



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE  
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم  
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



N° d'ordre : M...../GE/2021

## MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de

### MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

**Filière :** Electrotechnique

**Spécialité :** Electrotechnique Industrielle

Par

Lekweiry Ahmed Digue

Mohamed Benselloua Mouad

### Etude Comparative de la Commande des Eléments de Chargeurs Intégrés pour Véhicule Electrique

Soutenu le 04 / 07 / 2021 devant le jury composé de :

Président :	CHAOUCH. A	MCA	Université de UMAB
Examinatrice :	REZINI. S	MCB	Université de UMAB
Rapporteur :	BENYAMINA. M	MCA	Université de UMAB

Année Universitaire 2020/2021

## SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

### **CHAPITRE I : Généralités Sur Les Véhicules Électriques**

I.1. Introduction.....	3
I.2. Histoire de véhicules électriques :.....	3
I.3 La voiture de demain et électricité .....	5
I.4 Éléments constituant un véhicule électrique et son fonctionnement.....	6
I.4 .1 L'électrification de la chaine de traction .....	7
I.4 .1.1. Véhicules hybrides .....	7
I.4 .1.2. Véhicules électriques :.....	9
I.4 .1.3. Les sources d'énergie : .....	9
I.4 .2 . Le système de propulsion électrique :.....	10
I.4 .2 . 1. Moteur électrique.....	11
I.4 .2 .2. Convertisseur de puissance .....	11
I.4.2..3. Commande des convertisseurs de puissances .....	11
I.4.2.4. Les Auxiliaires .....	12
I.5. Les différentes architectures de traction.....	13
I.5.1. électriques mono moteur (machine à courant continu) .....	13
I.5.2. Véhicules électriques bi moteur (machine à courant alternatif) .....	14
I.6. Les différents modes de charge pour véhicules électriques.....	16
I.7. Les avantages et les inconvénients VE.....	17
I.8. Performances des véhicules électriques .....	18
I.8.1. La distance parcourue avant d'avoir à recharger le véhicule électrique .....	18
I.8.2. La vitesse maximale d'un véhicule électrique.....	19
I.8.3. Les normes de sécurité dans les véhicules électriques.....	19
I.8.4. La durée de vie d'une batterie et le cout de remplacement .....	19
I.8.5. La performance d'un véhicule électrique en hiver .....	20
I.9. Les solutions pour améliorer les véhicules électriques .....	20
I.10. Conclusion .....	21

## CHAPITRE II: structure de charge

II.1. Introduction :	22
II.2. Les sources d'énergies	22
II.2.1. La batterie :	23
II.2.1. 1) Différentes types des batteries.....	23
II.2.1. 2) Comparaison des différentes technologies des batteries .....	25
II.2.1. 3) Les risques engendrés par la batterie : .....	26
II.2.1. 4) Surveillance de la batterie : .....	27
II.2.1. 5) Modélisation de la batterie : .....	28
II.2.2. Le supercondensateur.....	36
II.2.2.1) Structure d'un supercondensateur .....	30
II.2.2.2) Le principe de fonctionnement d'un supercondensateur .....	31
II.2.2.3) Les différentes technologies du supercondensateur :.....	32
II.2.2.4) Modèle électrique : .....	33
II.3) Les convertisseurs de puissance :.....	34
II.3.1) - Les convertisseurs AC/DC (redresseur) .....	35
II.3.2) Correction du facteur de puissance (PFC) .....	35
II.3.3) Les convertisseurs DC/DC (Hacheur) .....	36
II.3.4) Les convertisseurs DC/AC (Onduleur).....	36
II.3.4.a) Onduleurs NPC ( Neutral-Point-Clamped ) .....	37
II.3.4.b) Principes de base de la branche 3 niveaux.....	37
II.3.4.c) Onduleurs à cellules imbriquées .....	37
II.3.4.d) Principes de base (Onduleurs à cellules imbriquées).....	37
II.3.4.e) Onduleurs multi niveaux symétriques .....	38
II.3.4.g) Onduleurs multi niveaux asymétriques (Onduleurs hybrides) .....	39
II.4) Chargeurs de batteries.....	40
a)- Chargeur externe .....	41
b)- Chargeur embarqué.....	41
II.4.1) les types de chargeur .....	41
a) Chargeur de type rapide .....	41
b) Chargeur de type lent .....	41
II.5.1) Chargeurs filaires unidirectionnels.....	43
II.5.2) Chargeurs filaires bidirectionnels : .....	43
II.6. Conclusion :	44

## Chapitre III: Modélisation Et Simulation

III.1. Introduction .....	45
III.2. Simulation du redresseur.....	45
III.3. Modélisation de l'hacheur :.....	47
III.4 Onduleur NPC à 3 niveaux de tension alimentant une charge RL .....	49
III.4.1 Problème de la tension du mode homopolaire ou le mode commun : .....	50
III.5 Les différentes techniques de modulation pour les Commandes MLI triangulo-sinusoïdale .....	50
III.5.1. Commande MLI Triangulo-sinusoïdale : .....	51
III.5.2.1 Modulation sinusoïdale classique.....	51
III.5.2.2 Modulation sinusoïdale à triangles multiple .....	55
III.5.2.3 Modulation sinusoïdale modifiée : .....	60
III.6 Interprétation des résultats des différentes commandes :.....	66
III.7 Conclusion :.....	66

## CHAPITRE IV: Modélisation et simulation de l'ensemble onduleur multiniveaux- machine asynchrone

IV.1 Introduction.....	67
IV.2 Généralités sur les machines asynchrones .....	67
IV. 2.1 Description et principe de fonctionnement :.....	67
IV.2.2 Hypothèse simplificatrices .....	68
IV.2.3 Avantages et inconvénients la machine asynchrone .....	69
IV.3 Modèle triphasé de la MAS : .....	69
IV.3.1 Equations des tensions : .....	69
IV.3.2 Equations des flux .....	71
IV.3.3 Equation d'état du modèle de la MAS .....	72
IV.3.4 Expression du couple: .....	73
IV.3.5 Equation du mouvement.....	73
IV. 4 Simulation de machine asynchrone connectée à un réseau triphasé équilibré... 74	
IV.4.a) Résultats de la simulation : pour un couple résistant $C_r = 0\text{Nm}$ .....	74
IV.4.b) Résultats de la simulation : pour un couple résistant $C_r = 20\text{ Nm}$ .....	75
IV.4.c) Interprétation des résultats:.....	76

IV.5.a) Résultat de simulation d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur à 3 niveaux commandé par La MLI modifiée : pour un couple résistant $C_r = 0\text{Nm}$ .....	78
IV.5.b) Résultat de simulation d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur à 3 niveaux commandé par La MLI modifiée : pour un couple résistant $C_r = 20\text{Nm}$ ...	81
IV.5.c) Interprétation des résultats.....	83
IV.6 Conclusion : .....	83
Conclusion générale.....	85
bibliographie.....	87

## **Introduction générale**

Avec la croissance démographique mondiale et le développement des pays émergents l'énergie est devenue indispensable à la vie quotidienne, mais l'homme ne s'est jamais préoccupé des menaces que peuvent lui apporter l'exploitation de cette énergie : d'une part cette énergie est appelée à s'épuiser et d'autre part elle est associée à des effets secondaires sur l'environnement. Le secteur des transports routiers est l'un des plus consommateur d'énergie et pollueur en termes d'émissions de gaz à effets de serre. Cette prise de conscience collective a entraîné des réglementations toujours plus strictes sur les émissions polluantes et la consommation des véhicules, qui sont ainsi devenues deux critères primordiaux pour la conception de nouveaux véhicules.

Les véhicules tout électriques ont été présentés comme une solution prometteuse, grâce à leur indépendance vis-à-vis du pétrole. Mais leur faible autonomie ne leur permet pas aujourd'hui de remplacer définitivement les véhicules conventionnels ; d'où le développement d'un autre concept [2]

Par ailleurs, afin d'exploiter au mieux les possibilités du véhicule et de réduire encore plus avant la consommation de carburant, la possibilité de recharger le véhicule pendant les phases d'arrêt (fin de journée ou livraison) est un vrai plus. En outre, si les véhicules rechargeables (électriques ou hybrides) ne sont à ce jour que des « consommateurs » d'énergie électrique, de nombreuses études sont menées afin d'utiliser au mieux ses capacités, que ce soit pour du simple lissage de consommation dans le cadre d'une flotte de véhicule jusqu'à une participation active au soutien du réseau électrique. Pour offrir un meilleur accès au réseau de distribution, le véhicule doit toutefois être capable de s'adapter aux sources disponibles (triphases et monophasées). Le principal objectif de cette étude sera de proposer un convertisseur de puissance pouvant s'intégrer dans ce contexte environnemental.

L'utilisation des techniques de modulation comme stratégie de commande de l'ouverture et de la fermeture des interrupteurs réduit considérablement les harmoniques.

La modulation de largeur d'impulsion triangulo-sinusoidale modifiée semble la meilleure technique de commande de l'ouverture et de la fermeture des interrupteurs mais elle nécessite la connaissance des temps de commutation à chaque instant de modulation, en plus la commande des interrupteurs de chaque bras de l'onduleur doit se faire d'une manière séparée.

PoWEur aboutir à cette fin nous utilisons une simulation de commande de l'onduleur basé sur cette technique de modulation. Le fonctionnement de cette simulation sera testé sur un moteur asynchrone.

Il sera question aussi de tracer la FFT et de déterminer le taux d'harmonique THD des tensions afin de prouver l'efficacité de cette simulation et par conséquent l'efficacité de la technique MLI modifiée appliquée aux onduleurs multiniveaux de tension.

Ainsi, dans le cadre de cette étude nous avons choisi de travailler avec le logiciel Powersim. Le travail présenté est organisé comme suit :

- Le premier chapitre présente une généralité sur les véhicules électriques
- Le second chapitre est consacré pour les différents types de batteries utilisées dans les véhicules électriques
- Dans le troisième chapitre on présente la modélisation et la simulation des différentes parties du modèle choisi du VE.
- Dans le dernier chapitre, nous allons alimenter une machine asynchrone par un convertisseur trois niveaux de type NPC commandé par la technique MLI modifiée sous Powersim. Les résultats obtenus seront interprétés et discutés.

# CHAPITRE I : Généralités Sur Les Véhicules Électriques

## I.1. Introduction

Le véhicule électrique a une histoire aussi longue que celle de l'automobile. Les véhicules électriques correspondent à l'ensemble des véhicules équipés d'un ou plusieurs moteurs fonctionnant principalement avec une propulsion électrique. On distingue aujourd'hui trois principales catégories de véhicules électriques :

- Le véhicule électrique à batterie aussi appelé véhicule tout électrique ou 100% électrique (VEB). Il utilise pour unique énergie motrice l'électricité stockée dans des batteries rechargeables sur le secteur.
- Le véhicule hybride rechargeable (VHR). Il est doté d'un moteur thermique et d'un moteur électrique alimenté par des batteries. Le VHR démarre en mode électrique et le groupe thermique n'intervient qu'au-delà d'une certaine vitesse ou lorsque les batteries sont épuisées. Contrairement à l'hybride conventionnel, il peut se recharger directement sur le secteur.
- Le véhicule à pile à combustible (PAC). Elle est aussi appelée voiture à hydrogène car son moteur électrique est alimenté par une pile à combustible qui produit elle-même l'électricité à partir de l'hydrogène [2].

- L'objectif de ce premier chapitre est de présenter un bref historique dans un premier temps, nous nous intéresserons aux sources d'alimentation : batteries ainsi qu'aux super condensateurs (SC) comme source auxiliaire très utile dans le cas de forte demande de puissance, et dans le cas de freinage pour la récupération d'énergie. Puis, nous traiterons du moteur de traction et des auxiliaires. Après cela nous approfondirons la problématique de la gestion d'énergie dans la voiture électrique par une comparaison entre plusieurs topologies des convertisseurs. Cette comparaison sera présentée notamment sur la base des topologies isolées et non isolées. En se basant sur cette comparaison nous montrons l'intérêt de développer une nouvelle topologie à la base d'une structure non isolée. [6]

## I.2. Histoire de véhicules électriques :

Le concept de Le véhicule électrique n'est pas nouveau. Le premier véhicule électrique fut construite en 1839 et le cap de 100 km/h dépassé en 1899. Mais avec l'avènement du démarreur autonome, le moteur à pistons balaie les véhicules électriques et les véhicules à vapeur par la même occasion. Il faut attendre jusqu'en 1973 au moment où le choc pétrolier et la flambée du prix du carburant ravivent l'intérêt pour les véhicules électriques [2]



### **a. Première période : seconde moitié du XIXe siècle**

L'idée du transport électrique se construit au rythme lent de l'émergence de l'électricité dans les deux premiers tiers du XIXe siècle en Europe. Le succès de Peter Barlow à faire tourner en 1823 une roue sous l'action d'un électro-aimant pourrait être considéré comme le point de départ de l'histoire du transport électrique. Presque vingt ans plus tard, en 1842, la première véhicule électrique [1]

### **b. Vers les solutions commerciales d'aujourd'hui**

Les véhicules tout électriques (BEV pour Batterie Electric Véhicule) ont pris un véritable essor dans les années 1990. Ils sont apparus, dans un premier temps, comme une solution prometteuse, grâce à des atouts indéniables : absence de pollution, silence de fonctionnement et indépendance vis-à-vis du pétrole. Par contre, leur principal handicap réside dans le coût assez élevé de la batterie et sa faible autonomie pour une utilisation dans le domaine des transports. [2]

La recherche pour un moyen de transport électrifié se poursuit à un rythme lent mais avec espoir au cours de la dernière décennie du XIXe siècle. En 1890, la victoire d'une voiture électrique lors de la première course automobile américaine organisée à Springfield renforce les espérances. La même année, Edison construit un véhicule expérimental pour tester ses batteries nickel-fer. Précisons qu'à la fin de ce siècle, la France et la Grande Bretagne constituent le groupe des pionniers du développement des véhicules électriques. Ce n'est pas avant 1895 que les Américains commencent à s'intéresser au VE, juste après la construction du 1er tricycle électrique par Ryker en 18918. Ensuite, de nombreuses expériences et des innovations variées se multiplient tant en Europe qu'aux États-Unis [1].



