_q$  sont les tensions du jeu barre, les formes des courants suivant l'axe direct et en quadrature sont données par :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} V_d & V_q \\ -V_q & V_d \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{V_q^2 + V_d^2} \cdot \begin{bmatrix} V_d & -V_q \\ V_q & V_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Ce qui implique :

$$\begin{cases} i_{d\text{ref}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{V_d^2 + V_q^2} (P \cdot V_d + Q \cdot V_q) \\ i_{q\text{ref}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{V_d^2 + V_q^2} (P \cdot V_q - Q \cdot V_d) \end{cases} \quad (3.29)$$

Le système (3.28) fournit les composantes de PARK des courants à imposer en boucle ouverte. Nous pouvons résumer la méthode d'identification des courants de référence par l'algorithme de La figure (3.9) suivante :



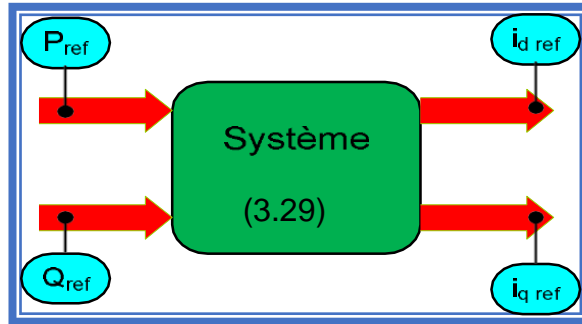


Figure (3.9) : identification des courants de référence dans le repère dq.

### e.2 Découplage, [40], [42], [48]

L'équation (3.28) montre que les courants active  $i_d$  et reactive  $i_q$  dépendent à la fois des courants sur les axes "d" et "q". Dans notre travail nous allons présenter, deux méthodes pour découpler notre système.

#### e.2 .1Découplage par réseau de découplage :

La figure (3.10) représente une de ces méthodes qui utilise un réseau de découplage placé en amont du système à régler. On soustrait des grandeurs de commande  $V_d$  et  $V_q$  la valeur nécessaire pour découpler parfaitement notre système. Les courants de référence  $i_{dref}$  et  $i_{qref}$  sont calculés suivant les équations (3.29). Ces valeurs de référence  $i_{dref}$  et  $i_{qref}$  sont ensuite comparées aux courants de ligne réels du récepteur. Les sorties des correcteurs PI en courants fournissent les valeurs des tensions de commandes  $V_{pd}$  et  $V_{pq}$ . La figure (3.9) représente le schéma de principe pour l'obtention du découplage.

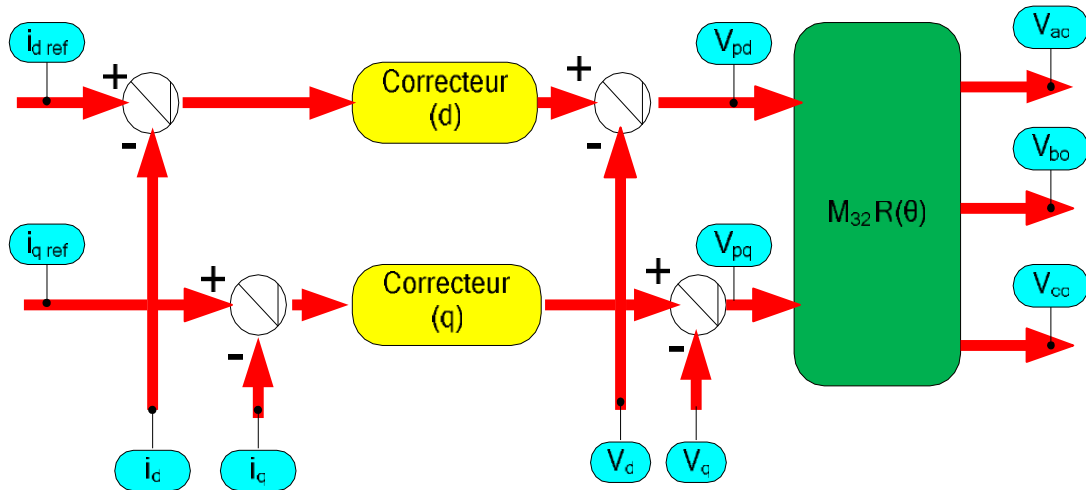


Figure (3.10) : régulation du courant réseau avec compensation de la tension réseau.

Cette méthode donne de très bons résultats. Elle a, cependant, un inconvénient certain : elle nécessite la connaissance avec une grande précision de tous les paramètres du système.

Si ce n'est pas le cas, ce découplage peut devenir un couplage supplémentaire et dégrader encore plus le réglage

#### e.2 .2Découplage approché :

La deuxième méthode se base directement sur le schéma structurel du system (fig (3.11)). Elle consiste à venir soustraire le produit de  $\omega L_s$  et  $i_{qref}$  du contrôleur selon l'axe d et d'ajouter le produit de terme  $\omega L_s$  et  $I_{dref}$  au contrôleur selon l'axe q. La conception du système de régulation doit commencer par la sélection des variables à régler et ensuite celle des variables de commande et leur association aux variables réglées.

