

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA  
Faculté des nouvelles technologies de l'information et de la communication  
Département d'électronique et des télécommunications



Mémoire du projet de fin d'étude  
En vue de l'obtention du diplôme de

**MASTER PROFESSIONNEL**

Domaine : Sciences et technologies  
Filière : Electronique  
Spécialité : Instrumentation et systèmes

Présenté par :  
**NILI Abdennour**  
**RIDA Mohammed**  
**BELADJAL Zineddine**

**Thème:**

**Etude des défauts dans les systèmes de transport  
électrique**

Soutenu publiquement, le 17/06/2021, devant le jury composé de :

Mr ROUABAH Boubakeur	MCB	Encadreur	UKM Ouargla
Mr KAFI Mohamed Redouane	MCA	Président	UKM Ouargla
Mr BOUHAFS Ali	MAA	Examineur	UKM Ouargla

**Année universitaire 2020/2021**

## **REMERCIEMENT**

*Avant tout nous tenons à remercier **ALLAH** qui nous a aidé et nous a donné la patience et le courage de finir le mémoire ,Nous tenons à remercier vivement notre rapporteur **Mr ROUABAH Boubakeur** qui a fourni des efforts énormes, par ses informations ses conseils et ses encouragements .Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury(**Mr KAFI Mohamed Redouane** et **Mr BOUHAFS Ali**) pour L'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance Avoir fait l'honneur de l'examineur le jury de cette mémoire. Enfin, nous remercions mes amis et mes familles, **Nili** , **Rida**, **Beladjal** pour tous la motivation et de persévérance chaque jour .*

*Nous dédions cette réalisation chers à toutes nos familles, amis, professeurs Chacun en son nom et sa position, nos collègues du Spécialisation instrumentation et systèmes Merci.*

**Sommaire**

Introduction générale.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Chapitre I :État de l’art des systèmes transport électrique .....	3
I.1 Evolution des systèmes d’électrification ferroviaires .....	3
I.1.1 Le système d’électrification en courant continu actuel .....	4
I.1.2 Bilan comparatif des systèmes d’électrification existants .....	5
I.1.3 Une première étude d’évolution des électrifications à courant continu le système 2 x 1500 V ..	7
I.2 Etat de l’art des chaînes de traction .....	8
I.2.1 Les chaînes de traction actuelles .....	8
I.2.2 Perspectives d’évolution des chaînes de traction avec transformateur électronique : .....	10
Conclusion .....	11
Chapitre II : Convertisseurs multicellulaires .....	13
Introduction .....	13
II.1 Convertisseurs de puissance .....	13
II. 1.1 Les hacheurs .....	12
II.1.1.1 Hacheur série (Buck) .....	13
II.1.1.2 Hacheur parallèle (Boost) .....	13
II.1.1.3 Hacheur à accumulation inductive (Buck &Boost) .....	13
II.1.2 Les onduleurs.....	14
II.1.3 Les redresseurs .....	14
II.2 Les convertisseur multi-niveaux.....	15
II.3 Des structures de conversion multiniveaux.....	15
II.4 Convertisseur Multicellulaire Série .....	16
II.4.1 Principe de base d’un convertisseur multicellulaire série.....	17
II.4.2 Modélisation d’un hacheur multicellulaires série à N cellules.....	18
II.4.2.1 La Fonctionnement hacheur abaisseur .....	18
II.4.2.2 Onduleur multicellulaire avec la commande Modulation de Largeur d’impulsion (MLI).....	20

## LES LISTE

---

II.4.3 La commande par mode glissant d'un convertisseur multicellulaire.....	22
II.4.3.1 Définition de la commande par mode glissant.....	22
II.4.3.2 Choix de la surface de glissement.....	22
II.4.3.3 Condition d'existence de convergence.....	22
II.4.3.4 Détermination de la loi de commande.....	23
II.4.4 Application de la commande par mode glissant sur convertisseur multicellulaire.....	24
II.5 Simulation de l'hacheur multicellulaire avec la commande par mode glissant.....	26
Conclusion.....	28
Chapitre III : diagnostic des défauts d'un convertisseur multicellulaire .....	30
Introduction.....	30
III.1 Statistiques des défauts du convertisseurs .....	30
III.2 Différents types de défauts des convertisseurs statiques .....	31
III.2.1 Défaillances de type bas impédance .....	31
III.2.2 Défaillances de type haut impédance.....	32
III.3 Diagnostic de défauts .....	32
III.3.1 Méthodes de diagnostic et classification.....	32
III.3.2 Diagnostic de défauts de type circuit-ouvert des composants de puissance dans un convertisseur statique .....	33
III.3.2.1 Approche signal.....	33
III.3.2.2 Approche modèle .....	34
III.4 Convertisseur multicellulaire utilisés dans le système de transport électrique.....	35
III.5 Résultats de simulation.....	36
III.5.1 Défaut d'un condensateur flottant.....	36
III.5.2 Défaut de deux condensateur flottant .....	37
Conclusion .....	38
Conclusion générale .....	40

**LISTE DES FIGURES**

TITRE	PAGE
Figure I.1- Exemple de système d'électrification ferroviaire (25 kV/50Hz).	2
Figure I.2 –Schéma simplifié d'une électrification ferroviaire en courant continu	4
Figure I.3 – Exemple d'une caténaire dans le cas d'une électrification en courant continu (1,5 kV ou 3 kV).	4
Figure I.4 – Principe du système 2x1,5 kV [19].	7
Figure I.5 – Chaîne de traction classique pour caténaire DC	8
Figure I.6 – Chaîne de traction classique pour caténaire AC.	8
Figure I.7 Schéma de la chaine de traction 25 kV à transformateur électronique.	9
Figure II.1 différent types de convertisseur de puissance	12
Figure II.2 Hacheur série	13
Figure II.3 Hacheur parallèle	13
Figure II.4 Hacheur à accumulation inductive	14
Figure II .5 structure d'onduleur	14
Figure II .6 structure du redresseur	15
Figure II.7 Classification des structures de conversion multiniveaux	16
Figure II.8 Structure du convertisseur multicellulaire	16
Figure II.9 Hacheur multicellulaire à trois cellules	17
Figure II.10 Onduleur multicellulaire monophasé à N cellules	20
Figure. II.11 Commande MLI de l'onduleur multicellulaire à trois cellules.	21
Fig. II.12 La tension de charge de l'onduleur multicellulaire à trois cellules.	22
Fig. II.13 Equilibrage naturel des tensions des condensateurs flottants de l'onduleur multicellulaire à trois cellules.	22
Figure II.14 Modes de fonctionnement.	25
Fig. II.15 Tension continu $V_{dc}$ et les tensions des condensateurs flottants	27
Fig. II.16 Courant de la charge	28

## LES LISTE

---

Figure III.1 . Statistiques des défaillances dans les chaînes de conversion d'énergie.	31
Figure III.2 Classification des méthodes de diagnostic des défauts.	32
Figure III.3 . représente un système de transport ferroviaire électrique à base du convertisseur multicellulaire (DC/DC)	35
Figure III.4 Défaut de capacité dans un Redresseur multicellulaire à trois cellules.	36
Figure III.5 Courant de charge	36
Figure III.6 Tensions des condensateur flottants	37
Figure III.7 Courant de charge	37
Figure III.8 Tensions des condensateur flottants	38

## LISTE DES TABLEAUS

TITRE	PAGE
Tableau I.1 Bilan comparatif des systèmes d'électrification existants.	5
Tableau II.1 les types de redresseurs	14
Tableau II.2 les configuration possibles du convertisseur multicellulaires trois cellules	18
Tableau II.3 Les paramètres de simulation de l'hacheur multicellulaire	26

**LISTE DES Abréviation**

<b>Symboles</b>	<b>Abréviations</b>
<b>MMC</b>	les convertisseurs modulaires multi niveaux
<b>SMC</b>	Le Convertisseur Multicellulaire Superposé
<b>ANPC</b>	Le Convertisseur Clampé Activement par le Neutre
<b>ASNPC</b>	le Shared ASNPC, qui partie d'une structure NPC

# **Introduction générale**



## **Introduction générale**

Ces dernières années, les chemins de fer électrifiés et les trains à grande vitesse électriques contribuent au développement rapide de notre société. Ces chemins de fer sont préférés en raison de ses multiples avantages tels que plus propres, plus efficaces. Dans les chemins de fer à courant continu, l'utilisation croissante et l'élargissement des réseaux nécessitent une augmentation de la tension continue (0,75 kV, 1,5 kV et 3 kV). Les réseaux et sous-stations MVDC nécessitent un convertisseur électronique de puissance adapté qui offre une contrainte de haute tension.

L'électronique de puissance est actuellement, très présente dans l'industrie vue son très vaste champ d'application comme les alimentations régulées ou bien le contrôle des machines électriques. Afin de répondre aux besoin grandissant de l'industrie, les puissances commutées par les convertisseurs statiques sont de plus en plus élevées, et dans l'applications haute puissance l'apparition des convertisseurs multicellulaire série apporte des solutions efficaces [1-2].

Les convertisseurs multicellulaires ont été utilisés dans le but de générer une tension de sortie multi niveaux, et de réduire les contraintes en tension sur les composants de puissance Le convertisseur multicellulaire est commandé en boucle ouverte lorsqu'aucune boucle de rétroaction ne vient contrôler les variables d'état du système.

Le premier avantage de ces convertisseurs est la réduction des contraintes en tension sur les interrupteurs. et aussi les convertisseurs multicellulaires série permettent aussi d'améliorer la forme d'onde de la tension de sortie et permettent plus de flexibilité pour obtenir des différents niveaux de tension (par rapport à la structure NPC) [3].

Cependant, les défaillances dans les interrupteurs de puissance ou dans les condensateurs peuvent modifier les valeurs de sortie du système et déstabiliser le réseau ferroviaire à courant continu. Par conséquent, il est nécessaire d'étudier les différents défauts dans ce type des convertisseurs.

Dans ce mémoire, nous avons parlé au premier chapitre à l'industrie du ferroviaire peut donc bénéficier de cette synergie et intégrer ces nouvelles technologies. Un système unifié capable, en plus d'alimenter des trains, d'intégrer des sources d'énergie renouvelables et donc de transporter et de distribuer de l'énergie électrique.

Et dans le deuxième chapitre. Après un rapide balayage de différentes structures de convertisseurs multiniveaux. Nous avons présenté dans ce chapitre le principe de fonctionnement du convertisseur multicellulaire et leur modèle mathématique avec le modèle aux valeurs instantanées et nous allons utiliser la commande par mode glissant.

Dans le troisième et dernier chapitre, nous avons parlé sur les défauts dans le convertisseur multicellulaire et ses types et les méthodes de diagnostic.

# **Chapitre I**

## **Etat de l'art des systèmes transport électrique**

## Chapitre I :État de l'art des systèmes transport électrique

### I.1 Evolution des systèmes d'électrification ferroviaires :

Dans son principe, le système de traction électrique ferroviaire est composé par des installations fixes (sous-stations, caténaires, rails) et par le matériel roulant (train de fret ou de voyageurs tracté par une locomotive). Dans la plupart des cas, l'alimentation en énergie électrique de la locomotive est assurée via une ligne aérienne appelée la caténaire. Un pantographe, équipé d'un frotteur, permet à l'engin de traction de capter le courant. Le système d'alimentation par troisième rail est généralement limité au métro et n'est que très rarement utilisé pour des liaisons intercity. La Figure(I.1) présente un exemple de système d'électrification ferroviaire par ligne aérienne avec caténaire et pantographe.

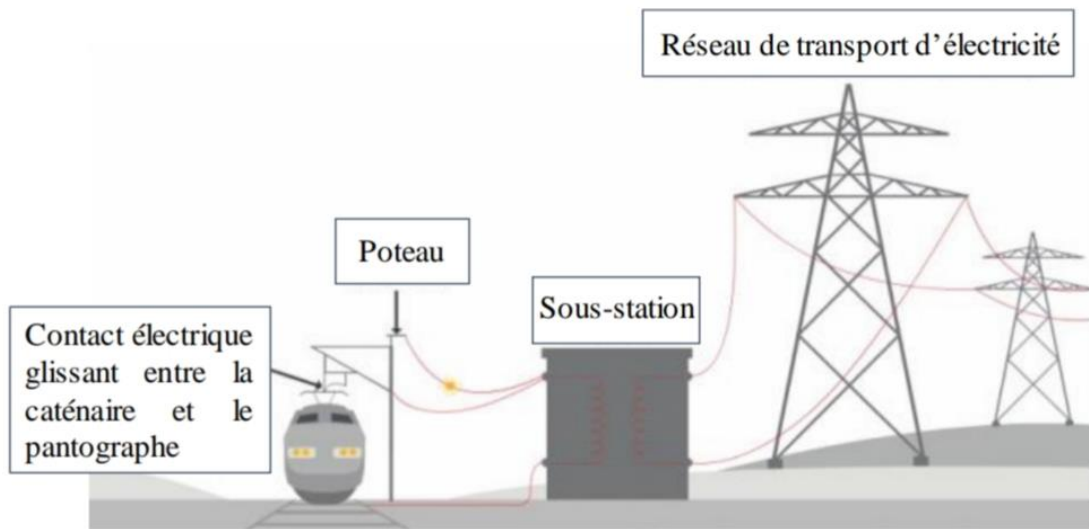


Figure I.1- Exemple de système d'électrification ferroviaire (25 kV/50Hz).

Les premières électrifications des lignes ferroviaires remontent à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. L'objectif était d'assurer le transport des marchandises et des personnes sur de longues distances en disposant d'une puissance de traction supérieure à celle des locomotives à vapeur [5]. A l'origine, pour équiper les engins de traction, c'est le moteur à courant continu à excitation série, qui fut choisi. Grâce à sa caractéristique couple/vitesse à puissance constante, ce moteur est « naturellement » adapté à la traction ferroviaire : Il permet de disposer d'un effort de traction important au démarrage puis de faire circuler à vitesse élevée le train. Compte tenu des limites imposées par la technologie des matériaux isolants de l'époque, la tension de la caténaire fut dans un premier temps fixée à 600 V continu. En l'absence de dispositif électronique de puissance, l'effort de traction de la locomotive était

contrôlé grâce à des résistances placées en série avec le moteur qui permettaient de limiter le courant et donc le couple électromagnétique. Ce système de traction électrique avait une capacité très limitée à cause des courants élevés circulants dans la caténaire et de la chute de tension qui en résultait. Cela constituait donc un frein au déploiement de l'électrification des lignes interurbaines où le trafic était en forte croissance.

A partir de 1902, la société Suisse(Oerlikon) décida de combiner les avantages du courant alternatif, dont la tension pouvait facilement être élevée ou abaissée par des transformateurs, et du moteur série à courant continu. Toutefois, dans la gamme de puissance visée à l'époque (quelques centaines de kW), il s'est avéré très difficile d'utiliser le moteur série à la fréquence industrielle de 50 Hz, ceci principalement à cause de problèmes de commutation du courant au niveau des lames du collecteur et du mauvais facteur de puissance. Après quelques essais, il fut décidé de baisser la fréquence du courant alternatif jusqu'à 16,7 Hz [6] [7]. Afin d'alimenter le système de traction électrique, il a donc fallu déployer des centrales de production et des lignes de transport d'énergie électrique spécifiques. Le système d'électrification 15 kV/16,7 Hz fut définitivement adopté à partir de 1909 en Suisse et en Allemagne, en Suède l'année suivante, puis en Autriche et en Norvège respectivement en 1914 et en 1922.