**Figure I 1:** exemple de véhicule électrique (la jamais contante) réalisée en 1899

Pourtant, le développement du véhicule électrique se fait plus difficilement que prévu, et beaucoup plus lentement que celui de l'électricité. Alors que les entreprises électriques deviennent des acteurs à part entière de l'industrie, les progrès enregistrés par le véhicule électrique restent modestes. Face à des véhicules à essence en progrès constant, le véhicule électrique peine à relever le défi. Les différentes courses organisées aux Etats-Unis ou bien en Europe mettent en lumière les limites de la voiture électrique et ce malgré ses avantages par rapport à ses concurrents au début des années 1900, tels que le système de freinage et la récupération de l'énergie dans les descentes, l'absence de vibrations, d'odeurs et de bruits. En plus, le problème du changement de vitesse qui constitue la partie la plus difficile de la conduite d'un véhicule thermique n'existait pas pour le VE. Or, le véhicule à vapeur, qui n'a pas non plus le problème du changement de vitesse, souffrait d'un démarrage qui pouvait prendre jusqu'à 45 minutes dans un matin froid. En plus, le véhicule à vapeur a eu une autonomie plus réduite par rapport à un véhicule électrique. [1]



**Figure I 2:** Exemple de véhicule d'aujourd'hui.

Parallèlement aux difficultés techniques et commerciales rencontrées par les véhicules électriques, les moteurs thermiques n'ont cessé de se perfectionner, avec notamment l'apparition de l'électronique dans les systèmes de gestion des moteurs permettant de contrôler les éléments du moteur de manière précise et efficace (injection électrique, Start &Go...). Les ventes ne dépassent pas les quelques centaines d'unités. La vente des véhicules tout électrique reste très limitée. [2]

### **I.3 La voiture de demain et électricité**

Ses limites (encombremments de circulation, pollution urbaine, peut-être prix des carburants). Dans ce contexte, des sondages réalisés depuis deux ans font apparaître que les trois quarts des Français se déclarent prêts à acquérir un véhicule électrique, sous réserve qu'il ne coûte pas plus cher qu'un véhicule conventionnel équivalent et que le handicap de l'autonomie soit réduit. En revanche, en dehors des configurations urbaines spécifiques (qui concentrent quand même près de la moitié du parc automobile), la voiture particulière représente un « accessoire de vie »

incontournable, synonyme de mobilité per sonnelle et de liberté, voire d'outil de travail indispensable.

Ces véhicules auront l'immense mérite de contribuer à réduire la pollution dans nos métropoles. Cependant, comme le souligne le rapport, on ne peut pas à proprement parler de véhicules « zéro émission ». Une voiture électrique ne pollue pas lorsqu'elle roule, mais le -bilan environnemental global doit prendre en compte la production de l'électricité consommée (ainsi que celle utilisée pour la fabrication de la batterie) et dépend donc du mode de production électrique de chaque pays. [3]

#### **I.4 Éléments constituant un véhicule électrique et son fonctionnement**

Les composants présents dans Les véhicules électriques ne sont jamais les mêmes selon le constructeur du modèle et la technologie utilisée.

Encore appelées véhicules à énergie embarquée, les voitures électriques ne prennent pas de carburant. Ils se déplacent grâce à la force d'un ou de plusieurs moteurs électriques ravitaillés par une batterie d'accumulateur, une pile à combustible ou un moteur thermique couplé à un générateur. La puissance des moteurs électriques varie selon l'usage et les performances attendues et peut osciller entre 15 et 400 kWh.

Pour recharger un véhicule électrique, il faut disposer d'installations de recharge simples et pratiques. Ces outils devront permettre de recharger le véhicule au cours de déplacements. Recharger sa voiture électrique est très simple. Il suffit de la brancher sur une prise domestique à l'aide du câble de recharge fourni à l'achat ou en utilisant un wallbox. Il est aussi possible d'effectuer le recharge par câble (qui est d'ailleurs plus économique) . La recharge par câble se fait continuellement avec une intensité qui va de 8 à 10 A. Ce qui occasionne un temps de recharge plus long. Par ailleurs, pour des raisons de sécurité, il est recommandé par les grands constructeurs de se servir d'une wallbox pour la recharge. L'autre avantage relatif à l'usage d'une wallbox est qu'elle recharge plus rapidement de la voiture (avec une intensité qui peut aller jusqu'à 16 A, voire plus).

Dans cette partie nous allons nous intéresser aux éléments impotents utilisés dans un véhicule électrique comme les sources d'énergie électrique et les systèmes de propulsion électrique ainsi les auxiliaires.

## I.4 .1 L'électrification de la chaine de traction

Des chaines de traction consiste : d'une part à incorporer dans les véhicules thermiques traditionnels des composants électriques pour jouer un rôle plus ou moins important dans la traction du véhicule et la récupération d'énergie. On parle dans ce cas des véhicules hybrides, d'électrification. D'autre part, les véhicules électriques utilisent la seule motorisation électrique pour la traction et parcourent des distances L'électrification dites à zéro émission de CO2. Nous allons détailler dans la partie ci-dessous le fonctionnement de ces véhicules électrifiés.[4].

### I.4 .1.1. Véhicules hybrides

On introduit la notion de véhicule hybride lorsqu'un véhicule à moteur électrique embarque plusieurs sources d'énergies supplémentaires. L'hybridation est aussi l'association d'un moteur à combustion interne avec une machine électrique associée à un système de stockage. Cette dernière permet de diminuer la consommation d'énergie ainsi que les émissions de gaz à effet de serre. On distingue alors deux principaux concepts de véhicule hybride à savoir : – Hybride série ; Hybride parallèle. [4]

#### a. Hybridation série :

Le véhicule est propulsé uniquement par un moteur électrique. Ce moteur est Alimenté par des batteries qui sont rechargées par une deuxième source d'énergie et un freinage régénératif. La seconde source peut être thermique ou électrique [6]

Le générateur qui fournit l'énergie au moteur électrique. La batterie peut fournir un supplément de puissance ponctuel si c'est nécessaire. La gestion des flux d'énergies se fait de manière que le moteur thermique ne subisse pas des chargements trop brutaux de régimes,

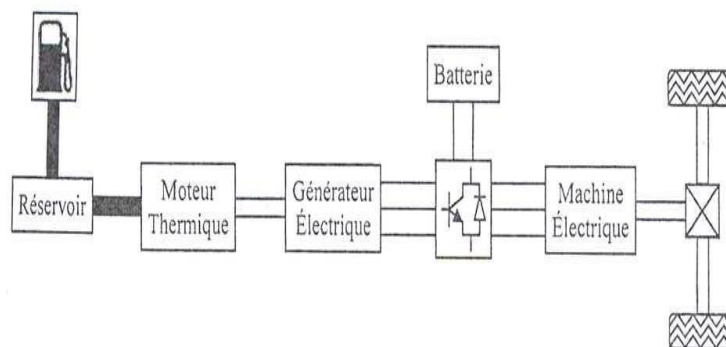


Figure I 3: Moteur électrique indépendant du moteur thermique

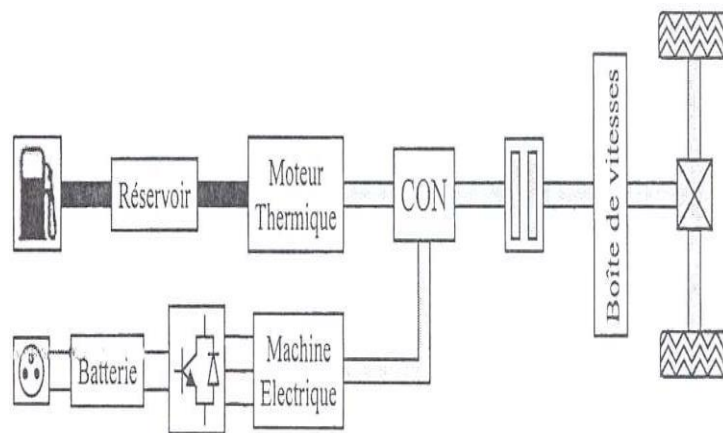
## Avantages du VHS

Parmi ces avantages on cite son autonomie et sa puissance disponible comparable à un véhicule thermique. De plus, cette configuration offre la possibilité d'une gestion globale de l'énergie présente dans le système (thermique et électrique). Enfin, la batterie, largement sous-dimensionnée par rapport au véhicule tout électrique, devient non limitative d'un point de vue énergétique mais aussi permet le mode de fonctionnement à zéro émission. Inconvénients du VHS : l'inconvénient majeur de cette configuration est l'importance du système de motorisation qui engendre par conséquent l'augmentation de la masse et du coût.[4]

### • Hybridation parallèle

Si l'hybridation est électrique-thermique, les deux moteurs s'additionnent Mécaniquement pour propulser le véhicule. Si l'hybridation est électrique-

Électrique, la puissance nécessaire pour propulser le véhicule est divisée entre les deux sources d'énergie selon leurs dimensions à l'aide d'un système de commande électrique.[6]



**Figure I 4:** Moteur électrique indépendant du moteur thermique

Quant aux avantages et inconvénients du Véhiculé Hybride Parallèle (VHP) , sont données comme suit : Avantages du VHP : parmi lesquels on cite ses performances et son autonomie qui sont comparables à celles d'un véhicule thermique mais surtout son taux d'émission zéro en mode électrique. Inconvénients du VHP : l'inconvénient majeur du VHP se résume comme suit : d'une part le poids et l'encombrement élevé, de son système de motorisation et d'autre part, la redondance de fonctionnalités entre ses deux moteurs. Il peut être intéressant de combiner les deux types hybrides précédents pour réaliser un système série-parallèle Les constructeurs

automobiles ont rapidement réalisé l'utilité de fusionner ces deux configurations dans une architecture combinée, dite hybride série/parallèle. L'idée principale est d'utiliser le véhicule en tout électrique à basse vitesse, et ainsi éviter le fonctionnement du moteur thermique dans ses mauvaises zones de rendement. Le moteur thermique est allumé et participe à la traction dans le cas des vitesses élevées (ex. autoroute) ou dans le cas d'une forte.[4]

#### **I.4 .1.2. Véhicules électriques :**

Les véhicules électriques sont un ancien concept qui a vu le jour pour la première fois en 1834. À cette époque, le moteur électrique était un concurrent direct pour les moteurs à essence et à vapeur. À la moitié du 20<sup>ème</sup> siècle les véhicules à essence ont fini par exclure les véhicules électriques de la course. Il a fallu attendre le début du siècle 5 suivant pour repenser à l'idée d'utiliser ce type de véhicules dans le but de diminuer les effets négatifs du grand nombre de véhicules conventionnels. [6]

#### **I.4 .1.3. Les sources d'énergie :**

##### **a. La batterie :**

Une batterie permet de stocker l'énergie pour utiliser plus tard, est la principale source d'énergie qui permet l'alimentation d'une voiture électrique. Elles sont pour la plupart fabriquées en lithium-ion et leur durée de vie peut atteindre les cinq ans. Comme toute batterie, celle des voitures électriques a aussi trois éléments : l'anode (le pôle négatif) ; la cathode (le pôle positif).

On distingue deux types de stockages électriques

- Les accumulateurs

-Les supercondensateurs

##### **1. Les accumulateurs :**

Un accumulateur électrique est un dispositif destiné à stocker l'énergie électrique afin de pouvoir l'utiliser ultérieurement. Nous citons ci-dessous ses grandeurs caractéristiques :

La tension aux bornes est la tension fournie au cours de la décharge.

Elle dépend de l'enthalpie libre de la réaction totale, de la cinétique des réactions à chaque électrode et de la résistance de l'électrolyte.

La capacité de charge électrique, souvent appelée capacité de l'accumulateur est la charge électrique que peut fournir l'accumulateur complètement chargé pendant un cycle complet de décharge.

L'énergie stockée dans la batterie est égale à sa charge électrique multipliée par la tension moyenne sous laquelle cette charge est délivrée.

La densité d'énergie, exprimé en Wh/kg, est une des caractéristiques importantes d'un accumulateur, elle correspond à la quantité d'énergie qu'il peut restituer par rapport à sa masse.

La densité de puissance est la puissance que fournit la pile par unité de masse. La puissance fournie dépend du régime de décharge [2].

## **2. Les supercondensateurs :**

Cette technologie s'est développée au début du XXème siècle, avec une exigence en énergie plus importante qu'avec les condensateurs diélectriques classiques, de même qu'en puissance par comparaison avec les accumulateurs électrochimiques.

L'utilisation des supercondensateurs dans les VE n'est pas destinée au stockage d'énergie mais plutôt à la fourniture et à la récupération de fortes puissances sur de courtes durées, de l'ordre de la dizaine de secondes.

Parmi les différentes familles de supercondensateurs, les applications de véhicules hybrides et électriques utilisent le supercondensateur double couche autrement appel. Principe de fonctionnement Le supercondensateur se compose de deux collecteurs métalliques chacun couplés à deux électrodes carbonées, poreuses et imprégnées d'électrolyte [5].

### **I.4 .2 . Le système de propulsion électrique**

Un véhicule tout électrique (VTE) est défini comme étant un automobile entraîné par un moteur fonctionnant exclusivement par l'énergie électrique. Autrement dit, la force motrice est transmise aux roues par un ou plusieurs moteurs électriques selon la solution de transmission retenu, La solution électrique répond doublement aux exigences de la circulation urbaine, par son absence de pollution gazeuse et de nuisance sonore, Compte tenu des progrès scientifique et technologique, accomplis dans le domaine de l'électronique de puissance et leurs commandes [4].

### **I.4 .2 . 1. Moteur électrique**

Cette fois-ci, c'est la machine électrique assure à elle seule la traction du véhicule. C'est le mode « zéro émission » avec une consommation nulle en carburant. La durée d'activité de ce mode dépend de la charge des éléments de stockage ; tandis que les performances dynamiques de traction dépendent des puissances maximales que peuvent fournir les machines électriques qui lui sont associées [2].

### **I.4 .2 .2. Convertisseur de puissance**

Une autre version sur les systèmes électriques a émergé. Cela est dû à l'évolution des semi-conducteurs qui a permis aux convertisseurs de puissance d'élargir le champ d'application des machines électriques. Un convertisseur de puissance est un dispositif de puissance qui assure la liaison entre la source d'énergie et la machine à commander en modulant l'énergie disponible pour le besoin.

Des convertisseurs de courant alternatif en courant continu (AC-DC), que l'on appelle redresseurs ;

- Des convertisseurs de courant continu en courant continu (DC-DC), que l'on appelle hacheurs.
- Des convertisseurs de courant continu en courant alternatif (DC-AC), que l'on appelle onduleur [4].

### **I.4.2.3. Commande des convertisseurs de puissances**

Observons la configuration générale d'un système d'électronique de puissance. Notons que ce système comprend des convertisseurs statiques ainsi qu'une charge. Cette charge peut être une machine ou une installation électrique. Soulignons que ce système comprend par ailleurs des dispositifs de réglage et de commande ou encore des organes de mesure et capteurs

Chaque système d'électronique de puissance a besoin de dispositifs de réglage appropriés. Ils permettent de régler une grandeur au niveau de la charge et de limiter des grandeurs internes afin d'éviter des surcharges sur la charge et le convertisseur statique. Ainsi, les circuits de réglage sont complexes et nécessitent des signaux, fournis par les organes de mesure. Il est nécessaire également de compter des dispositifs de commande pour commander le convertisseur. On note une influence de signaux (flèches en trait continu) au départ du convertisseur statique, au travers de la charge, des organes de mesure vers les dispositifs de réglage, les dispositifs de commande et se terminant sur le convertisseur statique composant une boucle fermée. C'est le circuit de réglage. Il est indispensable de prévoir des dispositifs de protection contre une défaillance



comme le court-circuit, surchauffement, ou encore défaillance des composants de semi-conducteurs. [6]

#### I.4.2.4. Les Auxiliaires

Il s'agit de tous les équipements électriques, pneumatiques et hydrauliques qui ne participent pas à la traction du véhicule.

Comme le véhicule thermique, le véhicule électrique possède les mêmes auxiliaires. De très nombreuses fonctions sont apparues au cours des trente dernières années. Citons le verrouillage centralisé et la protection contre le vol, la direction assistée, les vitres électriques, la climatisation, les airbags qui deviennent incontournables vers 1995, citons aussi les essuie-glaces électriques, l'éclairage intérieur, les clignotants, le poste radio, les tableaux de bord avec lampes témoin qui sont apparus après la 1<sup>er</sup> guerre mondiale.