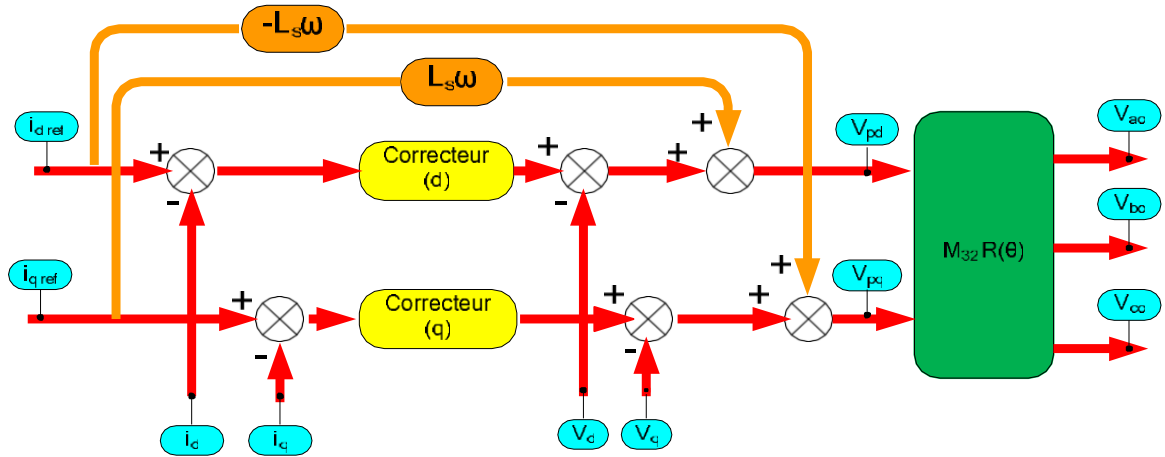


Figure (3.11) : régulation du courant réseau avec découplage approché.

Cette méthode donne de très bons résultats pour de petites valeurs de " $t_m$ ", ce qui correspond à une fréquence de pulsation élevée. Elle a l'avantage de ne pas nécessiter la connaissance de tous les paramètres du système.

### III.4.6 Étude des régulateurs : [42], [49]

Une fois que la fonction de transfert est identifiée et que son modèle approché est connu, il faut réaliser la fermeture de la boucle pour qu'il puisse y avoir asservissement. Éventuellement, il faut aussi corriger l'ensemble pour en améliorer les performances ; alors différents types de régulateurs peuvent être utilisés pour la régulation des boucles internes et externes.

Le choix du correcteur va dépendre des performances attendues du système en Boucle Fermée. Ces critères sont :

- La stabilité : le système est instable si sa sortie évolue indéfiniment sans modification de l'entrée (régime transitoire infini),
- La rapidité : c'est le temps que met le système à réagir pour arriver à sa valeur finale,
- La précision : elle est définie par l'erreur entre la valeur finale souhaitée et celle qui est réellement atteinte.

#### f.1 Utilisation du régulateur "PI" :

Il existe différentes techniques d'ajustement bien adapté au régulateur PI. Il existe deux approches empiriques bien connues proposées par Ziegler et Nichols, pour la détermination des paramètres optimaux du régulateur PI. La méthode de Ziegler-Nichols, utilisée dans cette présente thèse, est basée sur un essai conduit en boucle fermée avec un simple régulateur proportionnel analogique. Le gain  $K_p$  de ce régulateur est graduellement augmenté jusqu'à la limite de stabilité, ce qui se manifeste par un régime permanent oscillatoire. Sur la base des résultats ainsi obtenus, les paramètres du régulateur P I analogique donnés par la fonction de transfert.

$$K(P) = Kp \left(1 + \frac{1}{\tau P}\right) \quad (3.30)$$

On peut dire dans les conditions du convertisseur, le dépassement des courants doit être minimal. Par conséquent, l'introduction d'une condition simple :

$$K_i = (R_s/L_s).Kp \quad (3.31)$$

D'après l'équation précédente (3.13) on a :

$$\tau = \frac{L_s}{R_s} \quad (3.32)$$

On remplace (3.32) dans (3.31) on a :

$$K_i = (1/\tau).Kp \quad (3.33)$$

Ainsi (3.33) dans (3.30) on obtient la fonction de transfert  $F_{(pi)}$  sous la forme

$$K(P) = \left(Kp + \frac{Kp}{\tau P}\right)$$

$$F_{PI}(P) = Kp + \frac{K_i}{p} \quad (3.34)$$

La fonction de transfert de la boucle interne (3.13) associée à la fonction de transfert du régulateur PI en boucle ouverte sera :

$$FTBO [G_1(p), F_{PI}(p)] = \left(K_p + \frac{K_i}{p}\right) \cdot \left(\frac{1}{R_s(1 + \tau p)}\right) \quad (3.35)$$