### **I.1.1 Le système d'électrification en courant continu actuel :**

Généralement les tensions inférieures à 1 kV sont réservées aux réseaux urbains tel que le tramway ou le métro. En revanche, les tensions supérieures ou égales à 1,5 kV sont utilisées pour l'électrification de lignes régionales ou interurbaines. Conformément à la Figure(I.2), les principaux constituants des installations fixes sont : le groupe transformateur redresseur situé dans la sous-station (SST), les équipements électriques (protection, mesures, poste de sectionnement, etc...), le poste de mise en parallèle (PMP) et les caténaires[8].

Les sous-stations sont connectées directement au réseau public et prélèvent l'énergie sur les trois phases. Typiquement, elles sont alimentées en 90 kV ou 63 kV et plus rarement en 20 kV Figure( I.2). Les groupes transformateur-redresseur à diodes ont des niveaux de puissance qui peuvent atteindre 10 MW et présentent généralement un indice de pulsation de 12 sur la tension de sortie. De ce fait, vis-à-vis du réseau alternatif amont, ils absorbent des courants avec un faible taux de distorsion harmonique et présentent un très bon facteur de puissance Pour assurer la protection de la ligne vis-à-vis d'un court-circuit caténaire-rail, des disjoncteurs rapides sont installés dans les postes de mise en parallèle et en sortie des sous-stations. Par ailleurs, le rail est isolé de la terre afin d'éviter la dispersion de courants continus dans le sol pouvant provoquer la corrosion de structures métalliques proches de la voie ferrée. Du fait de cette isolation, une surveillance du potentiel du rail par rapport au sol est alors nécessaire pour protéger les personnes La distance entre les sous-stations dépend du niveau de tension de la caténaire, du profil de la ligne et de la densité de trafic. Cela peut aller de quelques kilomètres jusqu'à une trentaine de kilomètres. Ces dernières années, au fur et à mesure de la croissance du nombre 13 de voyageurs à transporter et donc de l'augmentation des puissances absorbées par les rames, le système d'électrification en courant continu s'est avéré inapte à assurer des grilles de trafic denses. Afin de limiter les chutes de tension en ligne et permettre le fonctionnement à puissance nominale du matériel roulant, les sections des caténaires ont été augmentées et de nombreuses sous-stations ont été ajoutées. Rendant ainsi l'électrification en courant continu très coûteuse. Par exemple, sur les lignes électrifiées en 1,5 kV en France, il est possible trouver des sections de ligne aérienne jusqu'à 1000 mm<sup>2</sup> pour chaque voie (deux fils de contact, un porteur principal, un porteur auxiliaire et un feeder). A ce titre, la Figure(I.3) présente le schéma simplifié d'une ligne aérienne. Nous

faisons ici une distinction entre caténaire et ligne aérienne. La caténaire est l'ensemble de conducteur (fil de contacts et porteurs) soumis à des efforts mécaniques permettant d'assurer un bon contact électrique avec le pantographe. Les autres conducteurs de la ligne aérienne, appelés « feeders », ont une fonction exclusivement électrique. Ils sont régulièrement connectés à la caténaire[8].

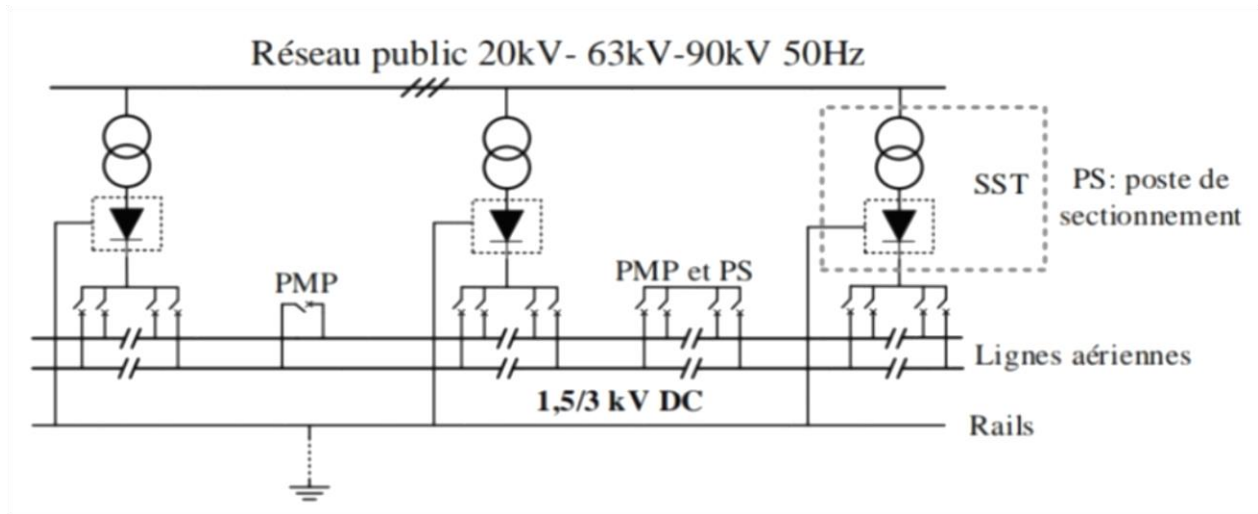


Figure I.2 –Schéma simplifié d'une électrification ferroviaire en courant continu

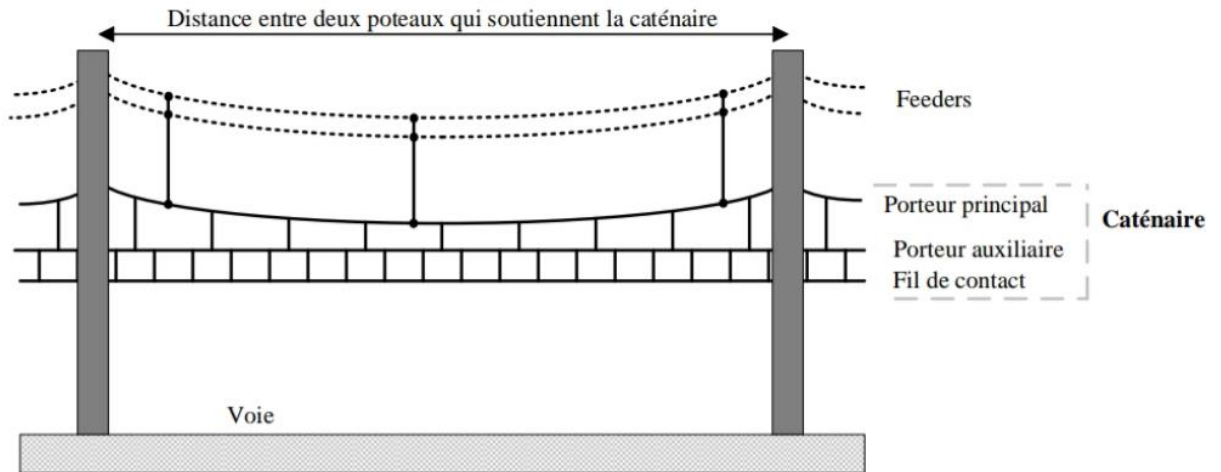


Figure I.3 – Exemple d'une caténaire dans le cas d'une électrification en courant continu (1,5 kV ou 3 kV).

### I.1.2 Bilan comparatif des systèmes d'électrification existants :

Le Tableau( I.1) permet d'avoir une vision d'ensemble en considérant les aspects liés à l'alimentation en énergie, les installations fixes de traction électrique et le matériel roulant.

Le systèmes d'électrification à courant continu actuel souffrent d'un niveau de tension relativement bas qui limite la puissance de la locomotive et la densité du trafic en raison des courants élevés dans la caténaire. De par le niveau de tension de la caténaire,

Les systèmes d'électrification en courant alternatif permettent d'utiliser des lignes aériennes de faible section, en revanche la chute de tension est principalement liée à la réactance du circuit de traction et des moyens de compensation de puissance réactive sont parfois utilisés pour remonter la tension en ligne. Le système 25 kV/50 Hz étant de ce point de vue le plus pénalisé. Le système 15 kV/16,7 Hz nécessite un réseau d'alimentation en énergie spécifique mais permet, comme dans le système à courant continu, une connexion en parallèle des sous-stations. La puissance consommée par les trains est mieux répartie entre les sous-stations et il y a une continuité d'alimentation en énergie des trains le long de la ligne. Dans le système,

25 kV/50 Hz, les sous-stations monophasées nécessitent une puissance de court-circuit élevée au point de raccordement pour éviter les déséquilibres de tension sur le réseau triphasé. Par conséquent, les sous-stations doivent être équipées de systèmes de compensation de déséquilibre [8], [9] ou connectées à des lignes haute tension en 220 kV ou 400 kV. En ce qui concerne le matériel roulant, les locomotives modernes à courant alternatif comprennent un transformateur abaisseur monophasé, un redresseur, un filtre basse fréquence (accordé sur 33,4 Hz ou 100 Hz) et un onduleur de tension triphasé qui alimente le moteur de traction à courant alternatif [5]. En revanche, le convertisseur de traction embarqué d'une locomotive à courant continu est beaucoup plus simple et se réduit à un filtre d'entrée et à un onduleur de tension triphasé.

Système d'électrification	Courant continu : 1,5 kV ou 3 kV	Courant alternatif à fréquence spéciale 15 kV / 16,7 Hz	Courant alternatif à fréquence industrielle 25 kV/50 Hz
Alimentation en énergie	En triphasé à partir du réseau public	Réseau spécifique de production et de transport d'électricité, alternateurs et transformateurs volumineux	sous-station : transformateurs monophasés
	Groupe transformateur-redresseur en sous-station	Sous Station complexe si alimentation à partir du réseau public	Caténaire légère (fil de contact + porteur, $S \approx 270 \text{ mm}^2$ )
Infrastructure	Section de la ligne aérienne importante : jusqu'à 1000 mm <sup>2</sup>	Caténaire légère (fil de contact + porteur, $S \approx 270 \text{ mm}^2$ )	Caténaire légère (fil de contact + porteur, $S \approx 270 \text{ mm}^2$ )
	Appareillage de coupure pour le courant continu, courant de court-circuit élevé (qq 10 kA)	Appareillage de coupure en alternatif mais niveau de courant court-circuit plus important qu'en 50 Hz	Appareillage de coupure pour le courant alternatif
	Distance entre sous-stations : 10 à 30 km	Distance entre sous-stations : 60-80 km	Distance entre sous-stations : 40-60 km
	Inapte à l'alimentation des LGV	Sous-station équipée par un seul transformateur qui est très volumineux	Complexité de l'alimentation des LGV en 2 x 25 kV

Circuit électrique de traction	Chute de tension importante – Pertes joules	Chute de tension inductive	Chute de tension inductive, compensation de puissance réactive parfois nécessaire
	Pas de section neutre, continuité du circuit électrique	Pas de section neutre, continuité du circuit électrique	Sectionnement du circuit électrique : perte de puissance pour la traction
	Partage de la puissance entre les sous-station	Partage de la puissance entre les sous-stations	Puissance totale fournie par une seule sous-station
Matériel Roulant	Circuit de puissance très simple : filtre + onduleur de traction	Conversion AC/DC à bord de l'engin : transformateur et filtre à 2.f très volumineux	Conversion AC/DC à bord de l'engin : transformateur et filtre à 2.f volumineux.

*Tableau I.1 Bilan comparatif des systèmes d'électrification existants.*

**I.1.3 Une première étude d'évolution des électrifications à courant continu le système 2 x 1500 V :**

Comme nous venons de l'indiquer dans les paragraphes précédents, les systèmes d'électrification à courant continu actuels peuvent difficilement faire face aux perspectives d'évolution du trafic et à l'augmentation de la puissance des trains. Afin de réduire la résistance du circuit de traction, les sections des lignes aériennes ont été augmentées jusqu'aux limites mécaniques admissibles par les supports de caténaire. Ainsi, pour limiter une chute de tension excessive, il est nécessaire de rajouter des sous-stations intermédiaires. Malheureusement, compte tenu de contraintes géographiques, cette solution n'est pas toujours envisageable car elle demande de l'espace pour l'installation de la sous-station et la proximité d'une ligne triphasé haute tension pour se raccorder. Pour cette raison plusieurs solutions alternatives ont été proposées. Les solutions avec système de stockage au sol [10],[11] (batteries, super-condensateurs, roues inertielles) sont plus adaptées pour des lignes urbaines avec des métros ou des trains légers et ont été largement déployées au Japon à partir des années 2000.

Pour les lignes régionales ou interurbaines où les puissances absorbées par le matériel roulant sont importantes, la SNCF et le LAPLACE ont proposé et étudié en 2006 [12] le système « 2 x 1500 V ». L'idée de base reprend le concept du système 2 x 25 kV à courant alternatif développé pour les lignes à grande vitesse. Il s'agit de réutiliser le feeder déjà installé en parallèle à la caténaire à 1,5 kV et de le porter à un potentiel différent.

L'alimentation du feeder est assurée par des nouveaux groupes redresseurs installés dans les sous-stations existantes. Conformément à la Figure( I.4), un convertisseur continu-continu (hacheur) est installé entre deux sous-stations afin de remonter le niveau de tension en milieu de secteur. Ce convertisseur permet de transporter, via le feeder, une partie de l'énergie absorbée par les trains sous une tension double de la tension caténaire. Ainsi, dans certaines

portions du circuit de traction les courants seront réduits, les chutes de tension minimisées et le rendement amélioré.

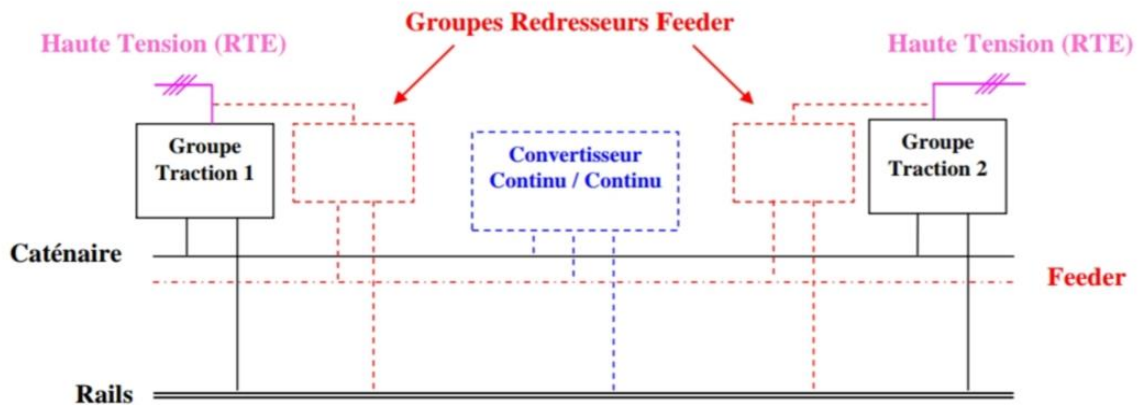


Figure I.4 – Principe du système 2x1,5 kV [19].

en 2008, ce système a été validé sur la plateforme de test de la SNCF à Vitry sur Seine. Le convertisseur continu-continu, basé sur un hacheur multiniveau à cellules imbriquées, d'une puissance de 800 kW, a été entièrement réalisé par le LAPLACE [13]. Suite à ces travaux, la SNCF a envisagé d'implanter le système 2 x 1500 V sur certaines lignes de son réseau. Toutefois, par rapport à un renforcement classique avec ajout d'une sous-station intermédiaire, l'avantage économique ne s'est pas avéré suffisamment significatif. D'autre part des études complémentaires ont démontré que, d'un point de vue du rendement du circuit de traction.