**Tableau I 1:** Puissances consommées par les auxiliaires des véhicules conventionnel

<b>Ordres de grandeur de puissances électrique</b>	<b>Puissance (W)</b>
Phares et éclairage additionnel	250
Feux de brouillard avant	110
Feux de brouillard arrière	30
Radio, système audio	15-100
Vitre arrière dégivrante	150
Chauffage de siège	150
Essuie-glace avant	50
Chauffage	5000

Les auxiliaires ne consomment pas toujours de façon simultanée leurs puissances maximales. Par exemple la consommation du chauffage est modifiable en fonction de la température extérieure.

## I.5. Les différentes architectures de traction

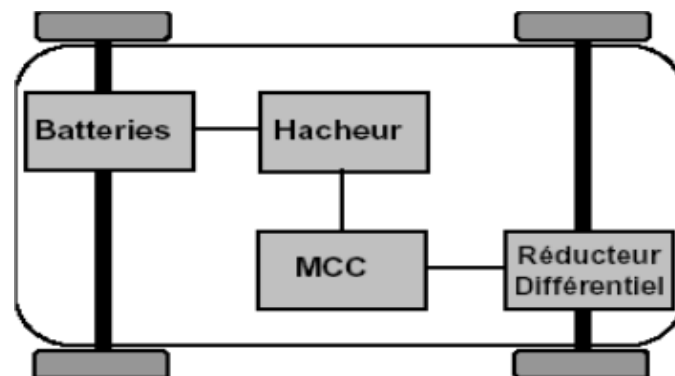
La traction automobile électrique peut être réalisée au moyen de trois grands types de machines électriques, les machines à courant continu (MCC), les machines asynchrones (MAS) et les machines synchrones (MS), uniquement en adaptant le type d'alimentation ainsi que le convertisseur. Partant de comparaisons déjà établies dans la littérature, les avantages et les inconvénients de chaque structure, vis-à-vis de l'application automobile, peuvent être aisément donnés [7].

**Tableau I 2:** Exemples de l'application de différentes motorisations dans la voiture électrique

Modèles EVs	Type de motorisation
Fiat Panda Elettra	MCC Series
Mazda Bongo	MCC séparé
Conceptor G-Van	MCC à excitation séparé
Suzuki senior tricycle	AM MCC
GM EV1	Moteur asynchrone
Toyota Prius	MSAP
Chloride Lucas	Moteur à RV

### I.5. 1. électriques mono moteur (machine à courant continu)

Parmi les différents types de moteurs à courant continu (moteur serie moteur à excitation séparée, moteur à aimants perméants) c'est essentiellement le moteur à excitation séparée qui est utilisé. C'est la solution la plus économique et la plus fiable grâce à son convertisseur d'induit du type hacheur à deux intercepteurs et un hacheur inducteur de plus faible puissance.



**Figure I 5:** Architecture d'un véhicule électrique mono moteur.

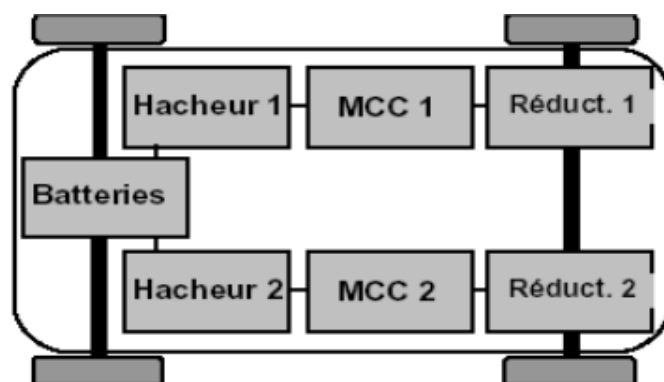
**Tableau I 3:** Avantages et inconvénients des MCC

Points forts	Points faibles
<ul style="list-style-type: none"><li>- Défluxage facile à réaliser pour la MCC à Excitation séparée.</li><li>- Électronique de commande simple</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Présence du système balais collecteur nécessitant un entretien périodique</li><li>- Couple et puissance massique, Induit difficile à refroidir.</li><li>- Coût de construction, machine complexe mécaniquement.</li></ul>

Les MCC ont équipé les premiers véhicules électriques lancés en grande série à partir de 1995 comme les Peugeot 106 et Partner, les Citroën AX, Saxo et Berlingo. Dans le cas de la 106, la traction du véhicule est assurée par une MCC à excitation séparée qui présente des puissances nominale et maximale de 11 et 20 kW. Les batteries au nickel/cadmium offrent ainsi une autonomie maximale de 90 km. Bien que ces machines soient une solution intéressante en raison de leur simplicité en défluxage et en pilotage. Elles ont cependant comme gros désavantage de nécessiter un entretien du système balais-collecteur et des performances intrinsèques assez modestes. Les machines à courant alternatif comme les machines asynchrones sont des solutions tout aussi plausibles pour l'application automobile [7][8].

### I.5.2. Véhicules électriques bi moteur (machine à courant alternatif)

Il existe deux types de machine à courant alternatif Le moteur synchrone et Le moteur asynchrone.



**Figure I 6:** Architecture d'un véhicule électrique bi moteur

## **A .Le moteur synchrones (MS)**

Dans cette catégorie, on trouve plusieurs sortes de configurations dont nous citons la plus fréquente dans la littérature : Le moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) semble à plus d'un titre, une solution adaptée pour ses performances techniques et en particulier, son rendement. L'excitation dans ce cas est créée par les aimants permanents. Les avantages dont dispose cette machine est les valeurs élevées des rapports couple/masse et puissance/masse ainsi que leur bon rendement. Cependant le prix des aimants est élevé et ne permet pas, à ce jour, de satisfaire la contrainte sur le prix de vente [4].

### **- Avantages**

- elle dispose de excellentes performances en couple et puissance ;
  - l'inertie du rotor est très faible ;
  - C'est la technologie de machine qui a les meilleures performances en couple et en dynamique.
- [6].

### **- Inconvénients**

- son prix est encore élevé ;
- problème de tenu en température des aimants ;
- électronique de commande assez compliquée ;
- fragilité des aimants et complexité du montage du rotor aimanté.
- Désaimantation des aimants [6].

## **b. Le moteur asynchrone**

Le moteur asynchrone est la solution envisagée par de nombreux constructeurs. On peut distinguer deux types : les moteurs à bagues et à cage d'écureuil. Le moteur asynchrone à cage est robuste. Il a une puissance massique assez élevée, ce qui conduit à un bon rendement pour la chaîne de traction. Le MAS est le candidat le plus adapté pour propulser les véhicules électriques (VE), grâce à l'implantation des techniques de commande nouvelles. Actuellement, la technique de commande la mieux adaptée est la commande vectorielle à flux rotorique orienté qui permet de piloter la machine en vitesse variable avec une grande souplesse. Donc, a chaque application de propulsion s'applique un type de moteur déférent. Il n'y a pas de moteur universel, tout comme les batteries, chaque moteur a des avantages et des inconvénients mais ce sont essentiellement les notions de cout et de difficulté de la commande qui s'affrontent [4].

**Avantage :**

- elle a de bonnes performances à puissance maximale et une vitesse maximale élevée.
- elle possède de grandes qualités de dynamique de couple (avec des accélérations supérieures à 10 000 tr/min/s).
- la machine asynchrone avec un rotor à cage est particulièrement robuste

**Inconvénients :**

- le coût est élevé, essentiellement dû à l'électronique d'alimentation et de contrôle.
- le couple maximal est assez faible.
- Appel de courant très important Intensité de Démarrage = 4 à 8 Intensité Nominale.
- Démarrage brutal [6].

**I.6. Les différents modes de charge pour véhicules électriques****a. Prise domestique**

Le VE est branché au réseau d'alimentation à l'aide d'une prise normalisée (intensité standard jusqu'à 16 A). Adapté pour les petites puissances de charge telles que les deux roues, les quadricycles, les VEH et les anciennes générations de VE. L'installation électrique est équipée d'une prise de terre, un disjoncteur contre les surcharges et une protection différentielle

**b. Prise domestique et câble équipés d'un dispositif de protection**

Il possède les mêmes propriétés que la prise domestique, intégré au câble pour une meilleure sécurité. Un VE peut être rechargé avec installation de prise domestique, Cette configuration est considérée comme un mode dégradé de transition ou de dépannage mais très coûteuse.

**c. Prise spécifique sur un circuit dédié**

Le véhicule est relié au réseau électrique via un socle (wallbox), une prise électrique et un circuit dédié. Equipé d'un quatrième fil entre la borne et le véhicule afin de garantir la continuité avec la terre et permettre au véhicule de dialoguer en permanence avec l'infrastructure. Une fonction de contrôle et de protection est installée en permanence dans l'installation. En effet, avant d'enclencher la recharge, le système de contrôle vérifie que le véhicule est bien connecté, que la masse est reliée au circuit de protection de l'installation et que les puissances entre le câble, le véhicule et le circuit de charge sont cohérentes.

#### **d) Connexion courant continu**

Le VE est branché indirectement au réseau de distribution par le biais d'un chargeur externe. il est également équipé d'une fonction de contrôle et de charge. Le véhicule est alimenté en courant continu par l'intermédiaire d'un chargeur externe lui-même raccordé à l'installation électrique fixe. Dans ce mode, le câble de recharge du véhicule est fixé à demeure à l'installation. Les connecteurs de raccordement sont spécifiques. Le mode de charge en courant continu est réservé à la charge rapide (de l'ordre de 30 min), à des niveaux de puissance et de tension élevés (50 kW sous 500 V) [9].

### **I.7. Les avantages et les inconvénients VE**

#### **a. Les avantages**

L'usage des véhicules électriques présente d'énormes avantages ; que ce soit sur le plan économique, environnemental ou de fiabilité.

D'abord, c'est un véhicule très simple à conduire, il n'y a point de levier de vitesses à actionner manuellement. C'est aussi un véhicule silencieux (plus qu'un véhicule thermique) avec une absence d'émission d'hydrocarbures, de fumées ou de particules. Avec ce type de véhicule on peut dire que le véhicule électrique non polluant par rapport de véhicule thermique, vous êtes épargné de la carburation et des entretiens quotidiens telle la vidange, etc. Par ailleurs, le démarrage se fait, même en hiver, au quart de tour et le moteur ne cale jamais (pas d'embrayage).

#### **b. les inconvénients**

Néanmoins, Les véhicules électriques ont aussi des insuffisances. La première, c'est le temps qu'il faut pour la recharge. Sur une prise domestique, il vous faut minimum 8 h d'horloge pour complètement recharger votre batterie. En ce qui concerne l'autonomie, elle est de 150 km s'il s'agit d'une batterie lithium, sauf quelques exceptions. De même, les voitures électriques coûtent très cher à l'achat qu'un véhicule conventionnel. Par ailleurs, l'état silencieux du moteur n'est forcément pas avantageux pour les usagers de route (surtout les malvoyants, qui ne pourront pas voir le véhicule venir). Mais des travaux sont déjà en cours pour trouver une solution à ce sujet. Des constructeurs comme Zoé et Renault ont d'ailleurs pris de l'avance en équipant leurs voitures électriques d'un bruit stimulé à vitesse modérée. Comme inconvénient, on peut aussi ajouter le problème de vitesse. En dehors de quelques modèles aux performances impressionnantes, la vitesse des voitures électriques est généralement plus faible que celle des voitures thermiques.

## **I.8. Performances des véhicules électriques**

Au vu des qualités intrinsèques des moteurs électriques (taille, couple maximal disponible au démarrage, etc.), les performances dynamiques des véhicules électriques sont meilleures que celles des voitures équivalentes thermiques, et ce dans un silence quasi-absolu.

Un véhicule électrique n'a rien à envier à un véhicule thermique de même gamme. En effet, on arrive grâce aux moteurs électriques à développer de forts couples dès le démarrage, permettant une accélération performante de la voiture. De même, on arrive à atteindre des vitesses raisonnables, tout à fait suffisantes au vu des limitations de vitesse, bien que la vitesse maximale soit inférieure à celle d'un véhicule thermique.

Le freinage est également performant. En effet, comme le véhicule thermique, l'électrique possède un frein mécanique. Mais celui-ci représente une très faible implication dans le freinage des véhicules électriques actuels ! Ils possèdent principalement un frein magnétique à récupération d'énergie, de façon à récupérer de l'électricité, grâce à la nouvelle technologie des super-capacités. Ce frein, à lui seul, est plus performant que le frein mécanique, et il a le bon goût d'être réglable selon la souplesse que l'on désire.

### **I.8.1. La distance parcourue avant d'avoir à recharger le véhicule électrique**

Les nouvelles voitures entièrement électriques peuvent normalement parcourir au moins 200 kilomètres sur une seule charge. Certaines voitures électriques hybrides rechargeables peuvent parcourir de 40 à 80 kilomètres sur la charge électrique et de 500 à 900 kilomètres de plus avec l'essence. La distance qu'un VE peut parcourir dépend :

- De la technologie du véhicule (électrique à batterie ou hybride rechargeable);
- De la capacité de la batterie ;
- Du poids transporté ;
- De la température ;
- Des accessoires utilisés ;
- Du style de conduite du conducteur.

Les batteries des VE ne tombent pas à plat sans prévenir. Comme sur les véhicules à essence, le tableau de bord indique le niveau de la charge, de sorte que vous puissiez planifier vos déplacements en conséquence

### **I.8.2. La vitesse maximale d'un véhicule électrique**

Un véhicule fonctionne grâce à un moteur électrique qui peut être muni d'une batterie à accumulation, d'une pile à combustible ou d'un moteur thermique. Et le moins que l'on puisse dire c'est qu'un moteur électrique, c'est-à-dire les véhicules produits à plusieurs milliers d'exemplaires, ils ne cessent d'augmenter leur puissance avec une vitesse de pointe enregistrée à 250 km/h, Les véhicule électrique plus petit atteignent une vitesse et présentent un taux d'accélération moins élevés [11].

### **I.8.3. Les normes de sécurité dans les véhicules électriques**

Réalisé un point d'étape sur l'état de la normalisation des véhicule électriques et hybrides, en particulier pour ce qui concerne les risques. C'est l'occasion pour EXPERT-VE d'analyser les conséquences de ces normes pour ce qui concerne les interventions sur véhicules.

Actuellement, le processus d'homologation des véhicules électriques et hybrides est identique à celui des véhicules classiques : issues de la directive 2007/46/CE.

Néanmoins, certains aspects spécifiques sont en cours d'évolution, notamment au niveau des règlements européens. La réglementation 100 traite en particulier de la sécurité. Pour tous les types de véhicules, cette réglementation s'appliquera au 1er janvier 2013.