On peut écrire la formule (3.35) sous la forme suivante :

$$FTBO [G_1(p), F_{PI}(p)] = \left(\frac{1 + \frac{K_p}{K_i} p}{\frac{R_s}{K_i} p + \frac{R_s \tau}{K_i} p^2}\right) \quad (3.36)$$

La fonction de transfert en boucle fermée est illustrée par :

$$FTBF [G_1(p), F_{PI}(p)] = \left(\frac{1 + \frac{K_p}{K_i} p}{1 + \frac{R_s + K_p}{K_i} p + \frac{R_s \tau}{K_i} p^2}\right) \quad (3.37)$$

La fonction du transfert de la boucle externe associée à la fonction de transfert du régulateur PI en boucle ouverte sera :

$$FTBO [H(p), F_{PI}(p)] = \left( K_p + \frac{K_i}{p} \right) \cdot \left( \frac{1}{Cp} \right) \quad (3.38)$$

$$FTBO [H(p), F_{PI}(p)] = \frac{P \cdot K_p + K_i}{C p^2} \quad (3.39)$$

La fonction de transfert en boucle fermée déduite est :

$$FTBF [H(p), F_{PI}(p)] = \left( \frac{1 + \frac{K_p}{K_i} p}{1 + \frac{K_p}{K_i} p + \frac{C}{K_i} p^2} \right) \quad (3.40)$$

Par ailleurs, un système de deuxième ordre est caractérisé par :

$$D(p) = \frac{1}{1 + \frac{2\zeta}{\omega_n} p + \frac{1}{\omega_n^2} p^2} \quad (3.41)$$

En comparant l'équation caractéristique (3.40) avec celle d'un système du deuxième ordre, on obtient :

$$\begin{cases} \frac{R_s + K_p}{K_i} = \frac{2\zeta}{\omega_n} \\ \frac{R_s \tau}{K_i} = \frac{1}{\omega_n} \end{cases}$$

Donc :

$$\begin{cases} K_p = R_s (2 \cdot \zeta \cdot \tau - 1) \\ K_i = R_s \cdot \tau \cdot \omega_n \end{cases} \quad (3.41)$$

De même, pour l'équation (3.36), on aura :

$$\begin{cases} \frac{K_p}{K_i} = \frac{2\zeta}{\omega_n} \\ \frac{C}{K_i} = \frac{1}{\omega_n^2} \end{cases} \quad (3.42)$$

On obtient les paramètres du régulateur PI ( $K_p$  et  $K_i$ ). Ces derniers sont obtenus par :

$$\begin{cases} K_p = C \cdot \omega_n \cdot 2\zeta \\ K_i = C \cdot \omega_n^2 \end{cases} \quad (3.43)$$

Pour avoir un bon coefficient d'amortissement du système en boucle fermée nous avons choisi  $\xi = 0.7$ . Et finalement on détermine à partir des équations (3.42) les valeurs des gains  $K_p$  et  $K_i$ .

## f.2 Utilisation du régulateur IP : [8], [42]

L'apparition d'un zéro dans la fonction de transfert en boucle fermée influe sur la réponse temporelle du système. Pour cela, on va utiliser un correcteur IP (sans zéro) illustré par la figure (3.12) :

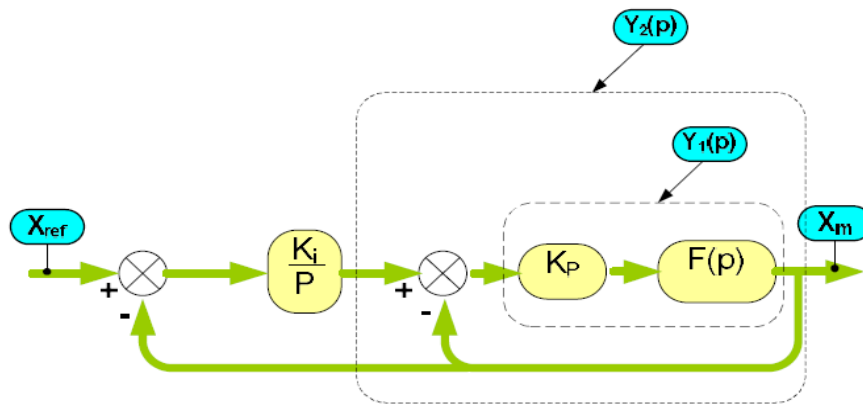


Figure (3.12) : régulation de la boucle fermée avec correcteur (IP).