## I.2 Etat de l'art des chaînes de traction :

### I.2.1 Les chaînes de traction actuelles :

De la fin du 19ème siècle jusqu'aux années 70, c'est le moteur à courant continu à excitation série qui a systématiquement été utilisé. Le réglage de l'effort de traction des locomotives était alors assuré grâce à des combinaisons de rhéostats connectés en série avec l'induit et/ou en parallèle de l'inducteur. Un jeu de contacteurs électromécaniques permettait alors différents couplages électriques des moteurs de traction et de ces rhéostats.

Dans les années 70, l'introduction des thyristors de puissance a permis de se passer des circuits à rhéostats et de simplifier la chaîne de traction avec, selon le système d'électrification, l'utilisation de hacheurs ou de redresseurs pour alimenter les moteurs à courant continu. A partir du milieu des années 80, les composants à blocage commandé, d'abord le GTO puis l'IGBT, ont permis la réalisation d'onduleurs de tension dont les niveaux de tension et de puissance étaient compatibles avec la traction électrique ferroviaire. Les moteurs triphasés, asynchrone ou synchrone, ont alors supplanté les moteurs à collecteurs. Depuis plus de dix ans, les chaînes de traction utilisent des modules IGBT pour la réalisation des convertisseurs. Pour les engins de traction circulants sous caténaire à courant continu, le circuit électrique de la chaîne de traction est très simple. Conformément à la



Figure I.5, il se réduit à un filtre d'entrée et un onduleur triphasé qui fonctionnent directement sous la tension de la caténaire. Les modules IGBT utilisés ont des calibres en tension respectivement de 3,3 kV ou 6,5 kV selon que l'engin est prévu pour circuler sous caténaire 1,5 kV ou 3 kV. Pour les matériels circulants sous caténaire à courant alternatif, le circuit électrique de la chaîne de traction, présenté à la Figure( I.6), comprend un transformateur abaisseur, un redresseur actif, des éléments de filtrage et l'onduleur de tension triphasé [14]. Il faut ici noter que le prélèvement de l'énergie électrique sur une caténaire monophasée, nécessite sur le bus continu un filtrage de la puissance fluctuante. Celui-ci est très volumineux, notamment en 16,7 Hz. Le niveau de tension du bus continu est généralement de 3 kV ou de 1,5 kV, ce qui permet d'avoir un engin de traction dit « bicourant » apte à circuler sous une tension caténaire alternative ou continu.

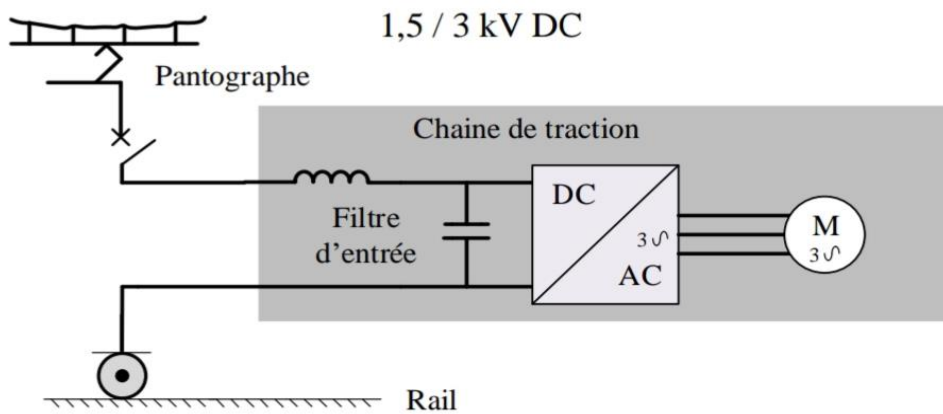


Figure I.5 – Chaîne de traction classique pour caténaire DC

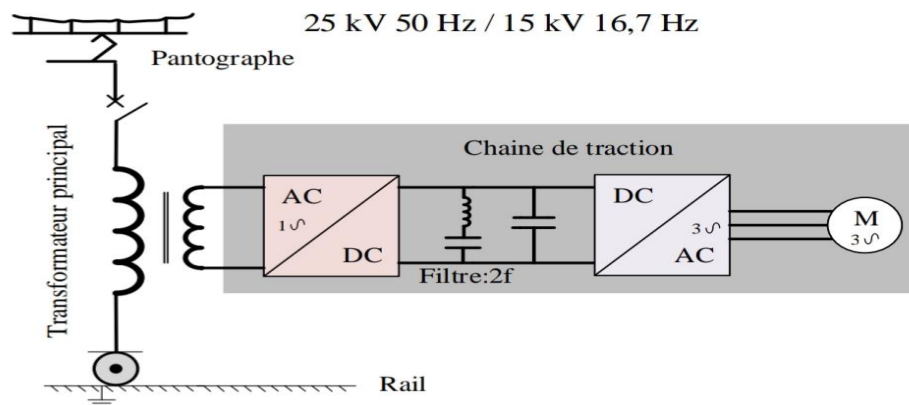


Figure I.6 – Chaîne de traction classique pour caténaire AC.

**I.2.2 Perspectives d'évolution des chaînes de traction avec transformateur électronique :**

Afin de rivaliser avec les autres modes de transport, le rail se doit d'augmenter la vitesse des trains et d'améliorer le confort des passagers en optimisant l'espace à bord des trains. Pour les automotrices, utilisées dans les liaisons suburbaines ou intercités, la propulsion électrique répartie constitue la réponse adéquate pour atteindre ces objectifs [15]. Cela implique par contre la réduction de la masse et du volume de la chaîne de traction ainsi que l'amélioration du rendement, de la puissance massique et de la fiabilité. Actuellement, le transformateur d'entrée, qui fonctionne à la fréquence de la tension caténaire, est l'élément critique de la chaîne de traction car l'amélioration de son rendement est contradictoire avec la réduction de sa masse et de son volume. Pour lever cette contradiction, le transformateur doit fonctionner à une fréquence élevée, donc différente de celle de la caténaire, ce qui implique l'utilisation d'un convertisseur électronique de puissance entre la caténaire et le transformateur. De par son principe, le transformateur électronique ne se réduit pas à la fonction d'adaptation de niveau de tension. Celui-ci intègre aussi la fonction de conversion alternatif-continu et remplace ainsi le transformateur conventionnel et le redresseur utilisés dans une chaîne de traction classique.

Compte tenu du niveau de tension de la caténaire, il est nécessaire d'utiliser une architecture multi-convertisseur qui comprend, généralement, N blocs identiques qui sont connectés en série côté haute tension et en parallèle côté bus continu, conformément à la Figure (I.6). Le nombre N de blocs est directement fonction de la tension caténaire (15 kV ou 25 kV) et de la tenue en tension des semi-conducteurs utilisés. En entrée de ce convertisseur, une bobine de filtrage est indispensable afin de respecter les limites normatives sur les valeurs d'impédance d'entrée du matériel roulant et les amplitudes des harmoniques de courant absorbés à la caténaire. Dans une chaîne de traction classique, c'est l'inductance de fuite des bobinages du transformateur de traction qui joue ce rôle. Celle-ci n'apparaît donc pas dans le schéma de la Figure(I.7).

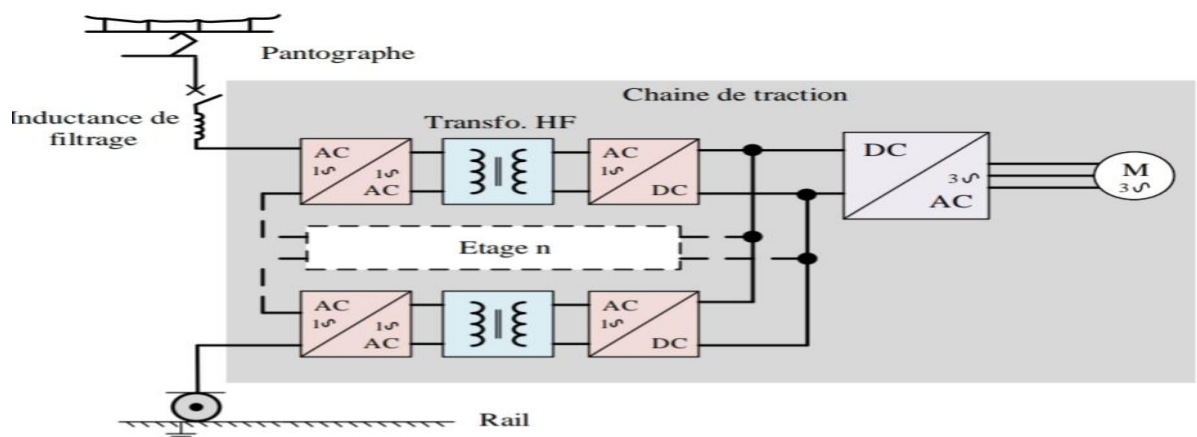


Figure I.7 Schéma de la chaîne de traction 25 kV à transformateur électronique.

### **Conclusion :**

L'industrie du ferroviaire peut donc bénéficier de cette synergie et intégrer ces nouvelles technologies. Quant aux gestionnaires de réseaux ferroviaires électrifiés en courant continu, ils ont l'opportunité d'évoluer vers un système unifié capable, en plus d'alimenter des trains, d'intégrer des sources d'énergie renouvelables et donc de transporter et de distribuer de l'énergie électrique. Le premier chapitre de cette thèse présente un état de l'art des systèmes d'électrification ferroviaire existants et des chaînes de traction associés.

# **Chapitre II**

## **Convertisseurs multicellulaires**

## Chapitre II : Convertisseurs multicellulaires

### Introduction

Un convertisseur statique de puissance est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique à une charge donnée en la convertissant. Les premiers convertisseurs électriques de puissance ont été réalisés avec des machines électriques tournantes couplées mécaniquement.[16] Avec l'apparition de l'électronique de puissance à base des semi-conducteurs (diodes, transistors, thyristors etc..), les systèmes de conversion deviennent de plus en plus élaborés et ne nécessitent plus de machines tournantes.

Dans ce chapitre, une généralité sur les convertisseurs de puissance puis modélisation et la commande par mode glissant du convertisseurs multicellulaires séries.

### II.1 Convertisseurs de puissance

On distingue plusieurs familles de convertisseurs statiques comme montrer dans la figure (II.1):

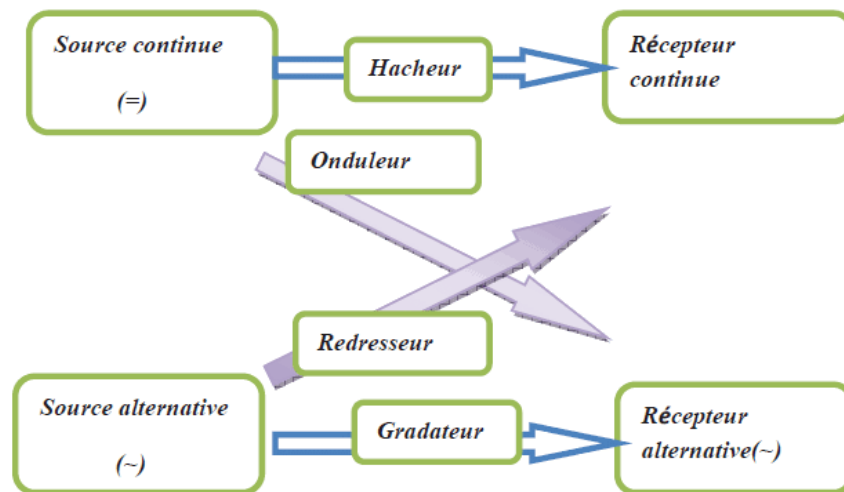


Figure II.1 Différent types de convertisseur de puissance

#### II. 1.1 Les hacheurs

Ce sont des convertisseurs continu-continu (DC/DC) générant une tension continue réglable à partir d'une source de tension continue, ils jouent ainsi le rôle de transformateur à courant continu[17].

**II.1.1.1 Hacheur série (Buck)**

C'est le montage le plus simple et le plus ancien [17], comme montrer la figure (II.2). Il permet de relier une source de tension  $E$  à une charge inductive (source de courant).

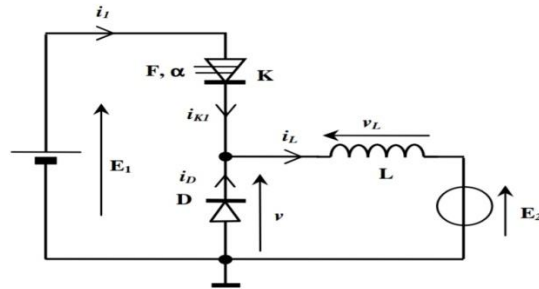


Figure II.2 Hacheur série

**II.1.1.2 Hacheur parallèle (Boost)**

L'hacheur parallèle possède deux régimes de fonctionnement suivant que le courant s'interrompt ou non dans la bobine. La période doit donc être décomposée en deux phases successives. Phase d'accumulation,  $0 < t < \alpha T$  où l'interrupteur est fermé, la tension  $v$  est nulle et la diode  $D$  bloquée Figure (II.3) .et Phase active,  $\alpha T < t < T$  (ou  $\beta T$ ) l'interrupteur est ouvert, le courant dans la bobine n'est pas nul, la diode  $D$  est donc passante. De ce fait,  $v = VS$  et  $v_L = E - VS$

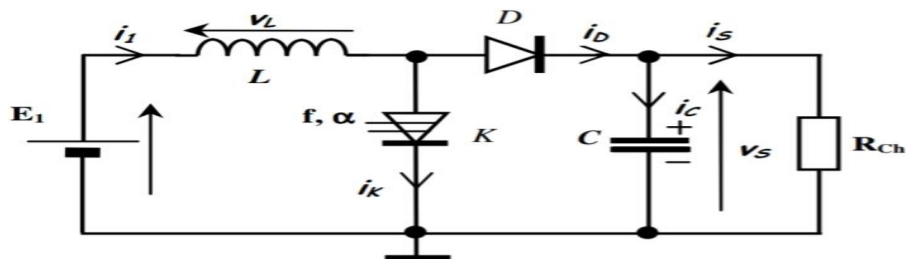


Figure II.3 Hacheur parallèle

**II.1.1.3 Hacheur à accumulation inductive (Buck & Boost)**

Nous retrouvons les mêmes éléments du hacheur parallèle dans l'hacheur à accumulation inductive avec une inversion de la polarité de la tension  $V_s$  figure (II.4)

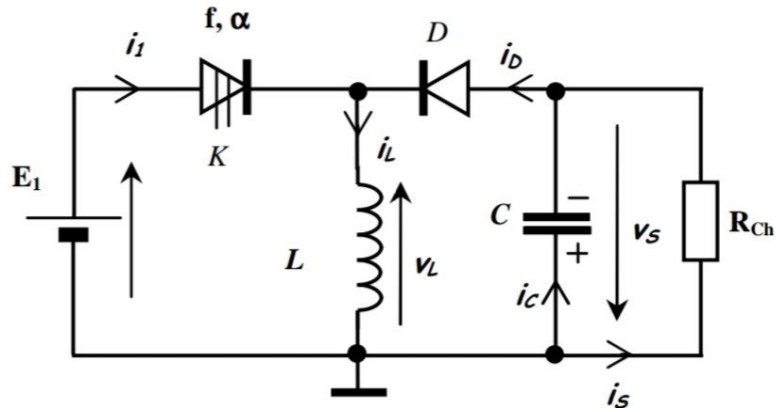


Figure II.4 Hacheur à accumulation inductive

### II.1.2 Les onduleurs

Un onduleur est un convertisseur de l'électronique de puissance permettant de générer des tensions et des courants alternatifs à partir d'une source d'énergie électrique de tension continue. Figure (II.5)

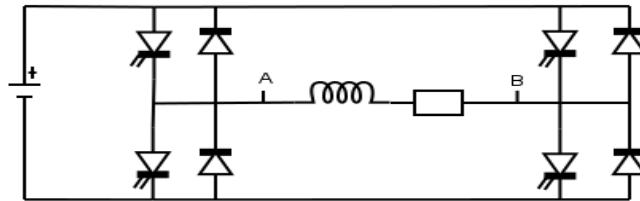


Figure II .5 structure d'onduleur

### II.1.3 Les redresseurs

Les redresseurs sont des composants électriques qui convertissent un courant alternatif en courant continu. On trouve dans la plupart des appareils électriques ou électroniques domestiques. C'est la fonction inverse de l'onduleur (Figure II.6).