### **I.8.4. La durée de vie d'une batterie et le coût de remplacement**

La durée de vie d'une batterie de voiture est en moyenne de 4 à 5 ans. Cela ne signifie pas pour autant que vous devez changer systématiquement votre batterie de véhicule tous les 4 ou 5 ans. Il convient d'attendre de voir les premiers signes de fatigue de la batterie avant d'envisager son remplacement. Si au bout de 4 ou 5 ans, vous ne constatez toujours pas de manque d'énergie au moment du démarrage, il n'est pas nécessaire de changer de batterie. Sachez également que la durée de vie de la batterie dépend essentiellement de son état à l'achat. Si elle est utilisée rapidement à sa sortie des usines, sa performance sera maximale. Au contraire, si elle a été longtemps stockée dans un magasin, ses performances déclineront. C'est aussi pour cette raison que la batterie d'origine de votre véhicule dure souvent plus longtemps que votre batterie de rechange. La première est en effet placée directement après fabrication. Tandis que vous achetez la seconde sans trop savoir depuis quand elle a été produite



### **I.8.5. La performance d'un véhicule électrique en hiver**

Tous les véhicules, essence ou électriques, perdent en performance quand il fait froid. Mais paradoxalement, la voiture électrique souffre davantage en raison de sa « trop bonne » efficacité : alors qu'une voiture thermique génère beaucoup de chaleur inutile, les modèles électriques convertissent la totalité de l'énergie produite pour la propulsion. Mais c'est justement son point faible par temps froid

### **I.9. Les solutions pour améliorer les véhicules électriques**

Ce n'est pas un secret pour la majorité des propriétaires de voitures électriques, mais ces dernières ont tendance à perdre en autonomie avec le temps. Si la croyance populaire s'entend sur une moyenne de 2%, en réalité, ce chiffre peut considérablement varier en fonction de plusieurs facteurs qu'on ne peut pas contrôler. Ainsi, à moins que vous ne vouliez déménager en Floride où à un endroit où il fait toujours une température stable, le froid, malheureusement, figure parmi les facteurs qui peuvent causer une usure prématurée de votre batterie et réduire sa durée de vie plus rapidement que la normale. Sans parler des températures trop chaudes qui sont encore pires.

En revanche, c'est loin d'être le seul facteur et la bonne nouvelle, c'est que vous pouvez adopter plusieurs comportements qui vous aideront à améliorer la durée de vie de la batterie de votre voiture électrique. Geotab a réalisé une étude sur plus de 6 300 véhicules électriques, ce qui lui a permis d'isoler les facteurs qui influent le plus sur la durée de vie de la batterie d'un véhicule électrique. Selon l'entreprise américaine, le temps, la température, les recharges trop rapides ou trop lentes et l'utilisation qu'on en fait de manière peuvent avoir un impact sur la durée de vie de la batterie. Bref, maintenant qu'on sait tout ça, la question qu'on peut se poser c'est à savoir comment on peut avoir un impact positif sur les facteurs qu'on peut contrôler.

Malheureusement, il nous est impossible de contrôler notre climat, mais il est essentiel de savoir que les températures extrêmes, et ce, autant dans un sens que dans l'autre ont un impact sur la durée de vie de la batterie d'un véhicule électrique. Néanmoins, tant que la température se trouve sous la barre des 27 degrés Celsius et au-dessus des -5 degrés Celsius, l'impact reste minimal. Comme le mentionne Geotab, lors des chaudes journées d'été, un stationnement à l'ombre ou un stationnement sous-terrain est préférable.

Pour ce qui est de la distance, l'étude de Geotab à démontrer que le kilométrage parcouru n'a pas un impact significatif contrairement à ce que veut la croyance populaire. Ainsi, ne vous empêchez pas de rouler par peur d'affecter la durée de vie de votre batterie.

## **I.10. Conclusion**

Ce chapitre montre que nous avons présenté un état de l'art sur les véhicules électriques, un bref historique et les éléments qui compose ce genre de véhicule a était présenté au premier lieu, les avantages et les inconvénients ont été aussi discutée.

Les véhicules électriques, vont certainement être le nouveau moyen de transport qui va prendre une place de plus en plus importante au marché dans un avenir proche, et vont donc remplacer dans les prochaines années les voitures thermiques qui sont beaucoup trop polluantes, et surtout non éternelles.

La production d'énergie nécessaire au fonctionnement et à la fabrication des véhicules électriques, prennent part au réchauffement climatique, ce qui nous permet de dire que finalement la voiture électrique n'est pas aussi écologique, sauf si cette dernière est produite à partir des énergies renouvelables.

Plusieurs architectures de véhicules électriques sont actuellement possibles et présentent des performances et des fonctionnalités variées.

Les points qui bloquent l'arrivée complète du véhicule électrique sont aujourd'hui connus, les constructeurs proposent des solutions très performantes en termes de technologie et de puissance malgré cela, certains points demandent encore à être améliorées pour permettre la réelle immersion du véhicule électrique au sein des populations, notamment en ce qui concerne l'autonomie, le prix et les infrastructures indispensables à son expansion, ainsi des réaménagements qui ne semblent pas être envisageables à court terme.

Le chapitre deux sera l'objectif d'une présentation de structure de charge pour les véhicules électriques afin de connaître le fonctionnement de chaque élément impliqué dans la constitution du véhicule électrique.

## **CHAPITRE II: structure de charge**

### **II.1. Introduction :**

Le large déploiement des véhicules électriques est lié essentiellement à l'intégration d'un système de stockage performant. Les principales limites actuelles des batteries s'articulent autour de son coût de possession, de sa durée de recharge, de sa sûreté de fonctionnement et de son comportement à température froide [1].

La batterie est un élément-clé des véhicules tout électriques elle en conditionne l'autonomie. A priori, celle-ci est considérable : on peut en effet juxtaposer, en série ou en parallèle, un grand nombre d'éléments et obtenir un rayon d'action de plusieurs centaines de kilomètres.

La berline modèle S du constructeur californien Tesla, attendue pour 2012, devrait pouvoir parcourir, si on en croit les annonces, 256, 368 ou 480 km, en fonction du pack de batteries choisi. [2].

Les premières générations de VE présentaient une autonomie allant de 120 à 150 km. Aujourd'hui les VE moyenne gamme annoncent 300 km d'autonomie. Quelle que soit la génération de VE, une infrastructure de recharge bien répartie s'avère indispensable pour pallier à leurs limitations d'usage et pour rassurer les utilisateurs. Les chargeurs AC/DC adaptés à la recharge monophasée à partir de prises de courants AC et/ou à la recharge triphasée sur bornes dédiées permettent l'amélioration de la disponibilité de la recharge pour les utilisateurs tout en réduisant les coûts d'investissement dans les infrastructures. Ainsi, certains constructeurs automobiles, comme Renault et BMW, ont développé leurs propres chargeurs AC/DC embarqués. [3].

### **II.2. Les sources d'énergies**

Problème majeur dans les véhicules électriques ou même dans multiples domaines, le stockage de l'énergie électrique est une technologie assez limitée et compliquée à la fois. Dans un véhicule électrique, cela se répercute sur l'autonomie qui sera réduite, ainsi les outils de stockage utilisés jusque-là sont en général soit, des batteries, piles à combustibles ou des super-condensateurs. [4].

### II.2.1. La batterie

La batterie est le point de stockage de l'électricité. Elle est connectée au moteur électrique par l'intermédiaire d'un régulateur et d'un convertisseur. La batterie est chargée, à partir d'une source extérieure pendant les périodes de repos, le major problème de cette dernière c'est la durée de vie qui n'est pas très grande, et le temps important qu'elle prenne pour se charger. Elles peuvent être en plomb, en Ni-Cd, en Ni-Mh ou en lithium (Figure III.1) :



Figure II 1: Différentes types de batteries

#### II.2.1. 1) Différentes types de batteries

**-Batterie au plomb :** Inventée en 1859, la batterie au plomb trouve encore sa place dans de nombreux véhicules, thermiques comme électriques. En 1899, le véhicule électrique « La Jamais contente » équipée de cette technologie fut d'ailleurs la première automobile à dépasser les 100 km/h bien avant les véhicules thermiques.

De nos jours, les batteries au plomb ne sont plus utilisées pour la traction : elles alimentent le circuit électrique des accessoires ou des équipements spécifiques au monde thermique comme le démarreur. La batterie au plomb n'offre qu'une capacité limitée malgré un encombrement et un poids élevé, mais elle a le mérite d'être à la fois économique et simple à produire ou à recycler. Utilisée comme dispositif de stockage principal pour des voitures électriques jusque dans les années 80, elle a rapidement cédé la place à d'autres technologies plus performantes. [5].

**-Batteries Nickel-Cadmium** Fiables si bien utilisés et entretenus, acceptant la recharge rapide, ils disposent d'une longue durée de vie qui se calcule en dizaines d'années. C'est simple : ils ne s'usent qu'à l'usage, contrairement aux batteries lithium. Déchargées, ils peuvent être stockés de très longues années sans aucun dommage. , pour une autonomie de l'ordre de 70-90 kilomètres en moyenne [6] .

Leur découverte date de 1899 avec l'ingénieur suédois Waldemar Jungner. C'est que leur mise au point a pris plus de 50 ans ! Tous les 4.000 km environ, il fallait ajouter de l'eau déminéralisée dans les éléments après avoir effectué une charge d'entretien incontournable, destinée à faire s'élever le niveau d'électrolyte dans les cellules. Sans cette opération, leur mort était quasiment inéluctable [6].

**- Les batteries au nickel-hydrure métallique (Ni-MH) :** Les caractéristiques des batteries Ni-MH ont permis une première commercialisation de véhicules électriques avec des capacités d'énergie d'environ 27 kWh et des puissances de 50-100 kW dès 1998 (RAV4 de Toyota et EV1 de GM). Ces VE pouvaient effectuer, entre chaque charge, de 130 à 200 km selon le modèle, avec des vitesses maximales d'environ 130 km/h. Les premières générations de véhicules hybrides commercialisés étaient équipées de batteries Ni-MH à faible capacité d'énergie (de l'ordre de 2 kWh), mais avec une capacité de puissance compris entre 30 et 50 kW permettant aux moteurs électriques d'accélérer jusqu'à environ 55km/h.

Les batteries Ni-MH ont été inventées dans les années 70 et commercialisées à partir de 1989. Chaque cellule est composée de deux électrodes plongées dans un électrolyte d'hydroxyde de potassium concentré. L'électrode positive, identique à celle des batteries Ni-Cd, est composée du couple  $\text{NiOOH}/\text{Ni}(\text{OH})_2$ . L'électrode négative est un alliage hydrurable, absorbant l'hydrogène lors de la charge. Les batteries Ni-MH ont une densité d'énergie théorique (240 Wh/kg) et une tension nominale (1.35V) [7].

**Les batteries au lithium :** Les batteries au lithium ont toujours été considérées avec beaucoup d'intérêt, non seulement parce que le lithium est le plus léger des métaux mais aussi parce qu'il dispose d'un fort potentiel électrochimique, qui le conduit à se transformer très facilement en ion  $\text{Li}^+$ . Les premières réflexions sur l'utilisation du lithium pour le stockage de l'énergie remontent aux années 1910.

Élaborée au début des années 90, la batterie lithium-ion s'est progressivement imposée comme la technologie de référence, dans le monde du transport comme dans celui de l'électronique grand public. Dotée d'une importante durée de vie, elle offre une densité d'énergie bien supérieure à celle de toutes les technologies concurrentes et ne présente pas d'effet mémoire.

Elle exige en revanche un conditionnement adapté ainsi qu'un pilotage précis de la recharge, généralement assuré par un circuit électronique dédié. Renault utilise la technologie lithium-ion pour ZOE et les autres véhicules électriques de sa gamme. Le Groupe travaille par ailleurs à l'intégration de ses batteries dans un schéma d'économie circulaire visant à prolonger au maximum leur durée de vie [5].

En effet, il serait possible que le véhicule puisse parcourir plus de 200 km avec cette batterie de nouvelle génération. En outre, la batterie au lithium favoriserait un abaissement des coûts de consommation et gagnerait facilement de la sorte la faveur des acheteurs [8].

### II.2.1. 2) Comparaison des différentes technologies des batteries

**Tableau II 1:** Tableau comparatif des technologies des batteries.

Batterie	Plomb acide	Ni-Cd	Ni-Mh	Li-Ion
Densité énergétique (Wh/kg)	30-50	45-80	60-120	160-200
Nombre de cycles (charge/décharge)	500 à 800	1000 à 2000	600 à 1500	400 à 1200
Temps de charge	6 à 12h	1 à 2h	2 à 4h	2 à 4h
Température de fonctionnement	-20 à 6C	-40 à 60C	-20 à 60C	-20 à 60C

Actuellement, les batteries en Plomb et celle en Nickel –Cadmium sont les plus performantes : durée de vie, énergie massique et entièrement recyclable. Récemment, cette technologie a connu de nombreux progrès avec de nouvelles conceptions et des modèles plus développés tels : les batteries Nickel-Métal-Hydrure (NiMH) ou Lithium-ion (Li-ion) qui fournissent une énergie relativement élevée donc une autonomie plus grande pour le véhicule. Néanmoins le prix reste encore un obstacle. Le tableau (Table II.2) présente quelques différentes technologies de batteries.

**Tableau II 2:** Quelques modèles de batteries et leurs caractéristiques

	Plomb- Acide	Nickel- Cadmium	Nickel - Métal Hydrure (NiMH)	Lithium soufre du fer (LiFeS2)
Energie massique (Wh/Kg)	40	60	80	150
Puissance massique (W/Kg)	90	200	200	250
Durée de vie (Nbre de cycle de chargement)	100	2000	1500	100
Energie volumique (Wh/L)	90	120	130	180

### II.2.1. 3) Les risques engendrés par la batterie

Le manque de sécurité engendre plusieurs risques non négligeables lors de l'utilisation de la batterie tel que :

- Un court-circuit pourrait se produire en cas de choc, ce qui présente un danger direct pour les passagers (incendie, explosion, électrocution, etc.).
- Une batterie en mauvais état serait susceptible de provoquer un incendie.
- Autre risque, celui de la surcharge de la batterie au lithium, qui pourrait ainsi entraîner son implosion. Une cellule de la batterie (l'unité de base) qui se dégrade provoquerait un effet domino avec les autres cellules qui prennent feu aussitôt.

- La combustion des cellules de la batterie pourrait provoquer l'émission de substances chimiques nocives pour l'homme, ce qui peut provoquer la mort [9].

#### II.2.1. 4) Surveillance de la batterie :

1) **État de charge (State Of Charge-SOC) :** Le SOC (State Of charge), couramment utilisé en génie électrique, est un paramètre estimé pendant que la batterie est traversée par un courant électrique. Le SOC est donné par le rapport entre la capacité actuelle disponible et la capacité totale effective disponible à l'instant qui précède l'utilisation (à ne pas confondre avec la capacité initiale de la batterie neuve) .

$$SOC = \frac{C_{actuelle}}{C_{totale}} = SOC(t_0) - \frac{1}{C} \int_{t_0}^{t_1} i(t) dt \quad (II\ 1)$$

Où, SOC (t0) est l'état de charge initial et i(t) représente le courant traversant la batterie. Tout comme la capacité, cet indicateur dépend des conditions de mesures, notamment, la température.

La surveillance du SOC revient aussi à déterminer la quantité de charge utilisée. Cette dernière se traduit par la profondeur de décharge de la batterie (Depth Of Discharge-DOD), correspondant à :

$$DOD = 1 - SOC \quad (II\ 2)$$

La connaissance de ces indicateurs permet d'identifier en temps réel le mode de fonctionnement de l'accumulateur. Dans le domaine automobile, on distingue deux modes de fonctionnement des batteries : le mode Charge Depleting (CD) qui désigne une utilisation entière de la capacité de la batterie et le mode Charge Sustaining (CS) qui signifie une exploitation partielle de la capacité totale de la batterie. Ces modes sont définis par la surveillance du SOC de la batterie. [10]

La Figure (II.2) montre que tout comme la taille, le mode de fonctionnement de la batterie dépend du type du véhicule.