La fonction de transfert de ce type de régulateur est donnée par :

$$Y_1(p) = K_p \cdot \left( \frac{1}{R_s(1 + \tau p)} \right) \tag{3.44}$$

$$Y_2(p) = \left( \frac{K_p}{R_s(1 + \tau p) + K_p} \right) \tag{3.45}$$

En utilisant les transformations de Laplace, on peut remplacer la figure (3.12) par la figure (3.13) :

$$Y_3(p) = \left( \frac{K_i}{p} \right) \cdot \left( \frac{K_p}{R_s(1 + \tau p) + K_p} \right) \tag{3.46}$$

$$Y_3(p) = \left( \frac{K_p}{P(R_s(1 + \tau p) + K_p)} \right) \tag{3.47}$$

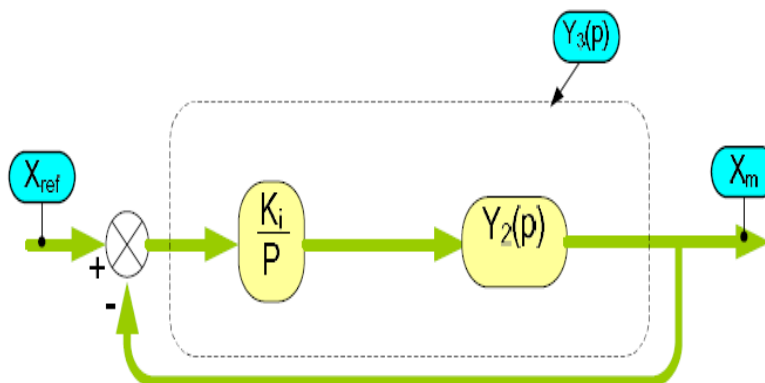


Figure (3.13) : régulation de la boucle fermée avec correcteur (IP).

donc on a :

$$FTBO[G_1(p), F_{IP}(p)] = \left( \frac{1}{1 + \frac{R_S + K_p}{K_i K_p} p + \frac{R_S \tau}{K_i K_p} p^2} \right) \quad (3.48)$$

$$\begin{cases} K_i = \frac{\omega_n \cdot \tau}{(2 \cdot \tau \cdot \zeta - 1)} \\ K_p = R_S (2 \cdot \tau \cdot \zeta - 1) \end{cases} \quad (3.49)$$

La fonction de transfert de la boucle externe associée à la fonction de transfert du régulateur IP en boucle ouverte est donnée par :

$$FTBO[H_1(p), F_{IP}(p)] = \left( \frac{1}{1 + \frac{1}{K_i} p + \frac{C}{K_i K_p} p^2} \right) \quad (3.50)$$

En comparant l'équation caractéristique 4.46 avec celle d'un système du deuxième ordre, on obtient :

$$\begin{cases} \frac{1}{K_i} = \frac{2\zeta}{\omega_n} \\ \frac{C}{K_i \cdot K_p} = \frac{1}{\omega_n^2} \end{cases} \quad (3.51)$$

D'après le système (4.50), les paramètres Kp et Ki du régulateurs (IP) sont donnés par :

$$\begin{cases} K_p = C \cdot \omega_n \cdot 2\zeta \\ K_i = \frac{\omega_n^2}{2 \cdot \zeta} \end{cases} \quad (3.52)$$

### III.5. SIMULATION

Dans notre travail, nous avons utilisé la commande d'un compensateur en utilisant deux types de régulateurs ("PI" et "IP"). Le type du compensateur utilisé est un onduleur multi niveaux.

Afin d'analyser les performances de ce type de commande du compensateur, nous allons effectuer un certain nombre de simulations. . Les résultats de simulation sont obtenus à l'aide du logiciel Matlab/Simulink. En utilisant la technique basée sur l'orientation des courants diphasés.

Étant donné que le système de contrôle du VSC utilise une techniques MLI à haute fréquence, le modèle VSC est simulé avec un pas de temps très faible (quelques millièmes de



seconde). En utilisant un tel pas de temps faible, il est possible d'observer la réponse du système globalement au cours du démarrage du système, les changements majeurs et même les variations au moment des défauts.

Toutefois, cela ralentit le processus de simulation et génère une quantité énorme de données. Cela peut servir, éventuellement, à approfondir l'étude des signaux résultants. Afin de simuler le système proposé, il est nécessaire de présenter le modèle du compensateur en se basant sur les équations différentielles du modèle, cela peut nous fournir une meilleure compréhension du comportement du système proche du "Système-réel". Les différents paramètres ont été donnés comme suit :

Paramètres du réseau  $R=0.1 \Omega$ ,  $L=0.5 \text{ mH}$ .

Paramètres des régulateurs,  $K_{pd} = 20$ ,  $K_{id} = 180$ ,  $K_{pv} = 0.05$ ,  $K_{iv} = 21$ .

Paramètres du compensateur. Tension réseau  $V_s = 2300 \text{ V rms / phase}$ , fréquences  $f= 50 \text{ Hz}$ ,

Puissance réactive échangée =  $\pm 200 \text{ kVar}$ , fréquence de modulation SPWM =  $1.25 \text{ KHZ}$ , tension continue ( $V_{dc} = 4300 \text{ V}$ ,  $C_{dc} = 1000 \mu\text{F}$ ).

La figure (3.14) présente le schéma bloc de commande de notre système.