	Redresseur simple alternance	Redresseur double alternance
Redresseur positif	Ils annulent les tensions négatives	Ils transforment les tensions négatives en tensions positives.
Redresseur négatif	Ils annulent les tensions positives.	Ils transforment les tensions positives en tensions négatives.

Tableau II.1 les types de redresseurs

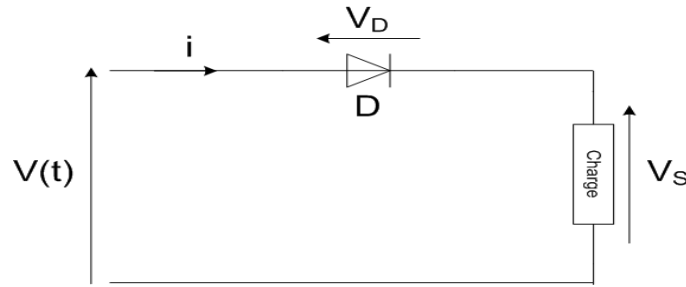


Figure II .6 structure du redresseur

## II.2 Les convertisseur multi-niveaux

Avant de commencer l'exploration de topologies de convertisseur multicellulaire, il est nécessaire de présenter les autres topologies des convertisseurs de puissance multiniveaux[18]. Dans les années 60La première structure des convertisseurs multiniveaux est la mise en série de pont en H. Puis, la structure NPC ou le convertisseur clampé par le neutre dans la fin des années 70. Cette structure (NPC) est considérée comme la première topologie des convertisseurs multiniveaux pour des applications de moyennes puissances[19].A partir, de nombreuses études ont été proposées pour étudier les propriétés de la structure NPC et ses évolutions possibles. Dans les années 90, les chercheurs proposent une nouvelle structure dite convertisseurs multicellulaires série [20], aussi connu dans la littérature sous le nom de( Flying Capacitor) (FC).

## II.3Des structures de conversion multi-niveaux

La figure (II.7) présente les différentes structures multiniveaux des convertisseurs statiques tel que[16] :

**MMC** :Cette structure est les convertisseurs modulaires multi niveaux .

**SMC** :Le Convertisseur Multicellulaire Superposé (SMC) Cette structure est une évolution du convertisseur multicellulaire série. Elle a été brevetée en 2000 en France et 2001 dans le monde.

**ANPC** :Le Convertisseur Clampé Activement par le Neutre (ANPC) est Une variante de la structure NPC, est le convertisseur Active-NPC (ANPC). Dans cette structure, les diodes de clamp sont remplacées par des interrupteurs trois segments (IGBT et diode en parallèle).

**ASNPC** :le Shared ANPC, qui partie d'une structure NPC, permet d'arriver au final à une structure totalement différente. Cette classification a permis aussi de penser à de nouvelles structures, ou encore de les interpréter différemment.



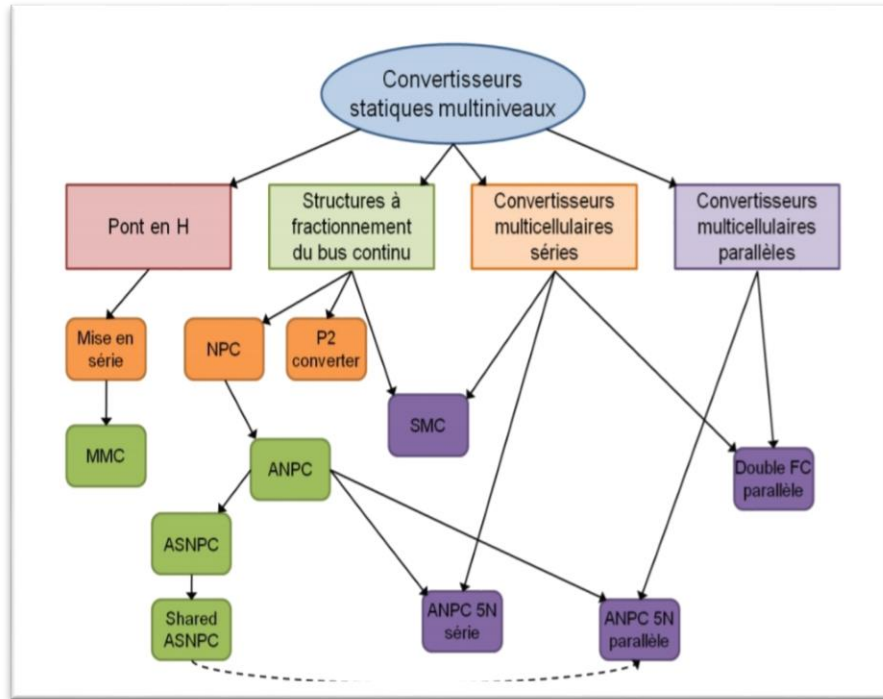


Figure II.7 Classification des structures de conversion multiniveaux

#### II.4 Convertisseur Multicellulaire Série

La structure multicellulaire série (Flying Capacitor) est apparue au début des années 90 [20]. Son principe est la mise en série des cellules de commutation. ces cellules sont connectées entre elles par des condensateurs flottants (sources de tension) [16].

La topologie multicellulaire série est représentée sur la Figure (II.8). Elle peut être généralisée à toutes les configurations : montage en onduleur (avec ou sans point milieu capacitif) ou montage en hacheur. Cette structure est composée de  $N$  cellules de commutation, avec  $(N-1)$  condensateurs flottants. Lors d'un fonctionnement normal, la tension aux bornes de chaque condensateur flottant s'équilibre naturellement autour de  $V_{dc}/N$  [20]. Ainsi, chaque condensateur flottant joue le rôle d'une source idéale de tension.

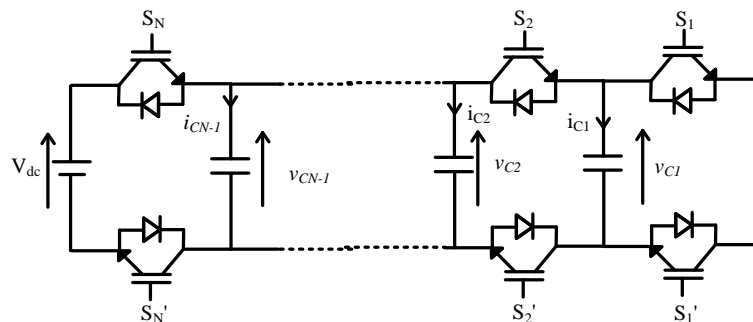


Figure II.8 Structure du convertisseur multicellulaire

### II.4.1 Principe de base d'un convertisseur multicellulaire série

Il est nécessaire d'assurer une répartition équilibrée des contraintes en tension des interrupteurs de puissance lors d'une association en série des cellules de commutation [22].

Les interrupteurs de la même cellules ont une contrainte de tension égale à  $V_{dc}/N$  contrairement à la topologie classique où l'interrupteur doit supporter la tension  $V_{dc}$  à l'état bloqué.

La figure (II.9) présente un hacheur multicellulaire à trois cellules.

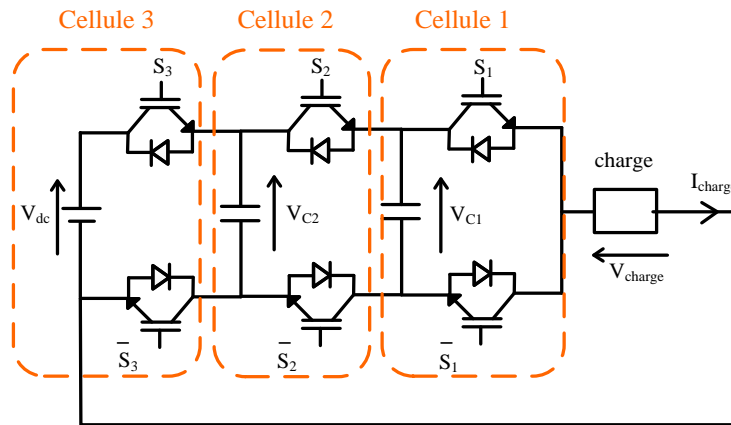


Figure II.9 Hacheur multicellulaire à trois cellules

Si la source tension continu délivre une tension égale à  $V_{dc}$ , les tensions des condensateurs flottants et la tension d'une cellule de commutation sont données par :

$$V_{C1} = \frac{V_{dc}}{3} \quad \text{II.1}$$

$$V_{C2} = \frac{2V_{dc}}{3} \quad \text{II.2}$$

$$V_{cell1} = \frac{V_{dc}}{3} \quad \text{II.3}$$

$$V_{cell2} = \frac{2V_{dc}}{3} - \frac{V_{dc}}{3} = \frac{V_{dc}}{3} \quad \text{II.4}$$

$$V_{cell3} = V_{dc} - \frac{2V_{dc}}{3} = \frac{V_{dc}}{3} \quad \text{II.5}$$

**Remarque :**

- Il est intéressant de constater que l'état des interrupteurs d'une cellule de commutation n'a aucune répercussion sur les contraintes appliquées aux interrupteurs de l'autre cellule, les deux cellules peuvent donc être considérées comme indépendantes. Ce type de convertisseur est facilement généralisable à N cellules de commutation[22].

Les huit configurations possibles d'un hacheur multicellulaire à trois cellules sont représentées dans le tableau (II.1)

Configuration	$(s_3 s_2 s_1)$	Tension de la charge
1	(0 0 0)	0
2	(0 0 1)	$\frac{v_{dc}}{3}$
3	(0 1 0)	$\frac{v_{dc}}{3}$
4	(0 1 1)	$2 \frac{v_{dc}}{3}$
5	(1 0 0)	$\frac{v_{dc}}{3}$
6	(1 0 1)	$2 \frac{v_{dc}}{3}$
7	(1 1 0)	$\frac{v_{dc}}{3}$
8	(1 1 1)	$v_{dc}$

*Tableau II.2 les configuration possibles du convertisseur multicellulaires trois cellules*

**II.4.2 Modélisation d'un hacheur multicellulaires série à N cellules**

**II.4.2.1 La Fonctionnement hacheur abaisseur**

Figure (II.10) représente un hacheur multicellulaire à N cellules avec une charge inductive de type R-L. Le modèle de cet hacheur contient N-1 équations différentielles pour l'évolution des tensions des N-1 condensateurs flottants et une équation pour l'évolution du courant de la charge. Le condensateur  $c_i$  est parcouru par le courant de la charge  $i_{ch}$  lorsque les interrupteurs en amont ( $s_{i+1}$ ) et en aval ( $s_i$ ) ont des états différent, l'évolution de la tension  $v_{c_i}$  aux bornes du condensateur  $c_i$  est liée à la variation du courant  $i_{c_i}$ . Le courant du condensateur est donné par l'équation (II.6) et la tension  $v_{c_i}$  est donnée par l'équation (II.7).

$$i_{c_i} = [s_{i+1} - s_i] i_{ch} \tag{II.6}$$

$$\frac{d}{dt}v_{ci} = \frac{[s_{i+1} - s_i]i_{ch}}{c_i} \quad \text{II.7}$$

L'équation (II.7) est généralisable pour  $N-1$  tensions des condensateurs flottants. La tension de sortie  $v_{ch}$  est égale à la somme des tensions aux bornes des condensateurs flottants  $v_{ci}$  multipliée par l'état des deux interrupteurs adjacents.

$$v_{ch} = [s_1 - s_2]v_{C1} + [s_2 - s_3]v_{C2} + \dots [s_{N-1} - s_N]v_{CN-1} + s_N v_{dc} \quad \text{II.8}$$

$$v_{ch} = \sum_{i=1}^{i=N} \delta_i v_{ci}$$

$$\delta_i = [s_i - s_{i-1}] \quad \text{II.9}$$

La tension de la charge  $v_{ch}$  et le courant de la charge  $i_{ch}$  sont écrites équations suivantes (II.10 et II.11):

$$v_{ch} = R_{ch}i_{ch} + L_{ch} \frac{d}{dt}i_{ch} \quad \text{II.10}$$

$$\frac{d}{dt}i_{ch} = \frac{v_{ch}}{L_{ch}} - \frac{R_{ch}}{L_{ch}}i_{ch}$$

$$\frac{d}{dt}i_{ch} = \frac{[s_1 - s_2]}{L_{ch}}v_{C1} + \frac{[s_2 - s_3]}{L_{ch}}v_{C2} + \dots \frac{[s_{N-1} - s_N]}{L_{ch}}v_{CN-1} + \frac{s_N}{L_{ch}}v_{dc} - \frac{R_{ch}}{L_{ch}}i_{ch} \quad \text{II.11}$$

Le modèle mathématique d'un hacheur multicellulaire à  $N$  cellules est donné par l'équation (II.12) :

$$\frac{d}{dt}v_{C1} = \frac{[s_2 - s_1]}{C_1}i_{ch}$$

$$\frac{d}{dt}v_{C2} = \frac{[s_3 - s_2]}{C_2}i_{ch}$$

$$\frac{d}{dt}v_{Ci} = \frac{[s_{i+1} - s_i]}{C_i}i_{ch}$$

$$\frac{d}{dt} v_{CN-1} = \frac{[s_N - s_{N-1}]}{C_{N-1}} i_{ch}$$

II.12

$$\frac{d}{dt} i_{ch} = \frac{[s_1 - s_2]}{L_{ch}} v_{C1} + \frac{[s_2 - s_3]}{L_{ch}} v_{C2} + \dots + \frac{[s_{N-1} - s_N]}{L_{ch}} v_{CN-1} + \frac{s_N}{L_{ch}} v_{dc} - \frac{R_{ch}}{L_{ch}} i_{ch}$$

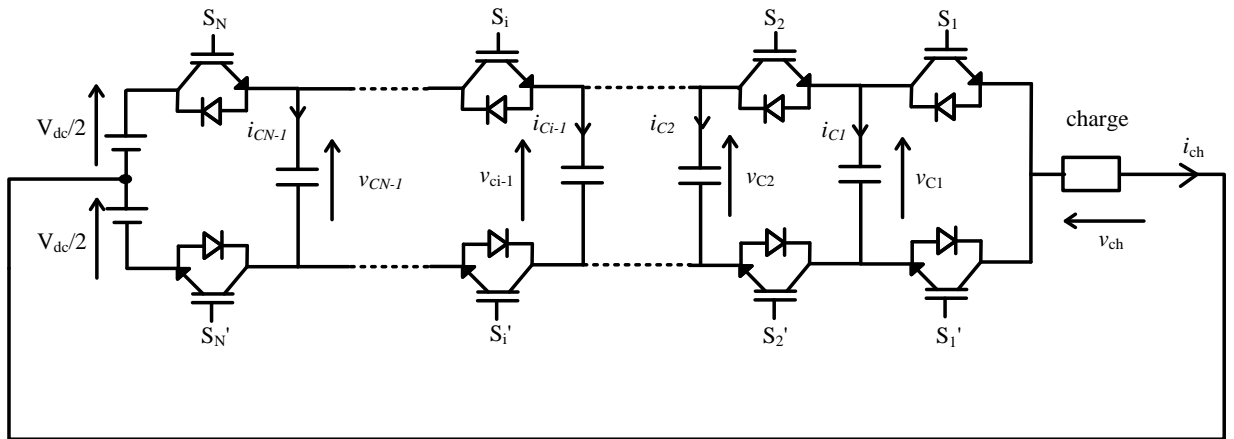


Figure II.10 Onduleur multicellulaire monophasé à N cellules

**II.4.2.2 Onduleur multicellulaire avec la commande Modulation de Largeur d’impulsion (MLI)**

(La figure II.10) présente un la structure de l’onduleur multicellulaire à trois cellules monophasé en demi-pont avec une charge  $R - L$ . Les interrupteurs de puissance sont commandés en MLI en boucle ouverte.