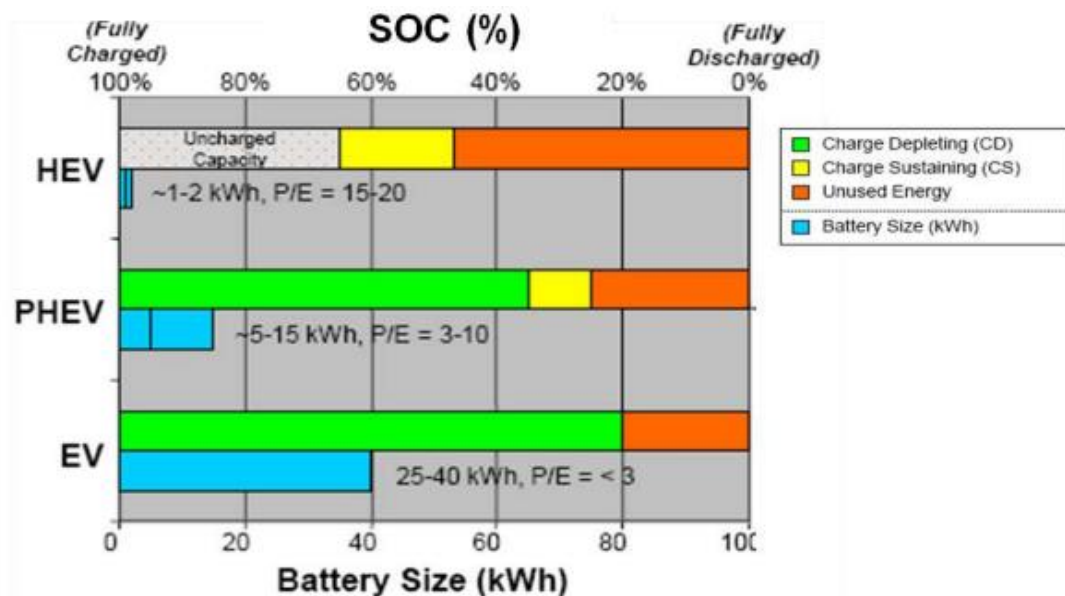


Figure II 2: plage de SOC des batteries utilisées dans le domaine automobile [10].

2) **État de santé (State Of Health-SOH)** : Le SOC ne prend pas en compte les pertes de capacité dues à la dégradation de la batterie, puisqu'il se réfère à la capacité actuelle. Pour quantifier le vieillissement d'une batterie on utilise la notion d'état de santé (SOH). Celui-ci est défini par le rapport entre la capacité totale actuelle et la capacité totale obtenue lorsque la batterie était neuve

$$SOH = \frac{C_{actuelle}^{tot}}{C_{neuve}^{tot}} \quad (II\ 3)$$

Le SOH peut être aussi déterminé par rapport à un état de charge donné, à condition que la capacité actuelle et la capacité à l'état neuf soient mesurées au même SOC et dans les mêmes conditions de températures. De notre point de vue, pour estimer l'état de santé de la batterie on doit se baser sur des mesures de capacité, mais aussi sur l'évolution de la résistance interne et des pertes [11].

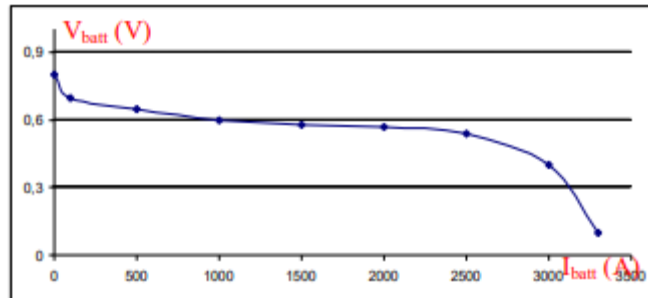
### II.2.1. 5) Modélisation de la batterie :

1) **Modèle statique (E0, R)** : Le modèle le plus simple de batterie est le modèle statique (E0, R) à paramètres constants, qui implémente l'équation suivant :

$$V_{batt} = E0 - R \cdot I_{batt} \quad (II\ 4)$$

Avec **R** la résistance interne de la batterie et **E0** la f.e.m. à vide (force électromotrice)

La variation de tension en fonction du courant (figure II.3) prélevé à la batterie  $I_{batt}$  est ainsi modélisée. La valeur du paramètre  $R$  est une donnée connue du constructeur. Elle peut également être déduite de courbes de tension issues d'essais (de même que le paramètre  $E_0$ ). Le paramètre  $E_0$  étant constant, l'état de charge de la batterie ne varie pas. Ce modèle à quantité d'énergie infinie ne convient donc pas à une étude d'autonomie [13].



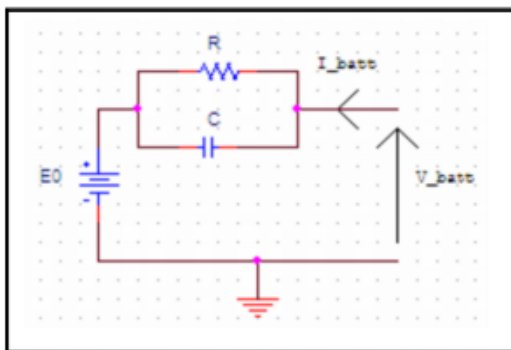
**Figure II 3:**  $V_{batt} = f(I_{batt})$  pour le modèle statique.

**Modèle dynamique ( $E_0, R, C$ ) :** L'ajout d'un élément capacitif introduit une dynamique dans le modèle (Figure II 4).

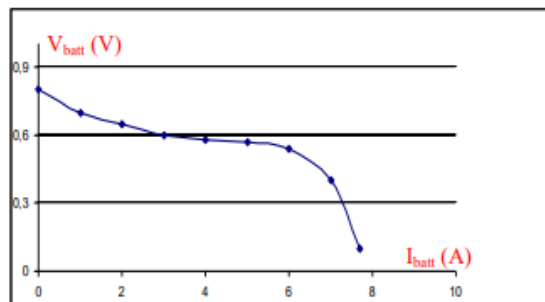
L'équation désormais implémentée est la suivante :

$$V_{batt} = E_0 - \frac{R}{1+R.C.P} \cdot I_{batt} \quad (\text{II } 5)$$

Les valeurs des paramètres  $E_0$ ,  $R$  et  $C$  sont calculées à partir de données d'essais (ou de courbes constructeur). La variation de tension en fonction du courant (figure II.5) prélevé à la batterie  $I_{batt}$  est ainsi modélisée [13]



**Figure II 4:** modèle dynamique



**Figure II 5:** Modèle dynamique

$$V_{batt} = f(I_{batt})$$

### **II.2.2. Le supercondensateur :**

Il permet de fournir la puissance nécessaire pour les accélérations lorsque les batteries sont trop lentes. Son fonctionnement est comparable à de l'adrénaline : il emmagasine de l'énergie et ressort d'un coup, les accélérations seront donc plus puissantes et plus rapides. Nous pourrions le qualifier d'accessoire.

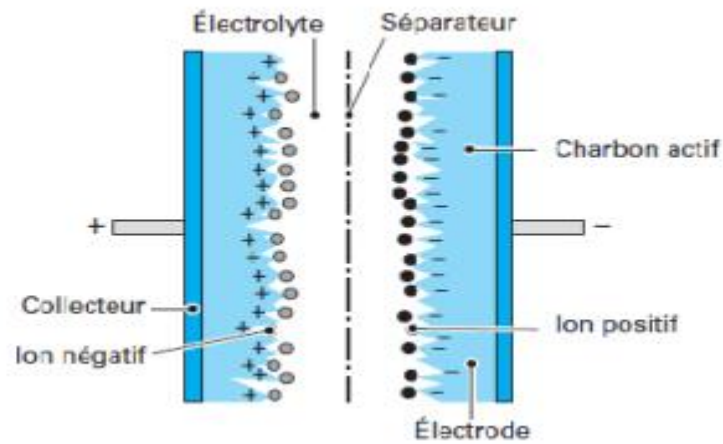
Effectivement, si le véhicule est conçu pour rouler en ville, le super condensateur ne servira à rien car il est inutile dans un lieu où la vitesse est limitée à 50 km/h [12].



**Figure II 6:** Exemple de super condensateur.

#### **II.2.2.1) Structure d'un supercondensateur**

Les supercondensateurs sont constitués de deux électrodes en carbone activé isolées électriquement par un séparateur poreux et de collecteurs de courant permettant d'acheminer le courant jusqu'aux bornes extérieures. Le tout est imprégné d'électrolyte permettant le transport des ions entre les deux électrodes. L'un des atouts du supercondensateur est son faible résistance interne. Les résistances de contact entre les grains de carbone, au sein même l'électrode, ainsi que les résistances de contact entre un collecteur de courant et une électrode peuvent cependant entraîner des valeurs de résistance non négligeables



**Figure II 7:** Structure d'un supercondensateur

Ce stockage de l'énergie (capacité du supercondensateur) se mesure en Farads et s'exprime par la formule  $C = q/V$ ,

L'analyse de cette formule implique que :

- Plus la quantité (q) d'électricité stockée est importante, plus la capacité est importante.
- Plus la tension appliquée aux bornes est faible, plus la capacité est importante.

C'est pourquoi les supercondensateurs affichent en général une tension de 2,87 volts et leurs armatures sont constituées de matériaux innovants à très grande surface active, comme les charbons actifs (1 000 à 2 000 m<sup>2</sup>/g). Leurs capacités varient de 100 Farads à 1 700 Farads (toujours en développement).

De nouveaux matériaux issus de la nanotechnologie, notamment le graphène, dont la surface active est de 2600 m<sup>2</sup>/g, permettront encore des performances supérieures.[14].

### II.2.2.2) Le principe de fonctionnement d'un supercondensateur

Le principe de fonctionnement d'un supercondensateur est basé sur le stockage de l'énergie par distribution des ions provenant de l'électrolyte au voisinage de la surface des deux électrodes. En effet, lorsque l'on applique une tension aux bornes d'un supercondensateur, on crée une zone de charge d'espace aux deux interfaces électrode-électrolyte. C'est ce que l'on appelle la double couche électrique. Le stockage de l'énergie est donc électrostatique et non pas faradique comme dans le cas des batteries, puisqu'il n'y a pas de réaction électrochimique.

Un supercondensateur a une structure anode-cathode à base de charbon actif, permettant de disposer d'une surface active considérablement élevée par rapport aux condensateurs traditionnels, et donc d'obtenir des valeurs très élevées de capacités (1 à 5000 F). Ceci fait des supercondensateurs des éléments potentiels de stockage d'appoint, idéalement complémentaires aux batteries ou à la pile à combustible.

L'utilisation de structures série parallèle de plusieurs cellules de supercondensateurs permet d'atteindre une tension et un courant de sortie élevés [15].

### **II.2.2.3) Les différentes technologies du supercondensateur :**

**a) Les supercondensateurs à base de charbons actifs:** Ils sont constitués de deux armatures sur lesquelles une fine couche de charbon en poudre est déposée. Cette couche de carbone est ensuite activée afin de rendre la surface extrêmement poreuse. Le charbon actif possède une surface spécifique très élevée qui davantage augmenté avec les structures à base de nanotubes. En effet, leur caractère méso poreux leur confère des propriétés de stockage électrochimique intéressantes en valorisant le transport des ions de l'électrolyte vers l'interface chargée. Ainsi bien qu'ils possèdent des surfaces spécifiques modérées (200 – 400 m<sup>2</sup>/g), les valeurs des capacités peuvent atteindre jusqu'à 1108,79 F/g et la densité de puissance 799,84 kW/kg en fonction de la microstructure (porosité, surface spécifique) et de la fonctionnalité de la surface [16].

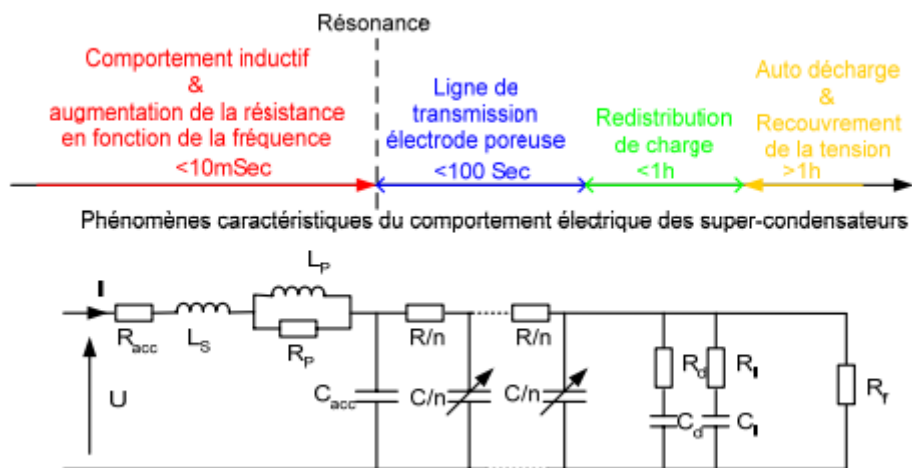
**b) Les supercondensateurs à base d'oxydes métalliques :** stockent de l'énergie par une réaction chimique à la surface des électrodes. Ceci entraîne un transfert de charge et on parle alors de pseudo-capacité. L'oxyde métallique le plus utilisé est le dioxyde de ruthénium (RuO<sub>2</sub>). Ce système fonctionne en milieu acide (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) et présente une faible résistance interne. Cependant, le coût très élevé des oxydes métalliques les cantonne à des applications militaires ou spatiales. [16].

**c) Les supercondensateurs à base de polymères:** conducteurs stockent de l'énergie par des processus de dopage des polymères. Ceux-ci possèdent des capacités entre 200 et 300 F/g. Cependant, le dopage impliquant un transfert de charge, il s'agit encore une fois de pseudo-capacité. Ces systèmes de supercondensateurs sont les plus récents et ne sont pas encore au niveau du développement industriel car de nombreux problèmes subsistent, parmi lesquels le coût de synthèse, la mise en œuvre, la cyclabilité

Les supercondensateurs les plus utilisés sont ceux qui utilisent la technologie au charbon actif. Ils sont particulièrement destinés à fournir des pics de puissance pendant un temps très court, à compenser les déséquilibres entre la puissance disponible et la puissance instantanée nécessaire. Ils peuvent permettre de réduire la taille, d'améliorer les performances dynamiques et la fiabilité des systèmes de stockage. [16].

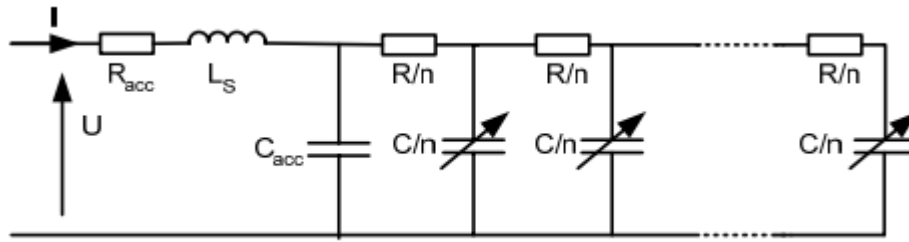
#### II.2.2.4) Modèle électrique

L'analyse de différents profils de missions et les besoins de puissances transitoires dans les applications VE a montré que l'utilisation des supercondensateurs sera caractérisée par des forts régimes de charges/décharges discontinus et répétitifs. Les durées des impulsions de puissances varient de quelques millisecondes à quelques dizaines de secondes. En ce qui concerne le domaine de variation de la tension aux bornes de ces éléments, nous estimons qu'elle sera dans l'intervalle  $[U_n/2; U_n]$ .