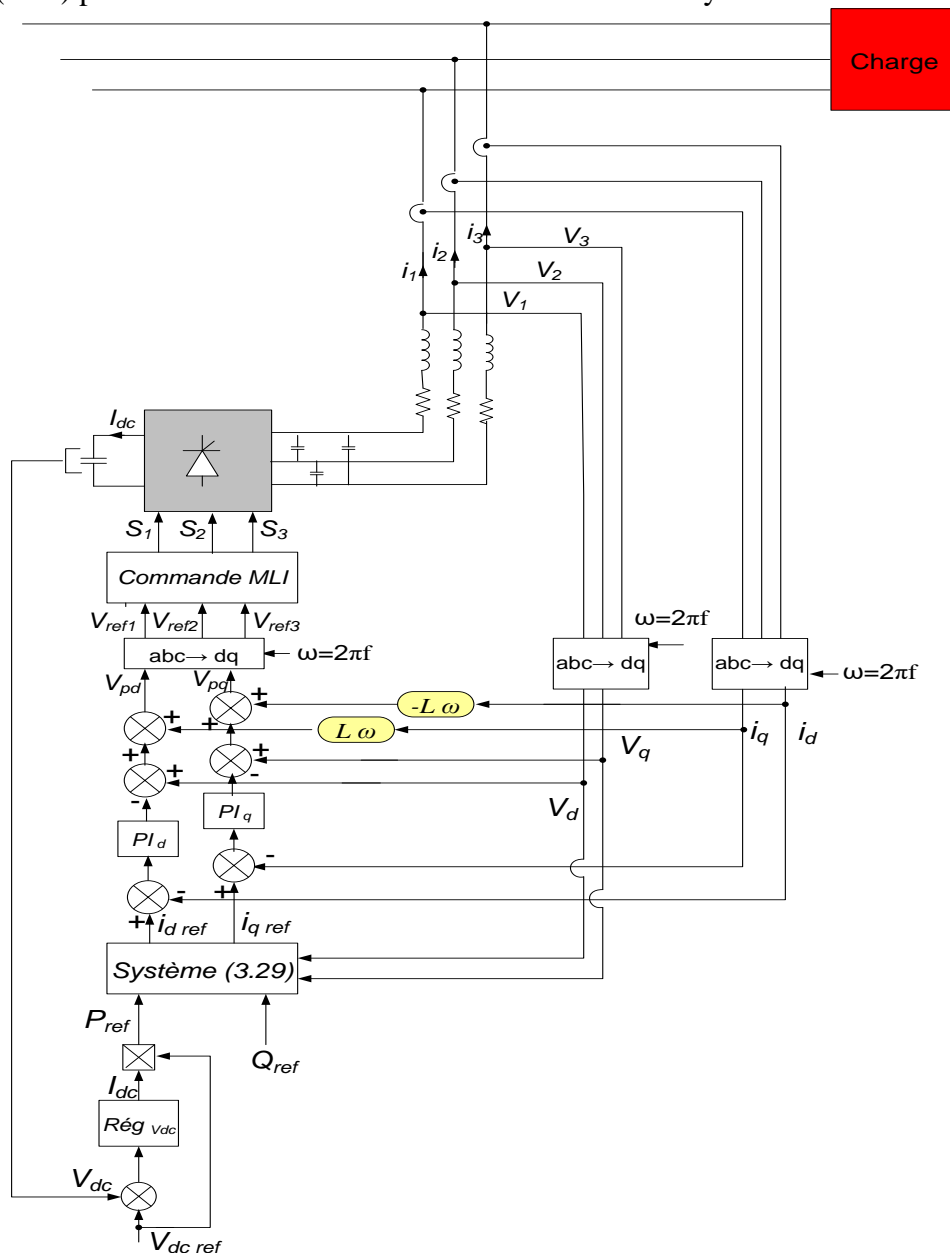


Figure (3.14) : schéma bloc du compensateur.

En premier lieu, la figure (3.15.a) présente la tension quasi-sinusoïdale produite par l'onduleur, ainsi que son spectre d'harmoniques (fig. 3. 15.d). Après, nous simulons le courant de phase  $I_s$  du compensateur par rapport à la tension  $V_s$  (Fig. 3. 15.b). Pour un premier changement de référence, on remarque que le courant est en retard de  $\frac{\pi}{2}$  par rapport à la tension ( $V_s$ ). A partir de  $t=0.2s$ , et pour un deuxième changement de référence, le courant est en avance de  $\frac{\pi}{2}$  par rapport à la tension ( $V_s$ ). La figure (3. 15.e) donne l'allure de la réponse dynamique de la puissance active qui reste toujours nulle dans les deux modes de fonctionnement du compensateur. Elle a la même allure que le courant direct ( $i_d$ ) car ils sont liés l'un à l'autre. On trouve également la réponse dynamique de la puissance réactive. Elle passe de  $+1$  pu (dans le cas où le convertisseur fournit de la puissance réactive) à une valeur de  $-1$  pu à partir de  $t=0.2s$  (lorsque le compensateur absorbe de la puissance réactive). Elle a la même allure que le courant en quadrature ( $i_q$ ).