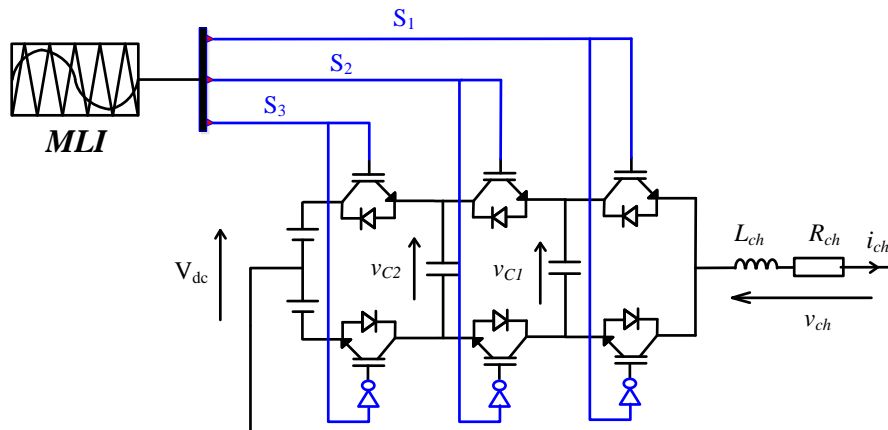


Figure. II.11 Commande MLI de l’onduleur multicellulaire à trois cellules.

(La figure II.11) présente la tension de la charge à quatre niveaux  $(\frac{-V_{dc}}{2}, \frac{-V_{dc}}{6}, \frac{V_{dc}}{6}, \frac{V_{dc}}{2})$  d'un onduleur multicellulaire à trois cellules. Les tensions des condensateurs flottants tendent vers leurs valeurs de référence comme est montré dans la figure II.12.

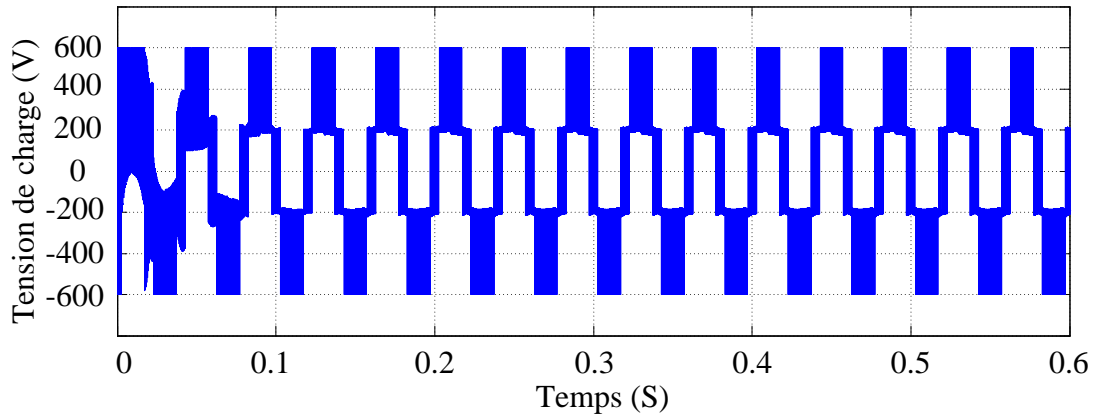


Fig. II.12 La tension de charge de l'onduleur multicellulaire à trois cellules.

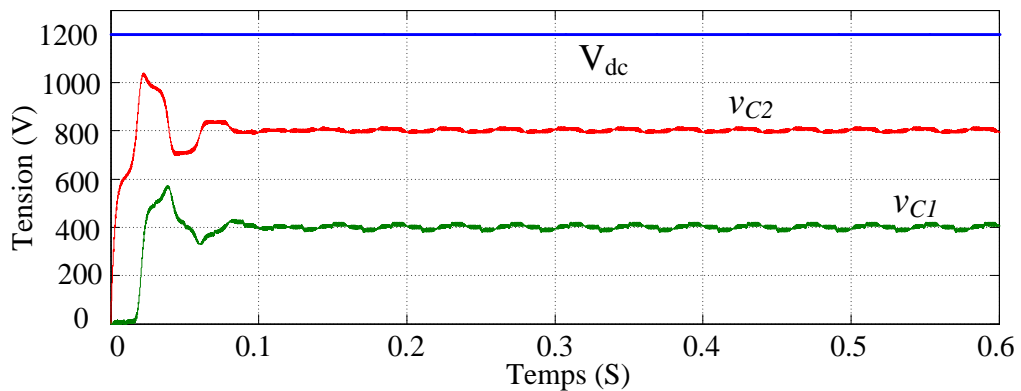


Fig. II.13 Equilibrage naturel des tensions des condensateurs flottants de l'onduleur multicellulaire à trois cellules.

## II.4.3 La commande par mode glissant d'un convertisseur multicellulaire

### II.4.3.1 Définition de la commande par mode glissant

Dans la commande par mode de glissement des systèmes à structure variable, la trajectoire d'état est amenée vers une surface dite de glissement puis à l'aide de la loi de commutation, cette commande est obligée de rester au voisinage de la surface de glissement. le mouvement autour de la surface de glissement est appelée mouvement de glissement[22].

L'objectif de la commande par mode glissant se résume essentiellement en deux points :

- Choisir une surface de glissement  $S(x)$ , avec les trajectoires du système obéissent un comportement désiré de poursuite, régulation et stabilité.
- Etablir une loi de commande  $u$  (commutations) qui est capable d'attirer toutes les trajectoires d'état vers la surface de glissement et les maintenir sur cette surface.

La conception de cette loi de commutation peut être effectuée en trois étapes :

- Choix de la surface de glissement.
- Etablissement des conditions d'existence de la convergence.
- Détermination de la loi de commande.

#### **II.4.3.2 Choix de la surface de glissement**

On considère le système dynamique non linéaire représenté par l'équation suivante :

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad \text{II.13}$$

Telle que  $x$  est le vecteur d'état et on suppose  $x_{ref}$  est le vecteur de référence.

Le vecteur d'erreur est la différence entre le vecteur de référence et le vecteur d'état  $\tilde{x} = x_{ref} - x$

Pour assurer la convergence du variable d'état  $x$  vers sa valeur de référence  $x_{ref}$ , la forme générale de surface de glissement proposé par Slotine est donné par :

$$S(x) = \left(\frac{d}{dt} + \gamma\right)^{r-1} \tilde{x} \quad \text{II.14}$$

$\gamma$ : Constante positive et  $r$ : est le degré relatif.

#### **II.4.3.3 Condition d'existence de convergence**

Il s'agit de choisir une fonction de Lyapunov  $V(x) > 0$  (fonction positive) et sa dérivée de la est négative.

La fonction de Lyapunov est donné par :

$$V(x) = \frac{1}{2} s^2(x) \quad \text{II.15}$$

En dérivant cette dernière on obtient :

$$\dot{V}(x) = \dot{s}(x)s(x) \quad \text{II.16}$$

Pour que la fonction de Lyapunov décroisse, il suffit d'assurer que sa dérivée soit négative:

$$\dot{s}(x)s(x) < 0 \quad \text{II.17}$$

### II.4.3.4 Détermination de la loi de commande

La surface de glissement devrait être attractive. De ce fait, la commande par mode de glissement est divisée en deux parties, une concernant la commande continue dite équivalente ( $u_{eq}$ ) et l'autre discrète pour la stabilisation ( $u_n$ )

$$u = u_{eq} + u_n \quad \text{II.18}$$

$u_{eq}$  sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement  $S(x) = 0$ . La commande équivalente est déduite, en considérant que la dérivée de la surface est nulle.

La commande discrète  $u_n$  est déterminée pour vérifier la condition de convergence.

Afin de mettre en évidence le développement précédent, on considère le système d'état d'équation (II.13) On cherche à déterminer l'expression analogique de la commande  $u$ .

La dérivée de la surface  $S(x)$  est:

$$\dot{s}(x) = \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{\partial s}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} \quad \text{II.19}$$

En remplaçant les équations (II.13) et (II.18) dans (II.19), on trouve :

$$\dot{s}(x) = \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{\partial s}{\partial x} [f(x) + g(x)u_{eq}] + \frac{\partial s}{\partial x} g(x)u_n \quad \text{II.20}$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent, la surface est nulle, et par conséquent, sa dérivée et la partie discontinue sont aussi nulles. D'où, on déduit l'expression de la commande équivalente.

$$u_{eq} = - \left[ \frac{\partial s}{\partial x} g(x) \right]^{-1} \left[ \frac{\partial s}{\partial x} f(x) \right] \quad \text{II.21}$$

$$\frac{\partial s}{\partial x} g(x) \neq 0 \quad \text{II.22}$$

En remplaçant la commande équivalente par son expression dans (II.20), on obtient la nouvelle expression de la dérivée de la surface :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial s}{\partial x} g(x)u_n \quad \text{II.23}$$

Et la condition  $s(x)\dot{s}(x) < 0$  devient:

$$s(x) = \frac{\partial s}{\partial x} g(x)u_n < 0 \quad \text{II.24}$$



Afin de satisfaire la condition d'attractivité, le signe de  $u_n$  doit être opposé à celui de  $S(x) \frac{\partial s}{\partial x} g(x)$ . Alors :

$$u_n = k_x \text{signs}(x) \quad \text{II.25}$$

Le signe de  $kx$  doit être différent de celui de  $\frac{\partial s}{\partial x} g(x)$

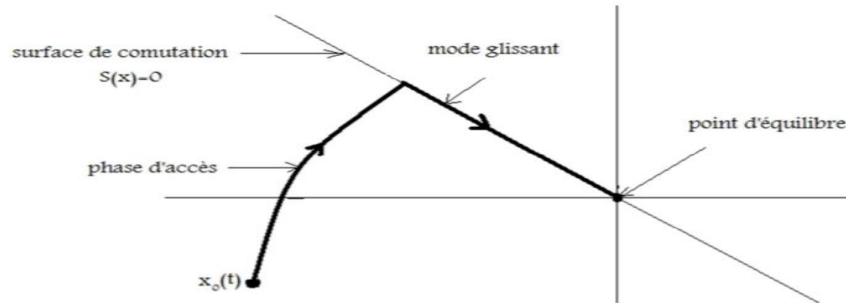


Figure II.14 Modes de fonctionnement.

#### II.4.4 Application de la commande par mode glissant sur convertisseur multicellulaire :

La représentation d'état générale d'un onduleur multicellulaire est sous la forme suivante:

$$\dot{x} = A(x) + Bu \quad \text{II.26}$$

La surface de glissement est donnée par :

$$s(x) = x - x_{ref} \quad \text{II.27}$$

Pour vérifier la condition de convergence, en choisissant la fonction de Lyapunov comme suit:

$$V = \frac{1}{2} s^2(x) \quad \text{II.28}$$

$$\dot{V} = s(x) \dot{s}(x) \quad \text{II.29}$$

$$s \cdot \dot{s} < 0 \quad \text{II.30}$$

La dérivée de la surface de glissement

$$\dot{s} = \dot{x} - \dot{x}_{\text{ref}} \quad \text{II.30}$$

$$s(\dot{x} - \dot{x}_{\text{ref}}) < 0 \quad \text{II.31}$$

En remplaçant (II.26) dans (II.30)

$$\dot{s} = A(x) + Bu - \dot{x}_{\text{ref}} \quad \text{II.32}$$

$$s(A(x) + Bu - \dot{x}_{\text{ref}}) < 0 \quad \text{II.33}$$

La commande équivalente est pour que le système glisse sur la surface de commutation où la dérivée de la surface de glissement est nulle

La commande totale  $u$  est la somme des deux commandes équivalente et discontinue

$$u = u_{\text{eq}} + u_n \quad \text{II.35}$$

En remplaçant (II.35) dans (II.34)

$$\dot{s} = Bu_n \quad \text{II.36}$$

$$s(Bu_n) < 0 \quad \text{II.37}$$

Alors la dérivée de la fonction de Lyapunov est donné par

$$s(x)\dot{s}(x) = s(x)Bu_n \quad \text{II.38}$$

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad \text{II.39}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{c1} \\ \dot{V}_{c2} \\ \dot{i}_{ch} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{c1} \\ V_{c2} \\ i_{ch} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{i_{ch}}{C} & \frac{i_{ch}}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{i_{ch}}{C} & \frac{i_{ch}}{C} \\ \frac{V_{c1}}{L} & \frac{V_{c2} - V_{c1}}{L} & \frac{V_{dc} - V_{c2}}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u1 \\ u2 \\ u3 \end{bmatrix} \quad \text{II.40}$$

$$u_{n1} = -\text{sign} \left[ S(x) \left( \frac{-i_{ch}}{C} + \frac{v_{c1}}{L_f} \right) \right] \quad \text{II.41}$$

$$u_{n2} = -\text{sign} \left[ S(x) \left( \frac{i_{ch}}{C} + \frac{v_{c2} - v_{c1}}{L_f} \right) \right] \quad \text{II.42}$$

$$u_{n3} = -\text{sign} \left[ S(x) \left( \frac{i_{ch}}{C} + \frac{(v_{dc} - v_{c2})}{L_f} \right) \right] \quad \text{II.43}$$