**Figure II 8:** Modèle général proposé pour les supercondensateurs

Le circuit électrique donné dans la figure (II 8) peut être considéré comme un modèle complet de supercondensateur. Selon les spécifications de l'application nous pouvons négliger un phénomène au détriment d'un autre et donc choisir un modèle de supercondensateur qui sera le moins complexe et le plus adapté au besoin. C'est la fenêtre temporelle d'observation du courant et de tension, dont on aura besoin, pour l'application qui va pour aider le choix du modèle. [17].



**Figure II 9:** Modèle électrique proposé de supercondensateurs utilisés dans des applications VE

-Compte tenu des spécifications des profils demandés dans les applications VE, nous allons essayer d'approcher la réponse fréquentielle du supercondensateur dans la gamme de fréquences [10mHz ; 1kHz]. Dans ces conditions, nous pouvons négliger le phénomène de redistribution de charge ainsi que celui de l'autodécharge. Nous négligeons aussi le comportement aux hautes fréquences (>1kHz) et particulièrement l'augmentation de la partie réelle en fonction de la fréquence. Le modèle de supercondensateur retenu est donc celui donné par le schéma électrique de figure (I.9). Il est composé d'une résistance d'accès  $R_{acc}$ , une inductance  $L_S$ , une capacité d'accès  $C_{acc}$  indépendante de la tension et une de transmission RC dont la capacité est une fonction linéaire de la tension. En ce qui concerne l'ordre de la ligne de transmission, nous allons discuter son choix lorsque nous expliquerons la procédure d'identification des paramètres du modèle. [17].

### II.3) Les convertisseurs de puissance :

Dans un système de traction d'une voiture électrique, les sources d'alimentation embarquées sont soit une batterie d'accumulateur de capacité appropriée à l'autonomie souhaitée de véhicule, soit une pile à combustible (PAC), avec une source auxiliaire de type super-condensateur ou batterie.

La chaîne de traction assure la transmission mécanique du mouvement, ainsi que le moteur de traction qui peut-être un moteur à courant alternatif (MSAP, MAS, MRV..) ou un moteur à courant continu (MCC) [18] .

L'utilisation de plusieurs sources d'énergie de caractéristiques différentes, à bord du véhicule électrique (VE) nécessite l'adoption des convertisseurs statiques. Ces derniers peuvent avoir la fonction de conditionneur d'énergie conversion AC/DC ou onduleur conversion DC/AC, ou hacheur conversion DC/DC [19].

### II.3.1) - Les convertisseurs AC/DC (redresseur)

Ce type de convertisseur est nécessaire dans les véhicules électriques, Est utilisé pour transformer l'énergie électrique à courant alternatif fournie par le réseau de distribution générale en énergie électrique à courant continu qui peut être stocké dans une batterie d'accumulateur électrochimique et/ou dans un supercondensateur nous pouvons distinguer :

- **Des redresseurs à diodes** : ces convertisseurs établissent une relation rigide entre la tension continue de sortie et la tension alternative d'entrée.
- **Des redresseurs à thyristors** : qui permettent de faire varier de manière continue le rapport entre la tension continue récupérée à leurs bornes de sortie et la tension alternative appliquée à leurs bornes d'entrée en agissant sur l'angle d'amorçage des thyristors.
- **Des redresseurs mixtes** : associant des diodes et des thyristors.
- **Des groupements de redresseurs à thyristors** : destinés à améliorer les performances et à diminuer les perturbations.
- **Des redresseurs MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion)** : qui associent des IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) et des diodes [22]

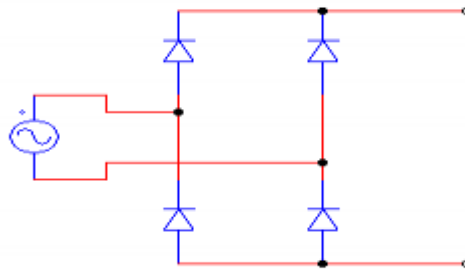


Figure II 10: Schéma détaillé d'un redresseur.

### II.3.2) Correction du facteur de puissance (PFC)

Le PFC (Correction du Facteur de Puissance) sert principalement à éliminer les déformations du réseau électrique sur le courant absorbé pour éviter l'apparition de courants harmoniques néfastes au réseau. Il aura aussi pour rôle de mettre le courant et la tension bien en phase. Autrement dit, un PFC fera en sorte que le réseau voit l'alimentation comme une résistance pure et non pas comme une charge non linéaire [9].



### II.3.3) Les convertisseurs DC/DC (Hacheur)

Le hacheur est un convertisseur qui permet la conversion de signal continu en un signal continu différent. Ce type de convertisseurs sont nécessaires dans une voiture électrique, ils ont deux usages essentiels :

- Ils sont indispensables dans l'alimentation des moteurs de propulsion quand ceux-ci sont des moteurs à courant continu.
- Ils sont nécessaires pour adapter la tension de la batterie principale à celle des auxiliaires électroniques utilisés (capteur, régulateur)

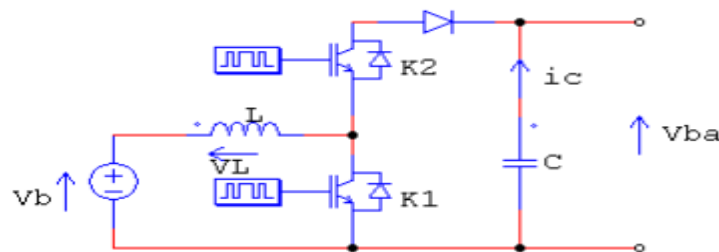


Figure II 11: Schéma détaillé d'un Hacheur élévateur bidirectionnel

L'utilisation d'un hacheur dans les véhicules électriques permet de maintenir le courant moteur à la valeur souhaitée tout en assurant le réglage progressif et sans perte notable de la tension du moteur. Il permet également de régler le couple et la vitesse du moteur et donc du véhicule en traction mais aussi en freinage électrique [23].

### II.3.4) Les convertisseurs DC/AC (Onduleur)

L'utilisation des convertisseurs (DC / AC) est très répandue dans le monde de la conversion d'énergie électrique. Utilisé dans plusieurs domaines industriels dont, l'industrie de l'automobile écologique. C'est l'un des sous-systèmes les plus importants dans la configuration d'un véhicule électrique, objet de notre étude. Il assure la liaison entre le bus continu et la machine synchrone de traction et en fonctionnement tout électrique, il assure la liaison entre la batterie et ce même moteur de traction. Son rôle n'est pas que liaison, car ce système permet en premier lieu la conversion de l'alternatif vers le continu et en deuxième lieu et c'est son rôle principal:

commande de la vitesse du moteur de traction et ce en l'une des multiples méthodes de contrôle pour ce genre de convertisseur [4].

### II.3.4.a) Onduleurs NPC (Neutral-Point-Clamped)

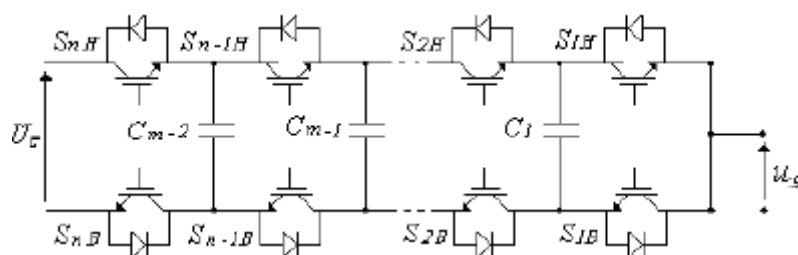
Cette structure d'onduleur multiniveaux a été introduite par A. Nabae et H. Akagi en 1981 . L'objectif était de réduire l'amplitude des harmoniques injectés par l'onduleur dans la charge pour des applications de type alimentation de moteur .

### II.3.4.b) Principes de base de la branche 3 niveaux

Dans sa version la plus simple, chaque branche de cet onduleur comporte 4 interrupteurs contrôlables et 6 diodes, comme représenté à la figure (II 16) Ce montage est alimenté par une tension continue  $U_e$  entre les bornes  $V_0$  et  $V_2$ . Les 3 états de commutation possibles permettent de délivrer 3 niveaux distincts et positifs entre les bornes  $V_S$  et  $V_0$ . Chaque branche comporte 2 étages constitués chacun de 2 interrupteurs de type transistor  $S_{jH}$  et  $S_{jB}$  avec des diodes antiparallèles. Deux diodes supplémentaires  $D_{1H}$  et  $D_{1B}$  permettent de relier les étages intermédiaires  $V_{H,1}$  et  $V_{B,1}$  au point milieu [25].

### II.3.4.c) Onduleurs à cellules imbriquées

Cette structure a été introduite en 1992 par T. Meynard et H. Foch. Elle est également connue sous l'appellation « flying capacitors multilevel inverter » dans la littérature anglo-saxonne.



**Figure II 12:** Schéma d'une branche d'onduleur multiniveaux à cellules imbriquées (capacité)

#### II.3.4.d) Principes de base (Onduleurs à cellules imbriquées)

La figure (II 17) illustre le schéma de principe en échelle d'une branche d'onduleur à  $m$  cellules imbriquées. Chaque paire d'interrupteurs situés sur la même verticale forme une cellule de commutation dont les interrupteurs sont commandés de manière complémentaire. Toutes les combinaisons de signaux de commande respectant cette complémentarité sont autorisées. Cet onduleur a donc  $2m$  états possibles pour la commande. Dans son fonctionnement habituel, lorsque les tensions aux bornes des condensateurs sont équilibrées, la tension aux bornes du condensateur  $C_k$  vaut :

$$U_{c.k} = \frac{k}{m} \cdot U_e \quad (\text{II } 6)$$

Cela implique que chaque interrupteur doit bloquer une fraction de la tension égale au pas de l'onduleur :

$$U_{\text{blocage}} = U_{c.k} - U_{c.k-1} = \frac{U_e}{m} = \Delta U \quad (\text{II } 7)$$

En prenant des composants identiques, le nombre de condensateurs supportant une tension nominale égale au pas, croît avec le carré du nombre de cellules

$$N_c = \frac{m^2 - m}{2} \quad (\text{II } 8)$$

Contrairement à l'onduleur *NPC*, cette structure assure naturellement la répartition statique de la tension bloquée aux bornes des interrupteurs. En revanche, si les condensateurs (haute tension) sont réalisés par mise en série de condensateurs identiques, ils auront besoin d'être équilibrés. [25].

#### II.3.4.e) Onduleurs multi niveaux symétriques

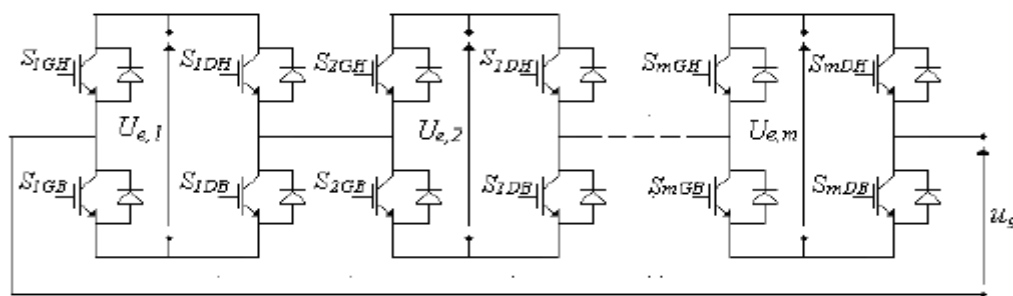
La dénomination complète de cette topologie, introduite par Marchesoni et en 1988. Devrait être onduleur multiniveaux symétriques à cellules en série.

Ces onduleurs sont également connus sous l'appellation « onduleurs multiniveaux cascades » ou « cascade multiniveaux invertir » dans la littérature anglosaxonne. Cette dénomination est imprécise, elle provient du fait que la structure n'a tout d'abord été employée qu'avec des

cellules symétriques, de sorte que la précision était superflue. Cependant pour être précis, il faudrait maintenant parler d'onduleur multiniveaux cascades symétriques, l'omission de l'adjectif symétrique sous-entendant qu'il peut s'agir aussi bien d'une configuration symétrique que d'une configuration asymétrique [25].

#### II.3.4.f) Principes de base (Onduleurs multiniveaux symétriques)

Le principe assez naturel consiste à connecter en série des ponts en H, comme illustré à la figure (II 18). En ne prenant en considération que les 3 niveaux distincts générés par chacune de ses cellules, un convertisseur composé de  $m$  ponts en H connectés en série dispose de  $3m$  états de commutation distincts. Dans la plupart des cas, les cellules sont équivalentes et il y a autant de manières de générer un niveau, qu'il y a de permutations possibles des cellules, et de combinaisons distinctes de niveaux d'onduleur conduisant à cette valeur. A titre d'exemple, un convertisseur composé de 4 cellules possède deux combinaisons de niveaux conduisant à 2 :



**Figure II 13:** Schéma d'une branche d'onduleur multiniveaux cascades, il faut  $m$  tensions d'entrée isolées les unes des autres.

#### II.3.4.g) Onduleurs multi niveaux asymétriques (Onduleurs hybrides)

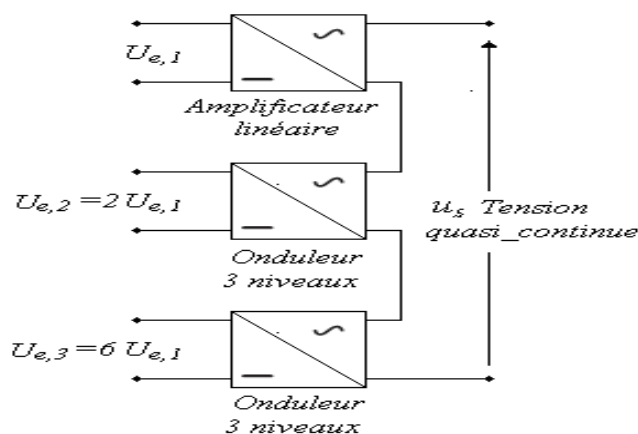
Ce type de structure est aussi appelé à juste titre « onduleur hybride ». Dans cette topologie dérivée de la précédente, le principe de mise en série de cellules de conversion est généralisé. Par degré d'hybridation croissant, on distingue trois types d'associations [25] :

- La mise en série de pont en H alimentés avec des tensions de différentes valeurs
- La mise en série d'onduleurs de topologies différentes (par exemple un onduleur NPC triphasé combiné avec des ponts en H monophasés),
- La mise en série de cellules de conversion de topologie et de nature différentes (par exemple pont en H et amplificateur linéaire)

Comme pour la mise en série de ponts en H, la seule contrainte porte sur les alimentations des cellules qui doivent être isolées les unes des autres. Le concept peut être attribué à O.M.Mueller et J.N. Park qui ont publié le principe dans un article paru en 1994. Cet article portant sur une application assez pointue résume bien ce que l'on peut attendre de ce type de structure. Le cahier des charges était d'obtenir un convertisseur avec une tension de service, une rapidité, un rendement et une résolution élevés dans une application de résonance magnétique. Le concepteur de cette solution assez astucieuse l'a dénommée amplificateur quasi-linéaire. Les convertisseurs associés sont :

- une cellule onduleur de tension élevée,
- une cellule onduleur de tension trois fois plus faible.
- une cellule amplificateur linéaire avec une tension six fois plus faible [26].