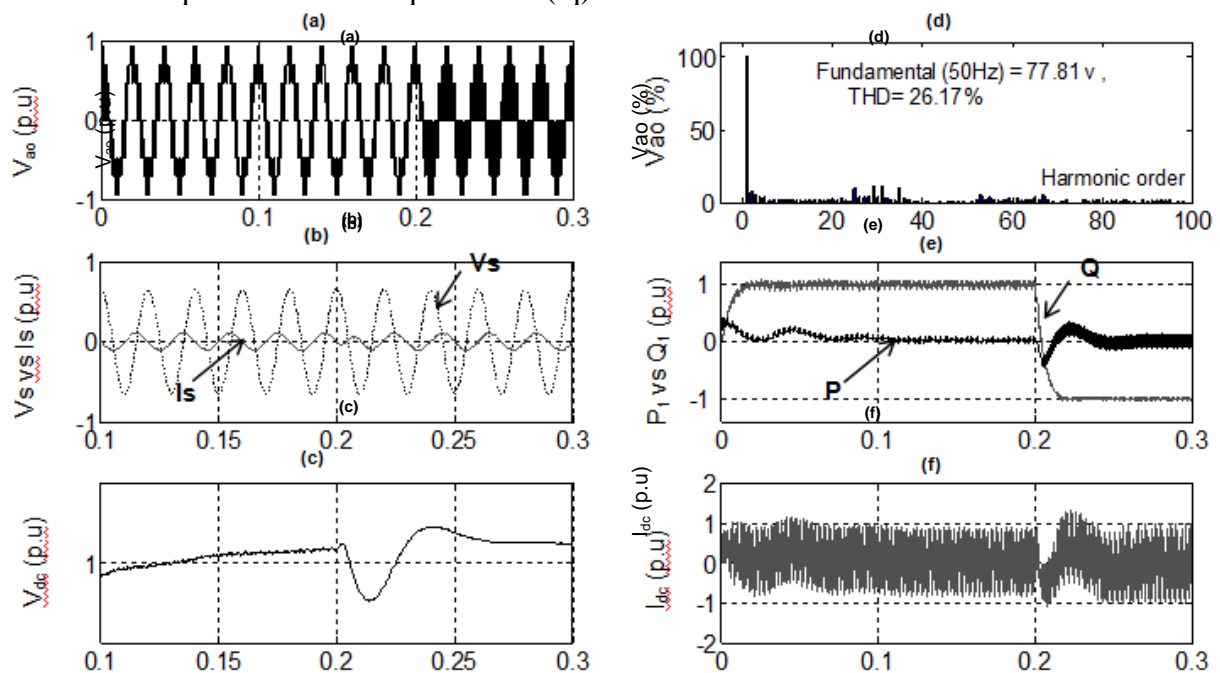


Figure. 3.15 – Réponses dynamiques d'un convertisseur type NPC à Trois niveaux utilisant la technique MLI sinusoïdale (avec un taux de modulation  $m=25$ ).

Du côté continu, la tension  $V_{dc}$  (fig. 3. 15.c) est maintenue, plus ou moins à une valeur de  $\pm 10\%$  autour de la valeur de référence 1 pu, quel que soit la variation des modes de fonctionnement.

En dernier lieu, on simule le courant  $I_{dc}$  (fig. 3. 15.f) côté continu qui passe dans le condensateur lors du mode inductif jusqu'à  $t=0.2s$ . En ce moment là, il passe en mode capacitif après un régime transitoire négligeable.

### III.6. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons fait une étude globale sur le compensateur statique d'énergie réactive, en particulier à l'aboutissement à un modèle mathématique basé sur l'orientation des courants diphasés : l'un sur l'axe direct "d", l'autre en quadrature "q". Il faut maintenir "Id" nul est assurer le contrôle de la puissance réactive par la composante "Iq". La tension d'entrée de l'onduleur est maintenue constante via un régulateur. Ainsi nous avons étudié aussi les boucles internes et externe, les boucles internes servent à régler les courants du réseau afin de minimiser leur contenu harmonique et d'échanger avec le réseau une

certaine puissance réactive, alors que, la boucle externe, finalement pour objectif de régler la tension de sortie du compensateur. Deux régulateurs ont été utilisés, et on a conclu qu'avec le correcteur IP sans zéro, on obtient des réponses très rapides et un régime transitoire acceptable.



---

*CONCLUSION GENERAL*

---



Les développements récents dans l'électronique de puissance permettent l'application de convertisseurs à base de semi-conducteurs dans le rôle de compensateur statique de puissance réactive.

Un tel compensateur présente beaucoup plus d'avantages que les compensateurs classiques.

Malheureusement, la tenue en tension des interrupteurs de puissance à base de semi-conducteurs n'est pas assez élevée pour les applications dans le domaine de haute tension.

Afin de franchir cette barrière, plusieurs interrupteurs peuvent être mis en série. Une autre solution est d'utiliser une topologie de convertisseurs à niveaux multiples, plus complexe. En même temps, l'utilisation d'un convertisseur à niveaux multiples résout le problème, d'introduction des harmoniques dans le système électrique. Une telle topologie nommée « onduleur cascade » est étudiée théoriquement dans ce mémoire.