### II.5 Simulation de l'hacheur multicellulaire avec la commande par mode glissant

Les paramètres de simulation sont donnés dans le tableau suivant :

Capacité flottante	$C = 0.4\mu F$
Tension du bus continu	$V_{dc} = 750 V$
Inductance de la charge	$L_{ch} = 0.4 mH$
Résistance de la charge	$R_{ch} = 8\Omega$

Tableau II.3 Les paramètres de simulation de l'hacheur multicellulaire

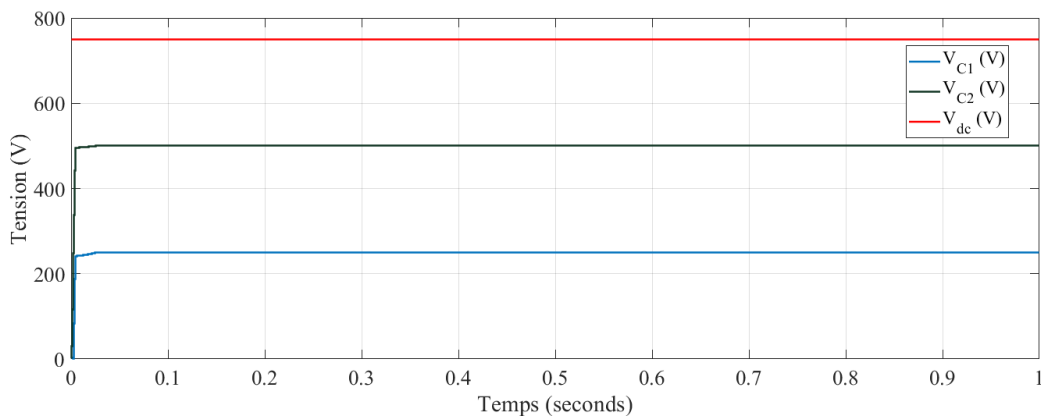


Fig. II.15 Tension continu  $V_{dc}$  et les tensions des condensateurs flottants

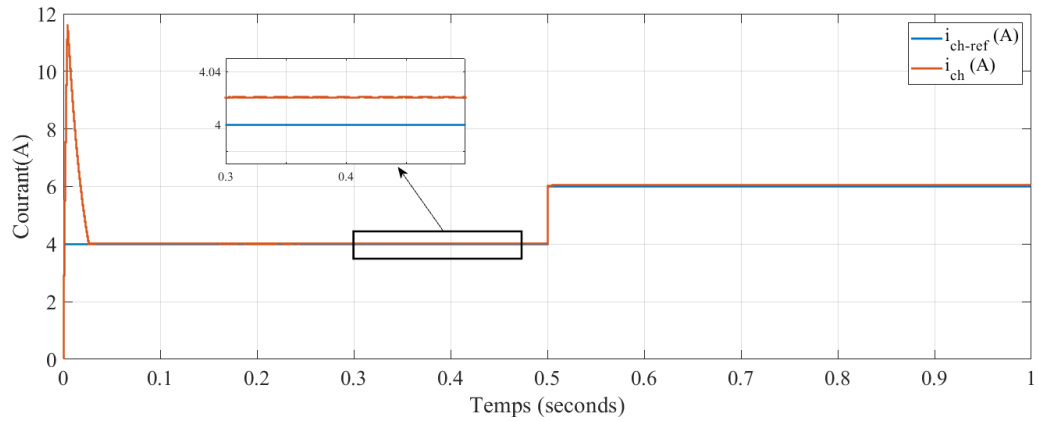


Fig. II.16 Courant de la charge

Les tensions des condensateurs flottants de l’hacheur multicellulaire ( $v_{C1}$ ,  $v_{Ca}$ ) tendent vers leurs valeurs de référence ( $V_{C1\_ref}$ ,  $V_{C2\_ref}$ ) respectivement durant un régime transitoire de 0.01 S comme le montre la (figure II.15).

Le courant de charge  $i_{ch}$  dans la ( figure II.16 ) suit leur référence  $i_{ch-ref}=4A$  avec un erreur de à 0.02A et régime transitoire de 0.03s. à l’instant  $t=0.5s$ , une augmentation de courant de charge de référence  $i_{ch-ref}=6A$ , le courant de charge suit leur référence durant cette augmentation.

### Conclusion

Après un rapide balayage de différentes structures de convertisseurs multiniveaux, nous avons présenté dans ce chapitre quelques stratégies précédemment développées pour commander les convertisseurs multicellulaires [23]. Nous avons vu que les commandes en durée sont basées sur une modélisation aux valeurs moyennes du convertisseur, et qu’elles sont susceptibles d’entraîner une saturation des rapports cycliques lors des régimes transitoires dus à une éventuelle perturbation ou à un brusque changement d’une grandeur de référence. Au contraire, les commandes en amplitude par mode de glissement sont très performantes durant les phases transitoires, mais soulèvent quelques problèmes lors du régime permanent. Nous avons donc cherché un compromis entre les deux grandes familles de commande. Il s’agit d’une stratégie de commande du courant crête appliquée au cas d’un convertisseur multicellulaire. Dans l’immédiat, dans le cas du convertisseur multicellulaire commandé selon différentes stratégies de Modulation de Largeur d’Impulsion.

## **Chapitre III**

# **Diagnostic des défauts d'un convertisseur multicellulaire**

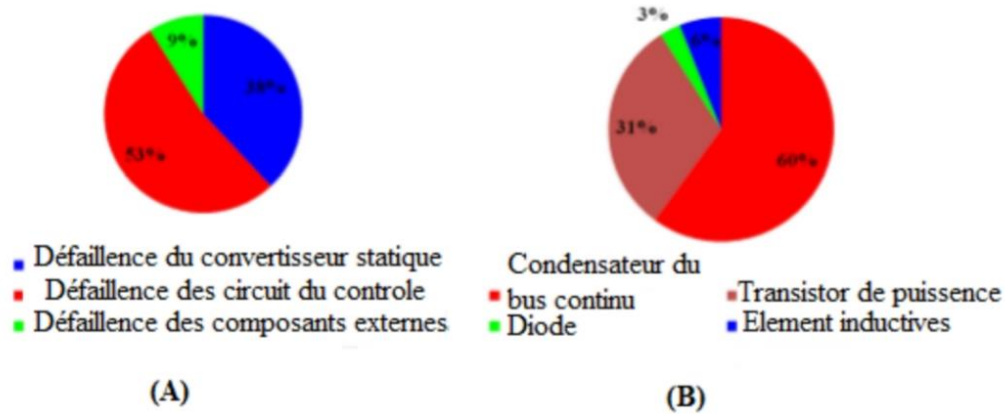
### Chapitre III : diagnostic des défauts d'un convertisseur multicellulaire

#### Introduction :

Au cours de ces dernières années, l'évolution des études dans le domaine des systèmes industriels permet de présenter des systèmes de plus en plus performants. Malgré toute cette évolution, nul système n'est à l'abri d'une défaillance. Pour cela on porte aujourd'hui un grand effort sur la surveillance et le diagnostic des systèmes industriels. Le diagnostic est un des facteurs contribuant à la disponibilité de l'outil de production [24]. Il a pour principe la détection rapide ou précoce d'une défaillance des matériels des systèmes industriels. Le diagnostic réalisé par les opérateurs dans les salles de commande consiste principalement à localiser les matériels défaillants qui sont responsables de la perte des fonctions nécessaires au fonctionnement de leurs installations. Le diagnostic dans ce cas a pour objet de rechercher les défaillances qui sont par nature fortuite et qui devront ultérieurement faire l'objet d'une maintenance corrective. Par contre, le diagnostic réalisé dans le cadre de la maintenance préventive s'intéresse principalement à diagnostiquer l'état de dégradation des matériels pour prévenir une défaillance. Ces raisons expliquent la grande diversité des méthodes de diagnostic industriel. Le problème du diagnostic industriel se ramenant par définition au problème inverse entre les causes et les effets. Une connaissance intime des différents phénomènes régissant les matériels des systèmes industriels est absolument indispensable pour entreprendre le diagnostic d'une défaillance [25].

#### III.1 Statistiques des défauts du convertisseurs

Les deux diagrammes de Fig. (III.1) montrent que plus de 90% des défaillances sont du fait du convertisseur lui-même ou des circuits de contrôle, Pour les composants du convertisseur statique, les condensateurs et les transistors sont les éléments qui subissent le plus de défaillances. La difficulté majeure rencontrée dans le diagnostic des défauts dans les composants d'électronique de puissance est la difficulté d'établir un modèle mathématique suffisamment représentatif du composant ou du convertisseur et de suffisamment d'informations ou des mesures on ligne (pendant le fonctionnement du convertisseur) [26].



FigIII.1 . Statistiques des défaillances dans les chaînes de conversion d'énergie.

(A) : Taux de défaillance dans la chaîne de conversion d'énergie.

(B) : Taux de défaillance des composants du convertisseur statique.

### III.2 Différents types de défauts des convertisseurs statiques

Un défaut est caractérisé par une dégradation du fonctionnement qui peut être partielle ou globale. Au sein du convertisseur, les défauts les plus communs et les plus critiques concernent majoritairement la commande des interrupteurs de puissance. Leurs origines peuvent être internes et liées au fonctionnement même, ou externe et liées à l'environnement ou à un usage hors spécifications [27]. Les défaillances d'un convertisseur peuvent être classées en trois types; défaillances de type basse impédance (défaillances de court-circuit), défaillances de haute impédance (défaillances de circuit ouvert) et les défauts de mise en circuit intermittent[28].

#### III.2.1 Défaillances de type bas impédance

Il s'agit d'un défaut de court-circuit, dans ce cas, le courant dans les transistors croit jusqu'à la destruction de l'un d'entre eux, le même phénomène est appliqué sur le deuxième transistor et par conséquent, la cellule est définitivement court-circuitée, les courants des phases deviennent fortement déséquilibrés et leurs amplitudes peuvent atteindre plusieurs fois celle des courants en fonctionnement normal, cela n'engendre pas uniquement de très fortes ondulations du couple, mais, risque également d'endommager les autres composants du convertisseur, de plus, le courant de court-circuit peut aboutir à des amplitudes importantes, Certains transistors comme les IGBT s'intègrent une autolimitation des courants, Ils peuvent, ainsi, résister quelques secondes avant leur destruction.

Afin de réduire les conséquences d'un défaut du court-circuit, la commande rapprochée de la cellule doit pouvoir réagir assez rapidement (dans les 10 microsecondes qui suivent) lors de l'apparition du défaut pour bloquer le transistor concerné ou le transistor du même bras du convertisseur avant sa fusion, Pour cela, les circuits de commande modernes intègrent généralement une détection de désaturation des transistors par mesure de la tension collecteur émetteur, Pour assurer une continuité de fonctionnement avec ce type de défaut, des

interrupteurs d'isolement sont intégrés dans le convertisseur afin de le reconfigurer pour un fonctionnement en mode dégradé, de plus, cette solution offre un isolement électrique partiel ou total du convertisseur ce qui permet de faire fonctionner le convertisseur avec un nombre variable de cellules[29].

### III.2.2 Défaillances de type haut impédance

Il s'agit d'un défaut de circuit ouvert, ce défaut est dû à une défaillance de grille qui engendre une perte de réversibilité en courant du transistor (seule la diode de roue-libre subsiste), cette défaillance se présente par la perte d'une alternance du courant de phase, dans le cas où le transistor en haut d'un bras est ouvert, le courant de la phase connectée à ce bras ne peut plus être exigé lorsque sa référence est positive, dans ce cas, le courant devient négatif ou nul, lorsqu'il est nul, les valeurs instantanées des courants des deux autres phases deviennent élevées afin de maintenir le couple moyen et la vitesse, en présence de ce type de défaut, le démarrage de la machine ne peut pas être toujours évident parce qu'à certaines positions du rotor, le couple est proche de zéro quelles que soient les valeurs des courants des phases [30].

### III.3 Diagnostic de défauts

#### III.3.1 Méthodes de diagnostic et classification

Grâce aux développements rapides de l'électronique, de la technique informatique et de la technologie de l'information, les processus industriels modernes deviennent de plus en plus complexes. Ainsi, les problèmes de sécurité et de fiabilité révèlent une importance considérable vu que la présence d'une défaillance peut entraîner des conséquences désastreuses. Ainsi, il est indispensable de faire appel à des techniques de surveillances modernes combinant le diagnostic et la correction des défauts afin d'améliorer la sécurité et la fiabilité des processus, de minimiser les coûts de maintenance et de protéger l'installation dans les états critiques. De nombreuses techniques ont été proposées au cours des dernières décennies pour le diagnostic des défauts. La plupart d'entre elles peuvent être classées en trois principales catégories: (*Figure III.2*) les méthodes basées sur la redondance matérielle, les méthodes basées sur l'approche signal et les méthodes basées sur l'approche modèle (redondance analytique).

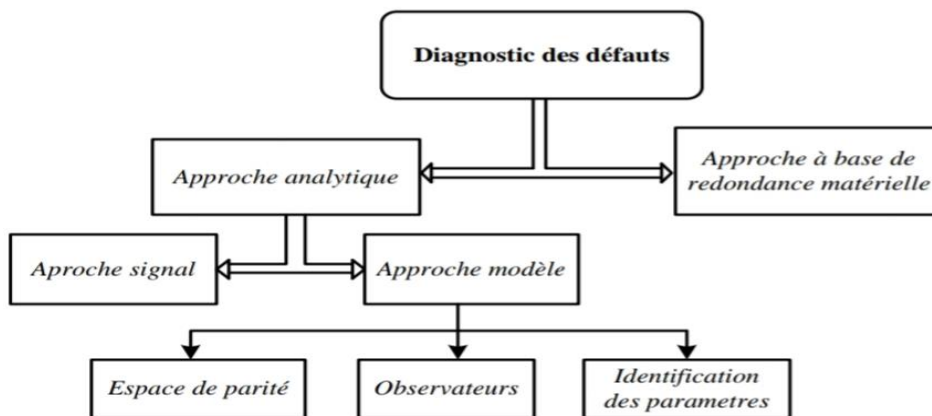


Fig III.2 Classification des méthodes de diagnostic des défauts.



### III.3.2 Diagnostic de défauts de type circuit-ouvert des composants de puissance dans un convertisseur statique

L'impact d'un défaut de court-circuit est généralement destructif surtout avec les entraînements classiques couplés en étoiles et nécessite soit un onduleur de tension spécial avec deux transistors en série, soit des composants supplémentaires tels que les triacs ou une architecture spéciale des machines à enroulement ouverts (open-end windings drives) [31]. De ce fait, nous nous limitons dans cette partie à l'étude des défauts de type circuit ouvert des IGBTs. Au cours des deux dernières décennies, de nombreuses méthodes ont été développées sur le sujet du diagnostic des défauts de type circuit-ouvert dans les associations onduleur-moteur électrique [32]. Ces techniques peuvent être globalement classées en deux catégories : les approches à base signal et les approches à base modèle.