Cette structure est illustrée à la figure (II 19). Les deux premières cellules de ce convertisseur permettent de générer 9 niveaux distincts. La dernière cellule permet de corriger l'erreur et d'obtenir une tension quasi-continue, c'est à dire une réponse quasi-linéaire entre la tension la plus basse et la plus haute. Par rapport à une solution avec amplificateur seul, les pertes sont fortement réduites, puisque l'amplificateur linéaire ne fait que corriger l'erreur qui n'est de l'ordre que d'une fraction de la tension d'alimentation. Cette structure possède toutes les caractéristiques d'un onduleur multiniveaux asymétrique et en résumé bien l'essence : des convertisseurs spécialisés sont combinés de sorte que chacun remplit le rôle pour lequel il est le mieux adapté. Le concept est simple, sa mise en oeuvre est nettement plus complexe, notamment pour que chacun des convertisseurs travaille de manière optimale [25].



**Figure II 14:** Schéma de l'amplificateur quasi-linéaire proposé par Müller

## **II.4) Les chargeurs de batteries**

Le chargeur de batterie est aussi important que tout les autres composantes des véhicules électriques, ce dernier joue le rôle de la "station service". Pour cela plusieurs systèmes de recharge ont alors été conçus. Il s'agit d'une part des chargeurs de type externe (off-board) appelés chargeurs "inductifs". Et d'autre part des chargeurs de type embarqué (on-board) autrement dit chargeurs "conductifs".

**a) - Chargeur externe :** Installé à l'extérieur du véhicule, l'énergie électrique est fournie directement au véhicule a partir d'un mode de connexion choisi par l'utilisateur (prise domestique, prise domestique et câble équipés d'un dispositif de protection, prise spécifique sur un circuit dédié, Connexion courant continu). Les chargeurs externes réutilisent les éléments de la chaîne de propulsion du véhicule pour recharger les batteries. [9]

**b) - Chargeur embarqué :** Intégré au sein du véhicule, l'énergie électrique délivrée par le réseau est transmise au véhicule. Ils sont dotés d'un dispositif totalement indépendant de la chaîne de traction électrique, Cette configuration ne nécessite pas de convertisseur supplémentaire au sol.

### **II.4.1) les types de chargeur**

Il existe différentes structures d'électronique de puissance qui sont classées en deux catégories, la première catégorie concerne les chargeurs de fortes puissances, ils sont qualifiés de chargeurs rapides. Le second type est réservé aux recharges de moyenne puissance, on parle de chargeurs lents.

#### **a) Chargeur de type rapide**

Les chargeurs de type rapide sont les structures dont la puissance transitée est supérieure à 10KW, La puissance maximale atteint aujourd'hui est 150 kW. Ce type de chargeurs permet une recharge partielle (80 %) des batteries de stockage pendant une courte période (inférieur à 30 min.). Deux types de structures de charge ont été développés (Les bornes de recharge, Chargeurs à coupleur inductif manuel) [9].

#### **b) Chargeur de type lent**

Le chargeur de type "lent" est un dispositif d'une puissance moyenne, généralement de 3 kW. Ce dispositif permet la charge continue d'une batterie de stockage pour compenser ses fuites interne normales. Il nécessite pour une charge complète du pack de batteries une durée de 5 à 8 heures. Cette opération peut donc s'effectuer en heures creuses. Pour pallier le problème de la "panne

sèche" en cours de journée. Un système de charge à régime lent comprend un chargeur et une batterie branchés à la charge en permanence. Lorsqu'il y'a une alimentation secteur, le courant de charge est fourni par le chargeur. La batterie est chargée à régime lent et n'est utilisée que pour couvrir des surintensités de charge dépassant le régime du chargeur. Lorsque l'alimentation secteur s'arrête, la batterie fournit le courant à pleine charge. Deux types de chargeur "lent" sont actuellement développés (Chargeur classique, Chargeur à coupleur inductif automatique) [9].

**Tableau II 3:** Tableau comparatif des types de charge [9]

Type de charge	Durée de recharge	Alimentation	Tension	Courant maximum
<b>Lente</b>	6h a 8h	Monophasé 3KW	230V	16A
	2h a 3h	Triphasé 10KW	400V	16A
	3h a 4h	Monophasé 7KW	230V	32A
<b>Rapide</b>	1h a 2h	Triphasé 22KW	400V	32A
	20min a 30min	Triphasé 43KW	400V	63A
	20min a 30min	Continue 50K	400V a 500V	100A a 125A

## II.5) Chargeurs filaires

Les chargeurs filaires nécessitent obligatoirement une connexion par câble pour pouvoir alimenter la batterie. Ces derniers peuvent être externes ou embarqués, suivant l'application et surtout les niveaux de puissance mis en jeu. Les structures de chargeurs sont diverses et variées, mais elles peuvent se classer dans deux catégories, qui sont les unidirectionnelles et les bidirectionnelles.

### II.5.1) Chargeurs filaires unidirectionnels

Dans le cadre d'une structure unidirectionnelle, le transfert d'énergie s'effectue du réseau à la batterie, les véhicules électriques avec chargeurs unidirectionnels peuvent donc charger mais ne pas injecter d'énergie dans le réseau électrique. La figure (II 20) présente le schéma d'un chargeur unidirectionnel [9]

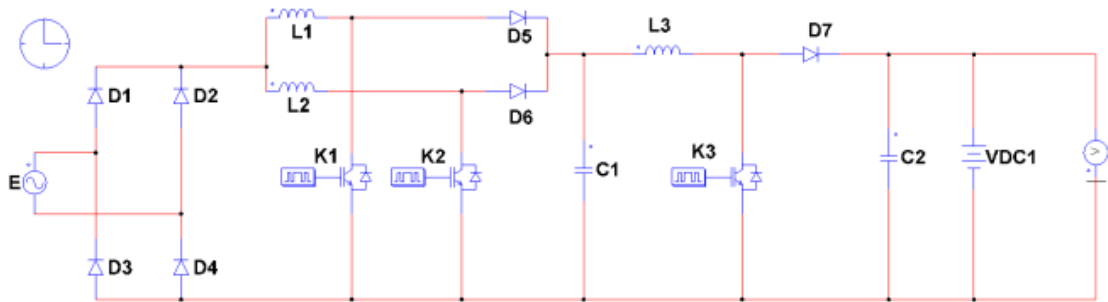


Figure II 15. : Chargeur unidirectionnel

### II.5.2) Chargeurs filaires bidirectionnels :

Les chargeurs bidirectionnels sont embarqués au sein du véhicule, pour la charge des batteries on utilise des éléments de la chaîne de tractions. Tout chargeur bidirectionnel peut être utilisé lors de phases de freinage récupératif. Le véhicule électrique peut charger et injecter l'énergie dans le réseau électrique. La figure (II 21) représente le schéma d'un chargeur intégré bidirectionnel. [9]



## II.6. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents types de batteries ainsi que les différents types de chargeurs.

La batterie constitue l'élément central de la transmission d'énergie, La durée de charge de cette dernière dépend de la puissance de l'alimentation électrique, en effet, plus la puissance de recharge est élevée plus la durée de recharge est courte.

Les chargeurs varient en fonction de la source d'alimentation électrique mais aussi du type de recharge désiré.

La mise en place de ces infrastructures nécessite de gros moyens financiers, ce qui limitera leur nombre et donc leur intérêt.

Les caractéristiques des chargeurs de type "rapide" permettent de compléter parfaitement la fonction du chargeur de type "lent" qui reste indispensable pour assurer une plus grande longévité aux batteries

Les chargeurs lents sont généralement embarqués au sein du véhicule, alors que les chargeurs rapides jouant un rôle de stations-services se trouvent à l'extérieur sous forme de bornes de recharge.

Les chargeurs filaires sont de plus en plus intégrés au véhicule pour plus de fonctionnalité, Contraignant ainsi leur conception

Le chapitre suivant sera consacré à la Simulation de l'ensemble des éléments électriques qui constitue le véhicule électrique et. L'étude d'un cas d'onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC avec les différentes techniques de modulation de Commande MLI Triangulo-sinusoïdale

## Chapitre III: Modélisation Et Simulation

### III.1. Introduction

L'objectif de cette partie est de présenter une modélisation ainsi qu'une simulation des différents composants d'un véhicule électrique en utilisant le logiciel PSIM.

Les composants essentiels considérés sont les convertisseurs qui sont connectés au sein du véhicule électrique.

En général, les convertisseurs de tension multi-niveau peuvent être vus comme des synthétiseurs de tension, dans lesquels la tension de sortie est synthétisée dans plusieurs niveaux de tension discrets.

Pour établir le modèle du véhicule, on simule chaque élément de façon séparée afin d'évaluer le modèle global choisi pour notre véhicule électrique.

### III.2. Simulation du redresseur

Le schéma détaillé d'un redresseur utilisé pour la simulation est présenté dans la figure (III.1) pour une résistance utilisée de  $R = 12 \Omega$ .

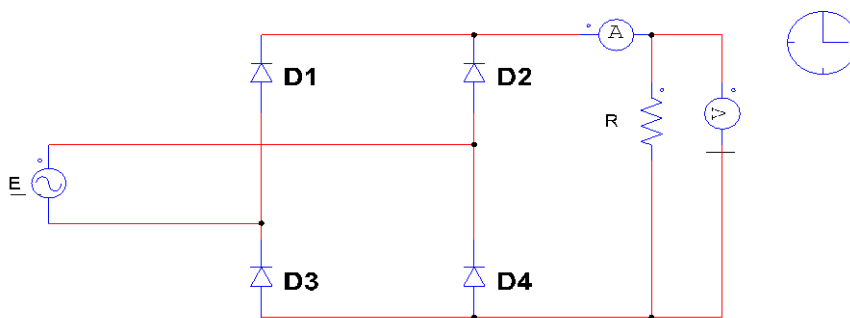


Figure III 1: Schéma détaillé d'un redresseur

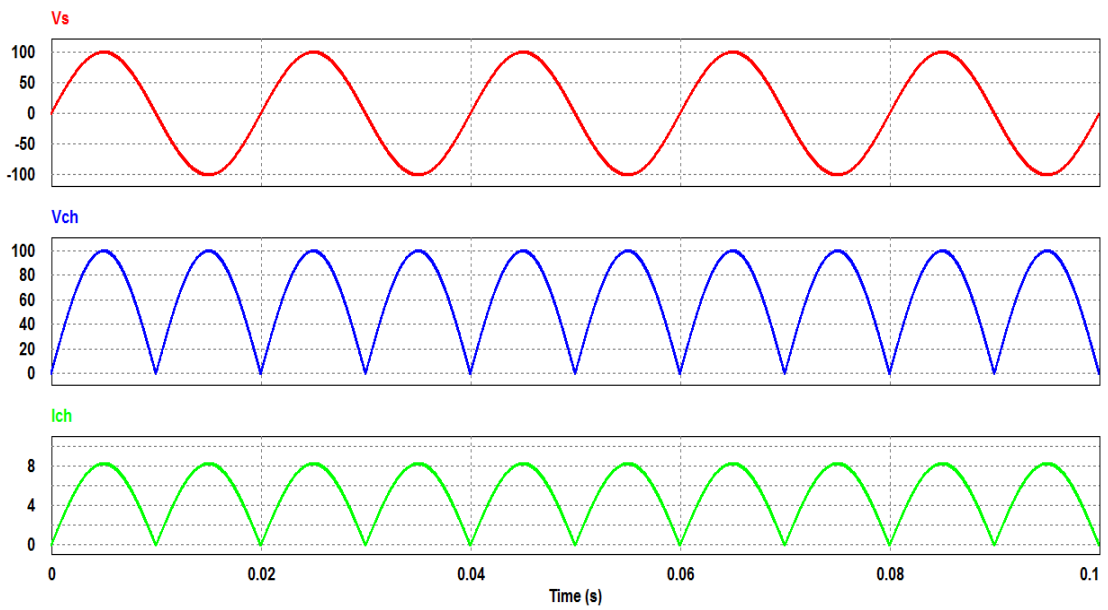
Résultats obtenus :

D1 et D4 passantes et D2 et D3 bloquées :

$$I = I_1 = I_4 > 0, U_{D1} = U_{D4} = 0$$

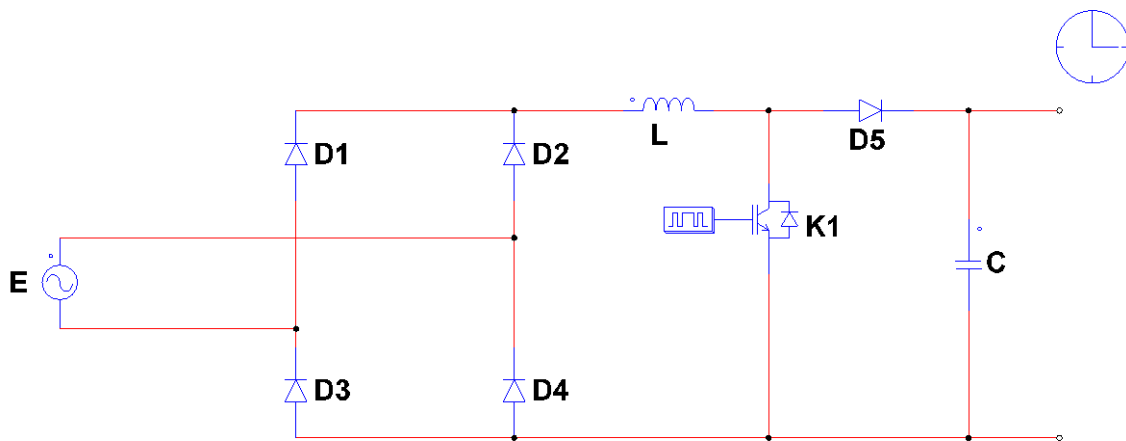
$E = RI > 0$  D1 et D4 bloquées et D2 et D3 passantes :

$$I = I_2 = I_3 > 0, U_{D2} = U_{D3} = 0, E = -RI < 0$$



**Figure III 2:** Signaux caractéristiques d'un redresseur

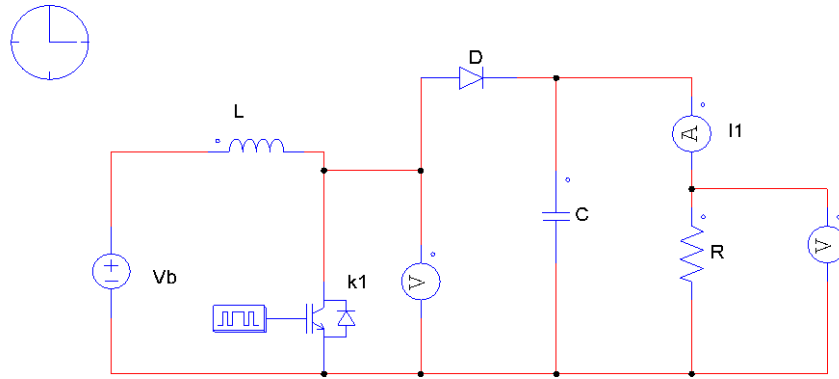
Dans les chargeurs utilisés pour les véhicules électriques on associe un PFC comme le montre la figure (III.3)



**Figure III 3:** Schéma du redresseur associé au PFC

Le but du PFC est de protéger le réseau, puisque le redresseur représente une source de pollution pour le réseau.