Par ailleurs, un algorithme pour la compensation de la puissance réactive à été proposé. Il est basé sur le découplage des composantes principales de contrôle tel que les courants "Iq" et "Id". De même, nous avons étudié le comportement de notre modèle dans les trois modes de fonctionnement grâce a un régulateur : "PI". Enfin, nous souhaitons que ce travail soit un point d'intersection qui englobe plusieurs voies de recherche, et un pas en avant pour tout étudiant ou chercheur qui s'intéresse au domaine de la compensation de l'énergie réactive



---

*BIBLIOGRAPHIE*

---



---

## Bibliographie

---

### Chapitre I :

- [1]. "CHABANI Zeyneb" La part des énergies renouvelables dans le bilan énergétique national à l'horizon 2030" Mémoire de magister, Université Mohamed Bougara-Boumerdes. 2014.
- [2] "ATIA Tarek -ABDELGHANI Ahmed Amine " Modélisation des convertisseurs statiques Dc-Dc pour des applications Dans les énergies renouvelables (En utilisant MATLAB /Simulink)
- [3] "cours énergie et environnement 2eme année st Université de Batna 2 "
- [4] "ABBAD IMANE "Simulation de l'effet des paramètres climatiques (température Poussière et éclairement) sur le rendement d'une cellule solaire.
- [5] Mohammed Benhaddadi et Guy Olivier « Dilemmes énergétiques » Presses de L'université du Québec édition 2008,
- [6] LATRECHE Mohammed Tahar « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien » *Mémoire de magister*, Département d'Electrotechnique, Université Ferhat Abbas de Sétif UFAS-ALGERIE, 24/06/2012.
- [7] "Les énergies renouvelables : Un levier du développement pour Madagascar"
- [8] [ZITOUNI Hamza et BELHAMDOU Med Abdenour].
- [10] "FEDDAOUI Omar " Contribution à l'Etude des Systèmes Hybrides de Génération : Application aux Energies Renouvelables.
- [11] AZIZI Amina « Modélisation optimisation d'un système de production d'énergie Photovoltaïque avec un système de stockage hybride » Thèse Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat troisième cycle , université ANABA- MOKHTAR BADJI ,2019
- [12] Dr. BELAID LALOUNI Sofia, «Cours Energie Solaire Photovoltaïque», Cours de Magistère, Université A.MIRA de BEJAIA , Algérie, 2014.
- [13] HIDRI Imed, support de cours d'électronique de puissance E12, les convertisseurs AC-DC et AC-AC, Institut supérieur des études technologiques de Nabeul.
- [14] Dr. Abdelhakim DENDOUGA, 'Electronique de puissance avancée '. cours 1ère Année Master, Département de génie électrique , université Mohamed KHIDER , Biskra , ALGERE, 2014/2015.
- [15] Guy SEGUIER, FRANCIS LABRIQUE & PHILIPPE DELARUE, 'Electronique de puissance : structures, commandes et applications'. Ouvrage, 10e édition DUNOD, paris, France, 2004,2011,2015.
- [16] OTAY NABIHA , travaux pratique , Electronique de puissance , INSTINIT supérieure des en des technologiques des SILIANA 2015/2016.
- [17] Honoré de Balzac in «physiologie» Introduction au redressement monophasé non commandé.
- [18] G. SEGUIER, F. LABRIQUE, 'Les Convertisseurs de l'Electronique de Puissance', Tome 4 : La Conversion Continu-Alternatif', Edition Lavoisier, Technologie et Documentation, 1989.
- [19] B. Imed. " Etude d'un hacheur à stockage capacitif " Mémoire de master