#### III.3.2.1 Approche signal

##### • Méthodes basées sur les courants

Les premiers travaux développés en utilisant les courants ou leurs dérivés [33], la méthode utilisée est basée sur la technique connue par : "Park's vector method". La détection et la localisation des défauts d'ouverture des transistors défectueux sont réalisées en calculant la trajectoire et l'amplitude des courants de phase dans le référentiel lié au stator ou lié au champ tournant. Cette technique présente un inconvénient majeur puisqu'elle dépend de la charge. Afin de diminuer la dépendance de la charge et la sensibilité aux transitoires, différentes méthodes ont été proposées en se basant sur la méthode de la composante continue normalisée (Normalised DC Current Method & Modified-Normalised DC Current Method) [34]. La différence entre ces deux méthodes est que la version modifiée utilise une manière réduite pour la localisation du composant défectueux. Une version plus simple "Simple Direct Current Method" a été aussi proposée par les mêmes auteurs en utilisant uniquement les valeurs moyennes des courants de phases de la machine pour la détection du défaut. La technique "Park's vector method" [35], pour le diagnostic des défauts dans l'onduleur triphasé de tension, cependant ces approches basées sur cette méthode nécessitent une reconnaissance de formes complexe et présente un problème lié à la difficulté de leurs implantations. Plus récemment, une méthode de diagnostic des défauts basée sur les erreurs des courants de référence (residual values) [36], elle utilise les trois courants mesurés et leurs signaux de référence correspondant pour former les erreurs. Ensuite, les valeurs moyennes de ces erreurs sont utilisées pour former les variables de diagnostic. Ces variables sont comparées avec des seuils prédéfinis pour détecter les défauts simples et multiples d'ouverture d'IGBTs dans l'onduleur.

Une technique de diagnostic basée sur l'analyse de la topologie symétrique de l'onduleur qui peut être décrite par les résidus des fonctions auto-définies "self-defined function" [37]. Bien que cette méthode permette de détecter et localiser 21 type de défauts, elle utilise de nombreuses fonctions qui nécessitent un calcul itératif des valeurs moyennes, ce qui présente des complexités de la mise en œuvre pratique de l'algorithme qui exige plus d'espace mémoire et permettant aussi d'augmenter le temps de traitement. Plusieurs valeurs-

seuil définies expérimentalement sont aussi nécessaires pour pouvoir détecter et localiser les composants endommagés.

#### • Méthodes basées sur les tensions

Afin d'améliorer le temps de détection des défauts, différentes approches basées sur les signaux de tensions (tensions des pôles, tensions de phase de la machine, la tension de neutre) ont été également proposées dans [32]. Une technique de diagnostic des défauts du convertisseur de puissance en temps réel basée sur FPGA (Field-Programmable Gate Array) [38] pour les topologies des convertisseurs tolérants aux pannes à trois bras. Cette méthode peut détecter l'élément défectueux en moins de 10  $\mu$ s par l'analyse de l'erreur entre les tensions mesurées et celles estimées. Afin de simplifier le circuit de détection et de minimiser le temps de diagnostic, une proposition basée sur la mesure des tensions des transistors est obtenue en utilisant des photo coupleurs à grande vitesse [39]. La méthode proposée est réalisée par l'analyse du modèle de fonction de commutation de l'onduleur dans des conditions saines et défectueuses. Les défauts de type circuit ouvert des transistors peuvent être détectés en mesurant la tension collecteur-émetteur de IGBT de l'étage inférieurs de chaque bras. Le système de diagnostic utilise un circuit matériel pour obtenir indirectement les tensions des commutateurs de puissance et pour éliminer la complexité des capteurs. La détection des IGBTs endommagés est obtenue avec un retard d'environ 3  $\mu$ s. Une autre méthode basée aussi sur les signaux de commutation PWM et le niveau des tensions entre phases a été proposée [32]. Le diagnostic des défauts circuit-ouvert des IGBTs est effectué par la détection du changement du niveau zéro de tension, la détection des défauts est également réalisée en moins d'une période de commutation (environ 200  $\mu$ s). Cette méthode nécessite deux capteurs de tension pour la mesure des tensions entre phase et un circuit analogique pour l'implantation temps réel de l'algorithme de diagnostic. Toutes ces techniques ont permis d'obtenir de bonnes performances en terme de rapidité de détection des défauts, cependant leurs principales faiblesses résident dans la complexité de leur mise en œuvre et le coût élevé du processus de diagnostic qui nécessite soit des capteurs de tension ou des circuits supplémentaires ou les deux à la fois

#### III.3.2.2 Approche modèle

En ce qui concerne les approches de diagnostic à base de modèle, la détection des défauts est basée sur un modèle mathématique fonctionnant en parallèle avec le système. Les variables de diagnostic sont obtenues en comparant la similarité entre les signaux réels à la sortie du système et ceux estimés fournis par le modèle. Le diagnostic des défauts d'ouverture des IGBTs est basé sur l'approche modèle a attiré l'attention de plusieurs chercheurs ces dernières années et présente toujours un sujet d'actualité grâce à la facilité de les intégrer dans les algorithmes de contrôle existants. Plusieurs approches utilisant ce concept ont été développées récemment [40].

La détection des défauts circuit ouvert des IGBTs est effectuée par une évaluation directe des résidus entre les courants statoriques mesurés et ceux estimés. L'approche proposée s'avère être indépendante de la charge et ne nécessite pas de circuit supplémentaire. Il est important de souligner ici que cette technique basée sur l'observateur non linéaire est

valable seulement avec les configurations de commande avec capteur de vitesse. Si une configuration sans capteur de vitesse (sensorless) est considérée, il est impossible d'obtenir des sous-systèmes découplés des perturbations. En conséquence, les défauts simultanés ne peuvent plus être isolés [41]. Une autre approche de diagnostic basée sur les tensions estimées [42]. Cette méthode utilise un observateur de tension et utilise des valeurs moyennes d'erreurs de tensions normalisées entre les références et les tensions observées pour obtenir des informations sur le défaut. Toujours dans le même contexte d'éliminer l'utilisation des capteurs de tensions ou des circuits analogiques supplémentaires, une technique à base d'un système adaptatif de référence du modèle est adoptée pour diagnostiquer les défauts circuit-ouvert dans les onduleurs triphasés alimentant des machines synchrones à aimant permanent [43]. Un observateur adaptatif pour la détection de distorsion de tension est utilisé pour le diagnostic des défauts. La méthode proposée peut détecter le défaut en moins de 1 ms et elle ne nécessite pas des capteurs supplémentaires.

### III.4 Convertisseur multicellulaire utilisés dans le système de transport électrique

La figure III.3 représente un système de transport ferroviaire électrique à base du convertisseur multicellulaire (DC/DC) :

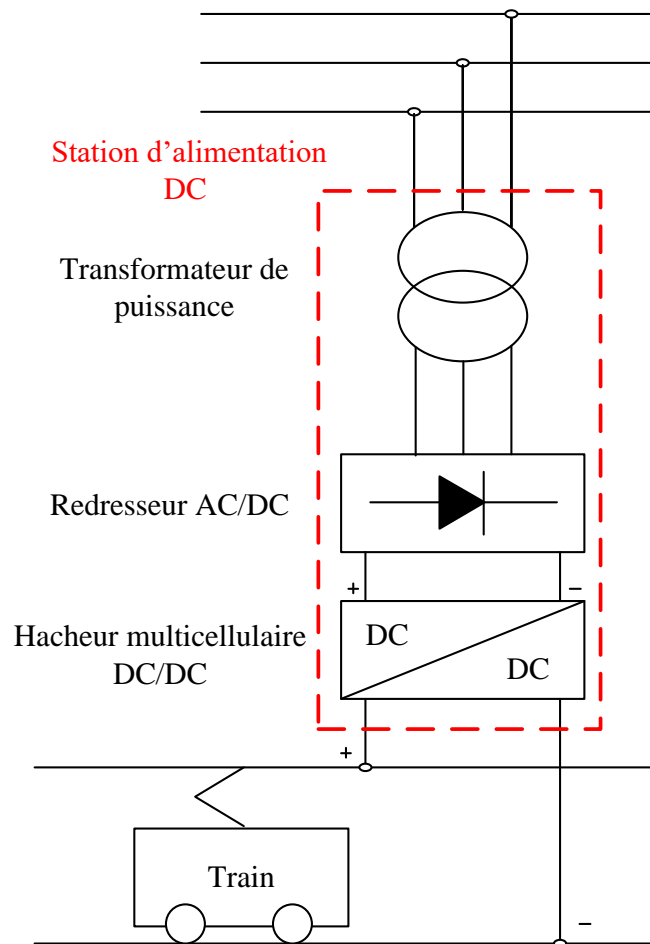


Fig.III.3 .représente un système de transport ferroviaire électrique à base du convertisseur multicellulaire (DC/DC)

le schéma représente un système de contrôle pour une chariot de train électrique au moyen d'un convertisseur AC/DC (Redresseur) et d'un convertisseur multicellulaire DC/DC (Achor), ce système nous donne une tension constante et contrôlable pour variation de la vitesse de cette chariot.

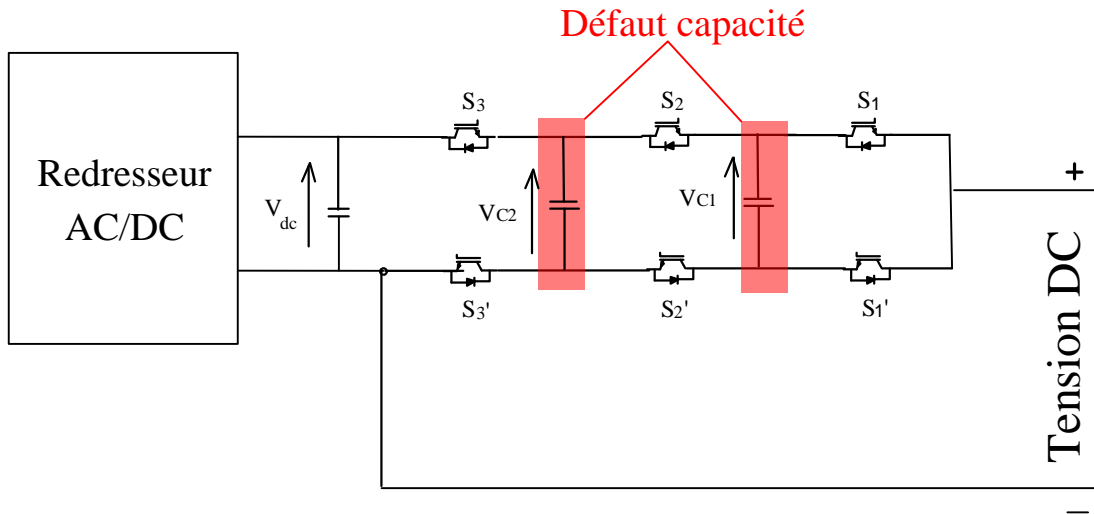


Fig.III.4 Défaut de capacité dans un Redresseur multicellulaire à trois cellules.

Le figure III.4 représente un Redresseur multicellulaire à trois cellules et sa configuration et les défauts du capacité flottant avec les interrupteurs et redresseur AC/DC .

### III.5 Résultats de simulation

#### III.5.1 Défaut d'un condensateur flottant

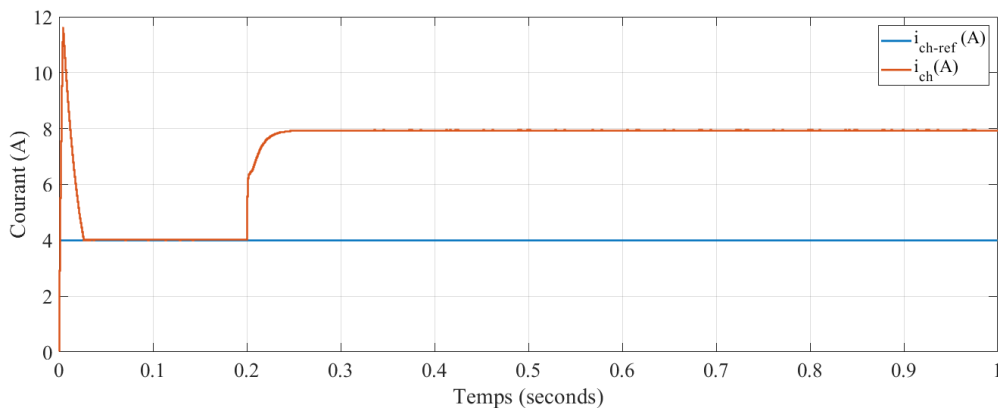


Fig.III.5 Courant de charge

La figure III.5 représente la courant de charge  $i_{ch}$ : être au début ( 12 A) puis est redescend jusqu'à sa valeur de référence( 4A) ,à (0.2 s) augmenter autre fois pour stabiliser à( 8A) et rester parallèle à sa valeur de référence.

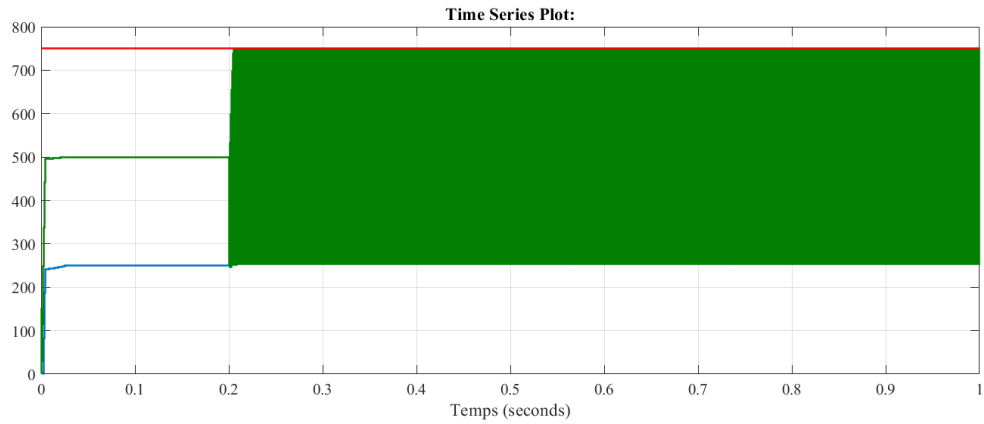


Fig.III.6 Tensions des condensateur flottants

La théorie de la puissance réactive instantanée est utilisée pour réguler la tension du bus continu à sa valeur de référence. Alors, selon la figure III.6 la tension du bus continu  $V_{dc}$  tendent vers sa valeur de référence (750V) après (0.01S),  $v_{c2}$  garde sa forme sinusoïdale, et  $v_{c1}$  stabiliser à valeur (250 V).