- [20] Dimitar SPIROV, V. LAZAROV, D. ROYE, Z. ZARKOV, et O. MANSOURI, « Modélisation des convertisseurs statiques dc-dc pour des applications dans les énergies renouvelables en utilisant matlab/simulink », in Recueil des articles du Colloque Electrotechnique du Futur : EF2009, Compiègne, 2009, p. 9.
- [21] H. Le-Huy, « Introduction à MATLAB et Simulink ». Département de génie électrique et de génie informatique, Université Laval, Québec, CANADA, sept. 1998, [En ligne]. Disponible sur: <http://w3.gel.ulaval.ca/~lehuy/intromatlab/intromat.pdf>.
- [22] « DOC\_COURS\_PDF\_SIMULINK.pdf - Simulink Formation Simulink Pr Khalid BENJELLOUN Section Automatique et Informatique Industrielle Département Electrique | Course Hero ». <https://www.coursehero.com/file/42314452/DOC-COURS-PDF-SIMULINKpdf/> (consulté le août 06, 2020).
- [23] C. BISSIERES, « Formation-électronique-de-puissance-cours-19.pdf, » [En ligne]. Available: <https://www.electronique-mixte.fr/wp-content/uploads/2018/07/Formation-%C3%A9lectronique-de-puissance-cours-19.pdf>.
- [24] BIRAME M'Hamed, "commande floue d'un convertisseur AC/DC a UPF en cascade avec un convertisseur DC/DC double étage alimentant un SYSTEME de BIBERONAGE par super capacités d'un véhicule électrique " mémoire de Magister, Université Batna ,2003.
- [25] électronique de puissance Jacques LAROCHE DUNOD.
- [26] M. Sattler, Y. Liu, and C. EDRINGTON, " Comparison of linear and nonlinear buck converter models with varying compensator gain values for design optimization," in North American Power Symposium(NAPS), 2010, pp. 1–7, Sept. 2010.
- [26] N. Das, M. K. KAZIMIERCZUK, "Power Losses and Efficiency of Buck PWM DC-DC Power Converter "in Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, 2005, pp. 417-423.
- [27] VENET P., 2007. Amélioration de la sûreté de fonctionnement des dispositifs de stockage d'énergie. Habilitation à diriger les recherches, Université Claude Bernard - Lyon 1, 126p.
- [28] DIAB Y., 2009. Etude et modélisation des SCs : applications aux systèmes de puissance. Thèse de Docteur es-Sciences, Université Claude Bernard - Lyon 1, 235p.
- [30] ROJAT G., 2007, Nécessité de stockage de l'énergie pour le transport, Conférence RAEE.
- [31] DALMASSO J-L., 1986. Electronique de puissance : commutation, Technique Supérieur, Paris, 383 p.
- [33] RETIF J-M., 2008. Cours : Automatique régulation, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 138p.
- [36] LACHAIZE J., 2004, Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à pile combustible destiné à la traction , INP, Toulouse, 117p.
- [36] BASSO C., 2009. The right half plane zero, a two-way control path, Power Electronic and Technology, USA, 11p.
- [37] HIJAZI A., 2008, SlidingMode Control of Boost Converter : Application to energy storage systeme via supercapacitors. EPE Barcelona
- [38] FOREST F., FERRIEUX J.P., 1999, Alimentations à découpage convertisseurs à résonance, 3rd ed.: Dunod, 318p.
- [39] VIET D., 1977, "Conception d'une interface électronique de puissance pour pile à combustible" Thèse de Docteur es-Sciences, Université Joseph Fourier, Grenoble.
- [40] G. Grellet, G. Clerc « Actionneurs électriques, principes, modèles, commande,»Eyrolles, Paris 1997.



- [41] M.Yaïchi « Analyse de la technique de modulation vectorielle SVM (Space Vector Modulation) appliquée aux onduleurs multiniveaux». Mémoire de Magister. Université de Sidi Bel-Abbès. 2006
- [42] A. Aboudi, M. Ououabdi «Modélisation et commande d'un compensateur statique de Puissance réactive de type avancé» mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme D'ingénieur.
- [43] B. Singh, V. Mishra, R.K.P. Bhatt « Performance analysis of static condenser for ac Voltage regulation. Power factor correction and load balancing » LE(I) journal-EL, vol 84, Juin 2003.
- [44] A. Carlos, C. Cavaliere, E. H. Watanabe, M. Aredes « Multi-pulse STATCOM Operation under unbalanced voltages». 0-7803-7322-7/02/\$ 17.00© 2002 IEEE.
- [45]R.W. Menzies, Y. Zhuang « Advanced static compensation using a multilevel GTO Thyristor inverter ». 0885-8977/95/\$ 04.00© 1994 IEEE.
- [46] L. M. Tolbert, F. Z. Peng, T.G. Habetler « A Multilevel converter- based universal Power conditioner ». 0093-9994-7/00/\$ 10.00© 2000 IEEE.
- [47] C. J. Hatziadoniu, F. E. Chalkiadakis, V.K. Feiste « A power conditioner for a Grid-connected photovoltaic generator based on the 3-level inverter ». 0-7803-7322-7/02/\$ 17.00© 2002 IEEE.
- [48] M. Pellerin «Maquette didactique d'un FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System)». Projet de la réserve stratégique Hes-so. Juillet 2002.
- [49]M. K. Fellah « Cours d'asservissement». Université de Sidi Bel-Abbès. 2007



---

*WEBOGRAPHIE*

---



---

## *Webographie*

---

[W1] <https://professionnels.promotelec.com/fiche-dossier/domotique-service-personnes-agees-a-mobilite-reduite/> Consulté le 15/02/2020

[W1] <http://ressources.univlemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/chimie/06/deug/CHIMDISCRI/mission.html> (Consulté le 15/02/2023)

[W2] « DOC\_COURS\_PDF\_SIMULINK.pdf - Simulink Formation Simulink Pr Khalid BENJELLOUN Section Automatique et Informatique Industrielle Département Electrique | Course Hero ». <https://www.coursehero.com/file/42314452/DOC-COURS-PDF-SIMULINKpdf/> (consulté le août 06, 2023).

[W3] C. BISSIERES, « Formation-électronique-de-puissance-cours-19.pdf, » [En ligne]. Available: <https://www.electronique-mixte.fr/wp-content/uploads/2018/07/Formation-%C3%A9lectronique-de-puissance-cours-19.pdf> (Consulté le 15/08/2023)