### III.5.2 Défaut de deux condensateur flottant

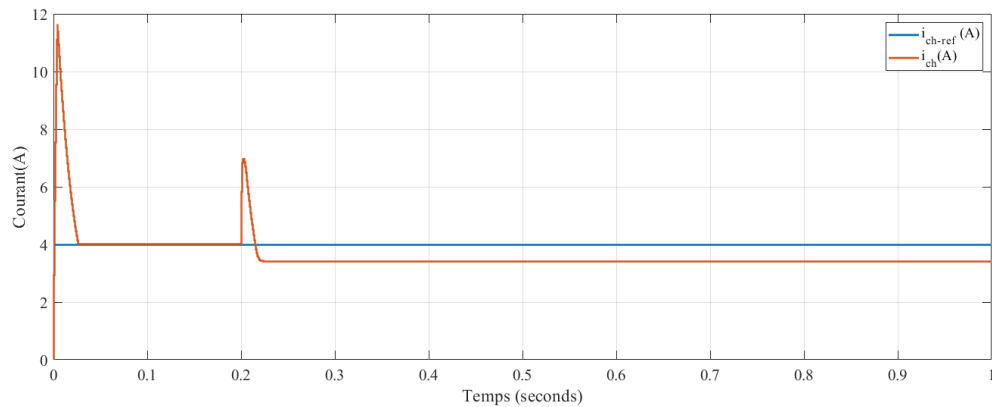
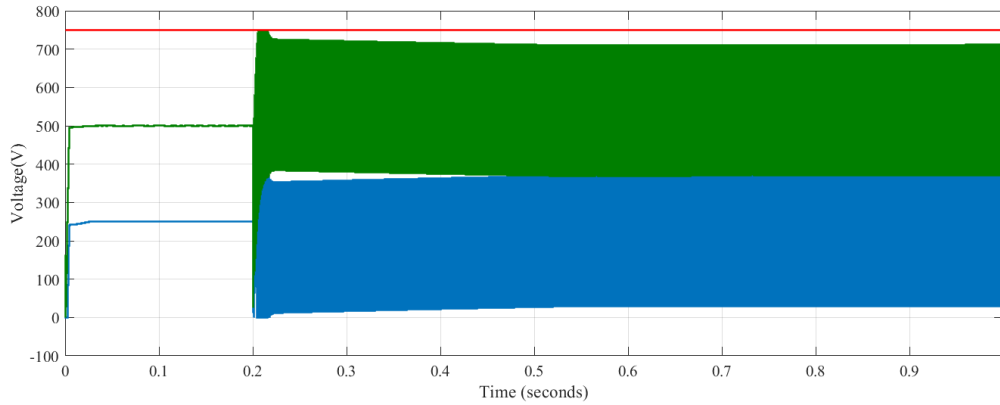


Fig.III.7 Courant de charge

La figure III.7 représente la courant de charge  $i_{ch}$  dans le cas du défaut de deux condensateur flottant : être au début (12 A) puis est redescend jusqu'à sa valeur de référence(4A), à (0.2 s) augmenter autre fois pour stabiliser à valeur très proche (3.9 A) de sa valeur de référence.



*Fig.III.8 Tensions des condensateur flottants*

Alors, selon la figure III.8 la tension du bus continu  $V_{dc}$  tendent vers sa valeur (750V)  $v_{c1}$  et  $v_{c2}$  garde sa forme sinusoïdale après (0.2 S).

#### III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons parlé sur les défauts dans le convertisseur multicellulaire et ses types et les méthodes de diagnostic. Pour cela on porte aujourd'hui un grand effort sur la surveillance et le diagnostic des systèmes industriels. le diagnostic est un des facteurs contribuant à la disponibilité de l'outil de production [24].

Ces raisons expliquent la grande diversité des méthodes de diagnostic industriel. Le problème du diagnostic industriel se ramenant par définition au problème inverse entre les causes et les effets. Une connaissance des différents phénomènes régissant les matériels des systèmes industriels est absolument indispensable pour entreprendre le diagnostic d'une défaillance [25].

## **Conclusion générale**

## **Conclusion générale**

Les recherches actuelles en électronique de puissance dans le domaine des applications automobiles notamment les voitures électriques (EVs) et la voiture hybride électrique (HEVs) se focalise essentiellement sur les convertisseurs de puissance destinés à la gestion d'énergie embarquée dans ces véhicules.

Dans ce mémoire, nous avons appris au premier chapitre à le système de traction électrique ferroviaire est composé par des installations fixes (sous-stations, caténaires, rails) et par le matériel roulant (train de fret ou de voyageurs tracté par une locomotive). Dans la plupart des cas, l'alimentation en énergie électrique de la locomotive est assurée via une ligne aérienne appelée la caténaire. Un pantographe, équipé d'un frotteur, permet à l'engin de traction de capter le courant. Le système d'alimentation par troisième rail est généralement limité au métro et n'est que très rarement utilisé pour des liaisons interdites.

Et dans le deuxième chapitre. Nous avons conclu dans ce chapitre une généralité sur les convertisseurs de puissance puis modélisation. Ils sont nécessaires d'assurer une répartition équilibrée des contraintes en tension des interrupteurs de puissance lors d'une association en série des cellules de commutation. Et la commande par mode glissant du convertisseurs multicellulaires séries, cette commande est obligée de rester au voisinage de la surface de glissement.

Dans le troisième et dernier chapitre, nous avons longuement parlé de on porte aujourd'hui un grand effort sur la surveillance et le diagnostic des systèmes industriels. Nous avons appris que le diagnostic est un des facteurs contribuant à la disponibilité de l'outil de production. Il a pour principe la détection rapide ou précoce d'une défaillance des matériels des systèmes industriels. Ces raisons expliquent la grande diversité des méthodes de diagnostic industriel. Le problème du diagnostic industriel se ramenant par définition au problème inverse entre les causes et les effets. Une connaissance intime des différents phénomènes régissant les matériels des systèmes industriels est absolument indispensable pour entreprendre le diagnostic d'une défaillance.



# **Bibliographie**

### Bibliographie

- [1] Mr.BENADEL MASSAOUD : « Modélisation et simulation des convertisseurs statiques (application à la structure multicellulaire série) », Université de M'hamed Bougara Boumerdés 2010.
- [2] A. BOCHERIT : « Conception d'un convertisseur de puissance pour les véhicules électriques multi-sources », DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBELIARD , December 2016.
- [3] MARTIN AIME " Évaluation et optimisation de la bande passante des convertisseurs statiques application aux nouvelles structures multicellulaires " Thèse de doctorat 2003 Institut national polytechnique de Toulouse.
- [4] S. Meradi, K. Benmansour, M. Tadjine and M. S. Boucherit, « Nouvelle topologie des convertisseurs tolérante aux défauts », conférence paper , October 2012.
- [5] Y. Oura, Y. Mochinaga, et H. Nagasawa, « Railway Electric Power Feeding Systems », 1998.
- [6] Kiessling, Puschmann, Schmieder, et Schneider, Contact Lines for Electric Railways, Third edition.
- [7] A. Steimel, « Electric railway traction in Europe », IEEE Ind. Appl. Mag., nov. 1996.
- [8] P. Ladoux, J. Fabre, et H. Caron, « Power Quality Improvement in ac Railway Substations: The concept of chopper-controlled impedance. », IEEE Electrification Mag., vol. 2, no 3, p. 6-15, sept. 2014.
- [9] L. A. Lowinsky, « Nouvelle topologie de Compensateur de Puissance Réactive pour les Réseaux Ferrés 25 kV / 50 Hz », thesis, Toulouse, INPT, 2010.
- [10] H. Hayashiya et al., « Review of regenerative energy utilization in traction power supply system in Japan: Applications of energy storage systems in d.c. traction power supply system », in IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2017, p. 3918-3923.
- [11] A. Clerici, E. Tironi, et F. Castelli-Dezza, « Multiport Converters and ESS on 3-kV DC Railway Lines: Case Study for Braking Energy Savings », IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 54, no 3, p. 2740-2750, mai 2018.
- [12] P. Ladoux, F. Alvarez, H. Caron, G. Josse, et J. Perret, « Une nouvelle structure d'alimentation des caténaires 1 500 V : Le système 2 x 1500 V », Rev. Générale Chemins Fer, vol. 21, p. 21-31, 2006.
- [13] P. Ladoux, J. M. Blaquiére, H. Caron, D. Iannuzzi, et M. Coppola, « New three-wire supply systems for DC electric railways », IET Electr. Syst. Transp., vol. 5, no 3, p. 112-119, 2015.

## Bibliographie

---

- [14] J. Martin, « Caractérisation en commutation douce d'IGBT 6,5 kV pour l'application transformateur moyenne fréquence en traction ferroviaire », thesis, Toulouse, INPT, 2010.
- [15] D. Ronanki, S. A. Singh, et S. S. Williamson, « Comprehensive Topological Overview of Rolling Stock Architectures and Recent Trends in Electric Railway Traction Systems », IEEE Trans. Transp. Electrification, vol. 3, no 3, p. 724-738, sept. 2017.
- [16] Alexandre Leredde Etude, Commande et Mise en Oeuvre de Nouvelles Structures Multiniveaux Thèse de doctorat 2011 Institut national polytechnique de Toulouse.
- [17]. M.Garero la conversion DC-DC : les hacheurs
- [18]S. Kouro, M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Pou, L.G. Franquelo, B. Wu, J. Rodriguez, M. A. Pérez, J. I. Leon, “Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel Converters”, IEEE Trans. Ind. Electronics, vol.57, no. 8, August 2010.
- [19]A. Nabae, I. Takahashi, H. Akagi “A new neutral-point-clamped PWM inverter”, IEEE Trans. Industry Application, Vol.IA-17, 1981.
- [20] T.A. Meynard, H.Foch, “Multi-level Conversion: High Voltage Choppers and Voltage-Source Inverter”, IEEE Power Electronics Specialist Conference, 1992.
- [21]T. Brückner and S. Bernet, “Loss balancing in three-level voltage source inverters applying active NPC switches,” Proc IEEE. PESC 01 Vancouver, BC, Canada, 2001, pp. 1135-1140
- [22]ADEL CHOUDER " Contribution à la commande des convertisseurs multicellulaires séries" mémoire de magister 2010 Université de Sétif.
- [23]GUILLAUME GATEAU " Contribution à la commande des convertisseurs statiques multicellulaires série " Thèse de doctorat 1997 Institut national polytechnique de Toulouse.
- [24] G. C. Loveday, Contrôles et diagnostics en électronique, Editions Eyrolles, Paris, 1995.
- [25] G. Zwingelstein, Diagnostic des défaillances, Editions Hermès, Paris, 1995
- [26] Jean-Claude Trigeassou, « Diagnostic des machines électriques, » Collection : Traité EGEM Série Génie électrique, Editeur : HERMÈS / LAVOISIER paru le : 05/2011.
- [27] H. Titah-Benbouzid and M.E.H. Benbouzid, “Marine renewable energy converters and biofouling: A review on impacts and prevention,” in Proceedings of the 2015 EWTEC, Nantes (France), September 2015.
- [28] J. Mavier, "Convertisseurs génériques à tolérance de panne Applications pour le Domaine aéronautique", thèse de doctorat, INPT, Toulouse, mars 2007.

## Bibliographie

---

- [29] S. Toumi, Contribution a la commande résiliente aux défaillance des convertisseur Statique et a la démagnétisation de la génératrice synchrone a aimants permanents d'un Hydrolienne, Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale, thèse soutenue le 9/12/2017.
- [30] M. Trabelsi, M. Boussak and M.E.H. Benbouzid, "Multiple criteria for high Performance online diagnosis of single and multiple open-switch faults in AC motor drives: Application to IGBT-based voltage source inverter", Elsevier Electric Power System, esearc , (EPSR), mars 2017.
- [31] N. K. Nguyen, F. Meinguet, E. Semail and X. Kestelyn, "Fault tolerant operation of an open end winding five phase PMSM drive with short circuit inverter fault," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Jan. 2016.
- [32] M. Trabelsi, M. Boussak, and M. Benbouzid, "Multiple criteria for high performance real-time diagnostic of single and multiple open-switch faults in acmotor drives: Application to IGBT-based voltage source inverter," Electric Power Systems Research, 2017.
- [33] A. M. S. Mendes and A. J. Marques Cardoso, "Voltage source inverter fault diagnosis in variable speed AC drives, by the average current Park's vector approach," Electric Machines and Drives," International Conference IEMD '99, Seattle, WA, 1999.
- [34] K. Rothenhagen and F. W. Fuchs, "Performance of diagnosis methods for IGBT open circuit faults in three phase voltage source inverters for AC variable speed drives," European Conference on Power Electronics and Applications, Dresden, 2005.
- [35] F. Zidani, D. Diallo, M. E. H. Benbouzid and R. Nait-Said, "A fuzzy-based approach for the diagnosis of fault modes in a voltage-fed PWM inverter induction motor drive," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Feb. 2008.
- [36] J. O. Estima, A. J. Marques Cardoso, "A new algorithm for real-time multiple open circuit fault diagnosis in voltage fed PWM motor drives by the reference currents errors," IEEE Trans. Indus. Electron., Aug. 2013.
- [37] F. Wu and J. Zhao, "A real-time multiple open-circuit fault diagnosis method in voltage-source-inverter fed vector controlled drives," IEEE Transactions on Power Electronics, Feb. 2016.
- [38] S. Karimi, P. Poure, and S. Saadate, "Fast power switch failure detection for fault tolerant voltage source inverters using FPGA," IET Power Electron., Jul. 2009.
- [39] Q. T. An, L. Z. Sun, K. Zhao, and L. Sun, "Switching function model-based fastdiagnostic method of open-switch faults in inverters without sensors," IEEE Transactions on Power Electronics, Jan. 2011.

## Bibliographie

---

- [40] I. Jlassi, J. O. Estima, S. K. El Khil, N. M. Bellaaj and A. J. M. Cardoso, “A robust observer based method for IGBTs and current sensors fault diagnosis in voltage source inverters of PMSM drives,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, May/June 2017.
- [41] D. U. Campos-Delgado and D. R. Espinoza-Trejo, “An observer-based diagnosis scheme for single and simultaneous open-switch faults in induction motor drives,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Feb. 2011.
- [42] N. M. A. Freire, J. O. Estima and A. J. M. Cardoso, “A voltage based approach without extra hardware for open circuit fault diagnosis in closed loop PWM AC regenerative drives,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Sept. 2013.
- [43] S. M. Jung, J. S. Park, H. W. Kim, K. Y. Cho, and M. J. Youn, “An MRAS-based diagnosis of open circuit fault in PWM voltage source inverters for PM synchronous motor drive systems,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, May 2013.

## **Résumé**

*Au cours de ces dernières années, les convertisseurs statiques voient progressivement leur champ d'applications s'élargir. C'est pourquoi ce travail consiste à étudier, de manière systématique, les performances dynamiques des convertisseurs statiques types multicellulaire avec la commande mode glissant utilisé dans le système de transport et enfin l'étude des différents défauts du convertisseur multicellulaire.*

## **Mots clés**

*convertisseurs statiques, mode glissant, convertisseur multicellulaire, puissance réactive instantanée.*

## **Abstract**

*In recent years, static converters have been gradually expanding their scope of application. This is why this work consists of systematically evaluating the dynamic performance of static multicellular converters with sliding mode control used in transportation, finally we study the effect of different faults of multicellular converter.*

## **Key Words**

*static converters, sliding mode, multi-cellular converter, instantaneous reactive power.*

## **المخلص**

وفي السنوات الأخيرة ، اتسع نطاق استخدام المحولات الثابتة تدريجيا. ولهذا السبب يتكون عمل هذه الأطروحة من تقييم منتظم للأداء الديناميكي للمحولات الثابتة. ويسلط الفصل الثاني الضوء على مختلف الأدوات النظرية لتقييم أداء الإلكترونيات الكهربية وتحديد كميتها. إن إمداد آلات المكيف بتطبيقات معينة أمر صعب للغاية من حيث الأداء الديناميكي.

## **الكلمات المفتاحية:**

محولات ثابتة ، نمط انزلاق ، محول متعدد الخلايا ، قوة رد فعل فورية.