### III.3. Modélisation de l'hacheur :



**Figure III 4:** Schéma détaillé d'un hacheur

Dans notre étude, l'hacheur utilisé est composé d'un transistor IGBT, et d'une bobine branché comme le présente la figure (III.4).

Pour contrôler l'ondulation du courant dans l'inductance \$L\$, il faut étudier les deux états de l'interrupteur \$K\_1\$ :

a. \$K\_1\$ fermé

Lorsque \$K\_1\$ est fermé, la tension aux bornes de l'inductance et le courant traversant le condensateur sont égaux à :

$$V_L = v_b \quad (III.1)$$

$$I_C = \frac{V_{ab}}{R} \quad (III.2)$$

A noter que les ondulations dans le convertisseur sont négligées.

b. \$K\_1\$ ouvert :

Dans ce cas, la tension aux bornes de l'inductance et le courant traversant le condensateur sont égaux à :

$$V_L = V_b - V_{ab}$$

$$I_C = I_L - \frac{V_{ab}}{R}$$

A noter que les oscillations sont négligées dans ce cas aussi.

Donc :

$$V_L = V_b - V_{ab}$$

$$I_C = I_L - \frac{V_{ab}}{R}$$

Enfin, on peut déduire des équations précédentes la tension aux bornes de l'inductance au cours d'une période de commutation :

$$\int_0^T ic(t)dt = -\frac{V_{ba}}{R} * \alpha * T + (1 - \frac{V_{ba}}{R}) * \acute{\alpha} * T \quad (III.3)$$

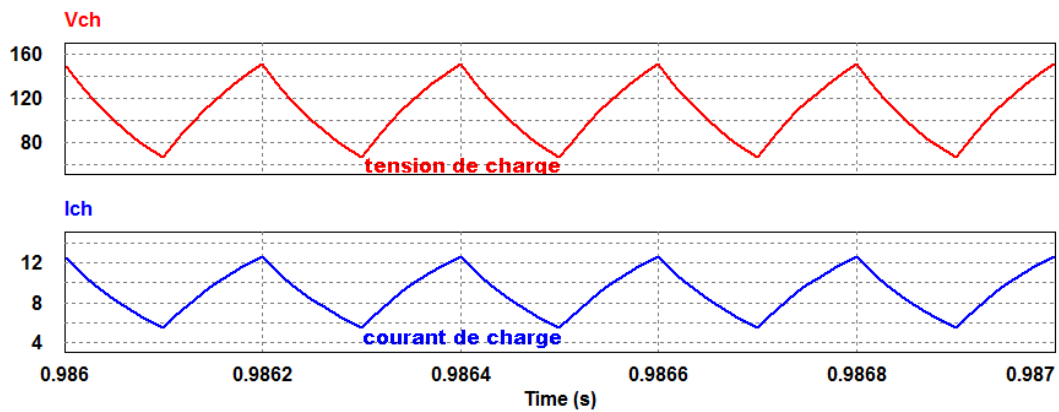
En regroupant les termes semblables et en égalant la dernière équation à zéro, l'équation obtenue est la suivante :

$$-\frac{V_{ab}}{R}(\alpha + \acute{\alpha}) + I * \acute{\alpha} = 0 \quad (III.4)$$

La résolution de l'équation précédente nous donne le courant traversant le convertisseur :

$$I = \frac{V_{ab}}{R * \acute{\alpha}} \quad (III.5)$$

Les résultats de la simulation de la figure (III.5) montre la tension et le courant de l'hacheur bidirectionnel utilisé

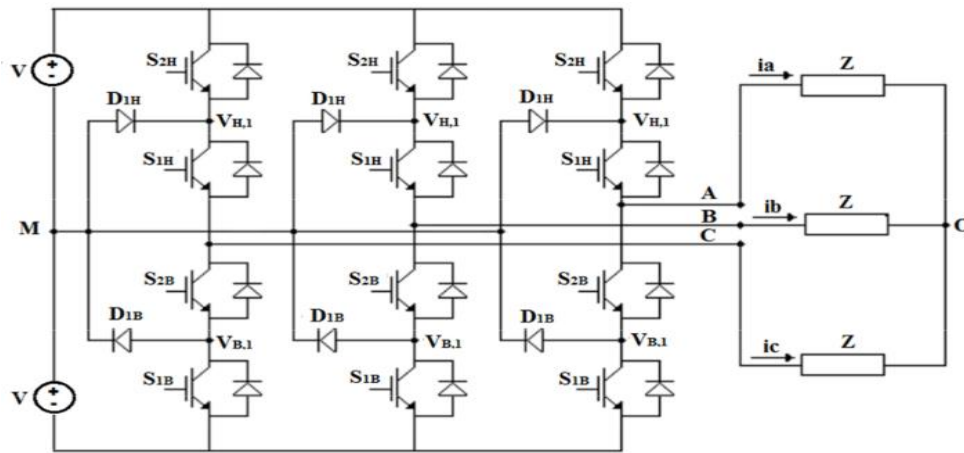


**Figure III 5:** Résultat de simulation de l'hacheur dans le régime permanent.

### III.4 Onduleur NPC à 3 niveaux de tension alimentant une charge RL

La structure de l'onduleur à trois niveaux de type NPC est donnée par la figure (III 6). Cette structure se compose de trois bras symétriques constitués chacun de quatre interrupteurs en série et deux autres en parallèles, plus deux diodes permettant l'obtention du zéro de la tension  $V$ . Chaque interrupteur est composé d'un interrupteur bi commandable et d'une diode montée en tête bêche.

On peut prendre la tension simple  $V_1$  entre la première borne (A) de la charge et le point neutre O, cette tension est entièrement définie par l'état (0 ou 1) des quatre interrupteurs  $S_{1H}$ ,  $S_{2H}$ ,  $S_{1B}$  et  $S_{2B}$  d'un bras de l'onduleur. La Figure (III 7) montre la structure d'un onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC connecté à une charge RL en étoile.



**Figure III 8:** Onduleur triphasé à trois niveaux connectés à une charge en étoile

L'onduleur est connecté à une charge triphasée en étoile à travers les pôles A, B, C dont le point neutre O n'est pas relié au point M. Les tensions  $V_{am}$ ,  $V_{bm}$ ,  $V_{cm}$  sont déphasées l'une par rapport à l'autre de  $1/3$  de la période. Les tensions par phase de l'onduleur forment un système équilibré, dans le quelle les harmoniques impaires multiples de trois sont nuls. Les tensions de phase sont déterminées par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{am} + V_{mo} \iff V_{ao} = V_{am} - V_{om} \\ V_{bo} = V_{bm} + V_{mo} \iff V_{bo} = V_{bm} - V_{om} \\ V_{co} = V_{cm} + V_{mo} \iff V_{co} = V_{cm} - V_{om} \end{cases} \quad (\text{III 6})$$

### III.4.1 Problème de la tension du mode homopolaire ou le mode commun :

Dans les charges alimentées par des onduleurs de tensions à MLI, les formes d'ondes des courants des trois phases sont pratiquement sinusoïdales et forment un système équilibré. Ceci permet éventuellement d'écrire l'équation suivante :

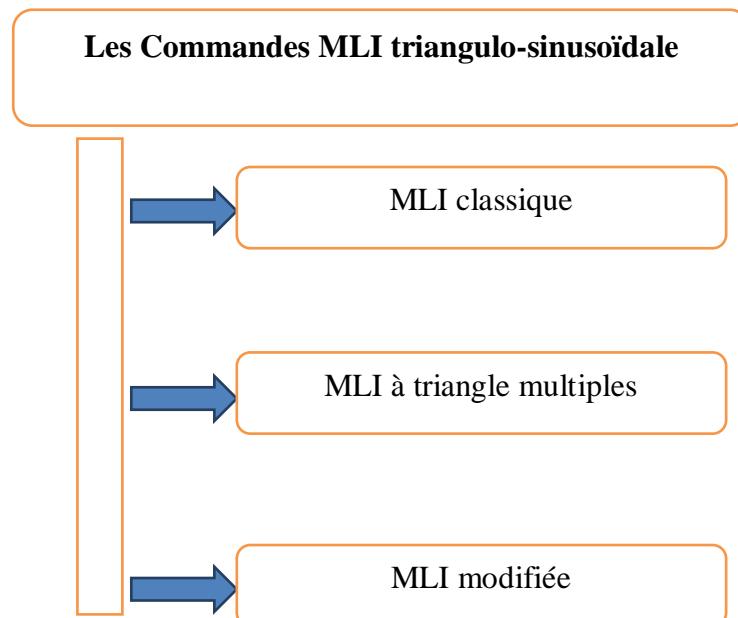
$$I_A + I_b + I_c = 0 \quad (\text{III } 7)$$

La composante homopolaire de la tension  $V_{mc}$  est obtenue en sommant les trois tensions  $V_{am}$ ,  $V_{bm}$  et  $V_{cm}$  :

$$V_{mc} = \frac{V_{am} + V_{bm} + V_{cm}}{3} \quad (\text{III } 8)$$

En effet, lorsqu'une charge triphasée connectée en étoile est alimentée par un onduleur de tension à MLI, La valeur instantanée de la tension  $V_{mc}$  au point neutre par rapport à la terre n'est pas nulle, et la forme d'onde de  $V_{mc}$  dépend de la stratégie de commande utilisée [1]. Les courants du mode commun générés par le déséquilibre des tensions du mode commun ont des effets indésirables sur les charges. Ils seront explorés en détail dans les sections suivantes de ce chapitre

### III.5 Les différentes techniques de modulation pour les Commandes MLI triangulo-sinusoidale



Les objectifs communs aux techniques de commutation dans ce cas sont :

- Régulation en fréquence et en amplitude de la tension ou du courant générées par le convertisseur
- La minimisation du taux d'harmonique de la tension ou du courant généré.
- Equilibrage de la tension aux bornes des capacités
- Elimination du mode homopolaire (mode commun) de la tension et du courant.

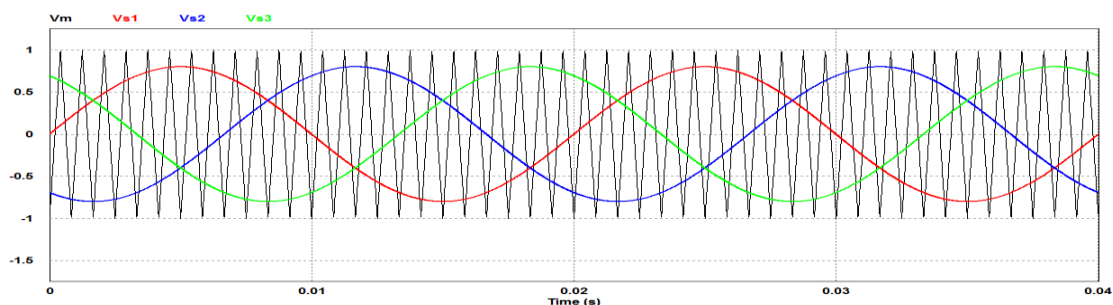
### III.5.1. Commande MLI Triangulo-sinusoidale

La modulation de la largeur d'impulsion (PWM) est une technique très utilisée dans l'industrie. Son principe de base est la génération de signaux de commutation d'interrupteurs suite à une comparaison de l'amplitude de signaux en dent de scie nommés porteuses et un signal sinusoïdale nommé référence. Les impulsions de commutations ainsi obtenues permettent la commande des interrupteurs du convertisseur.[3]

#### III.5.2.1 Modulation sinusoïdale classique

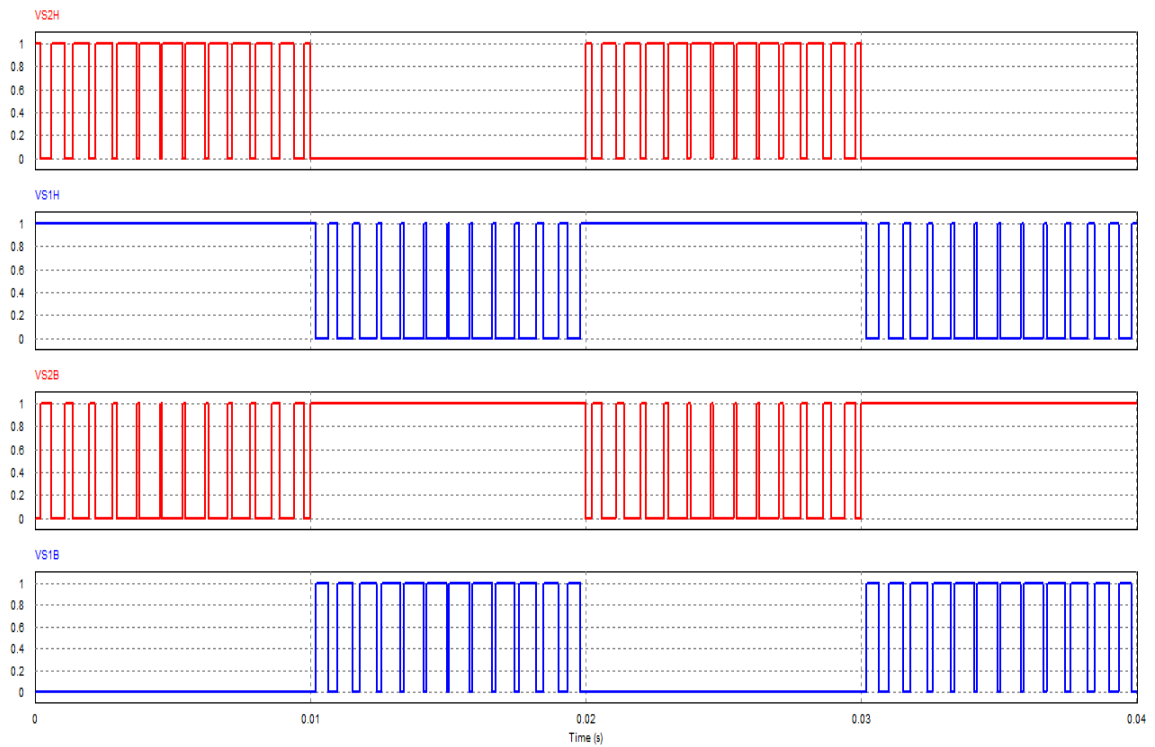
Comme pour le cas des onduleurs à deux niveaux, les signaux de commande des interrupteurs de l'onduleur NPC sont obtenus à partir des intersections des trois signaux de référence sinusoïdaux déphasés entre eux de  $120^\circ$ , de fréquence  $f_s$  et d'amplitude  $A_s$ , avec un signal triangulaire d'amplitude  $A_c$  et de fréquence  $f_c$ , très supérieure à  $f_s$ . [2]

La Figure (III 10) montre les signaux de référence de forme sinusoïdale avec un signal triangulaire (la porteuse), qui génèrent les signaux de commande dans la Figure (III 11) des interrupteurs. S2H, S1H, S2Bet S1B représentent les signaux de commande des interrupteurs pour la phase "A". D'une façon similaire, on génère les signaux de commande des interrupteurs pour les phases "B" et "C" déphasées de  $120^\circ$  et  $240^\circ$  respectivement de la phase "A"

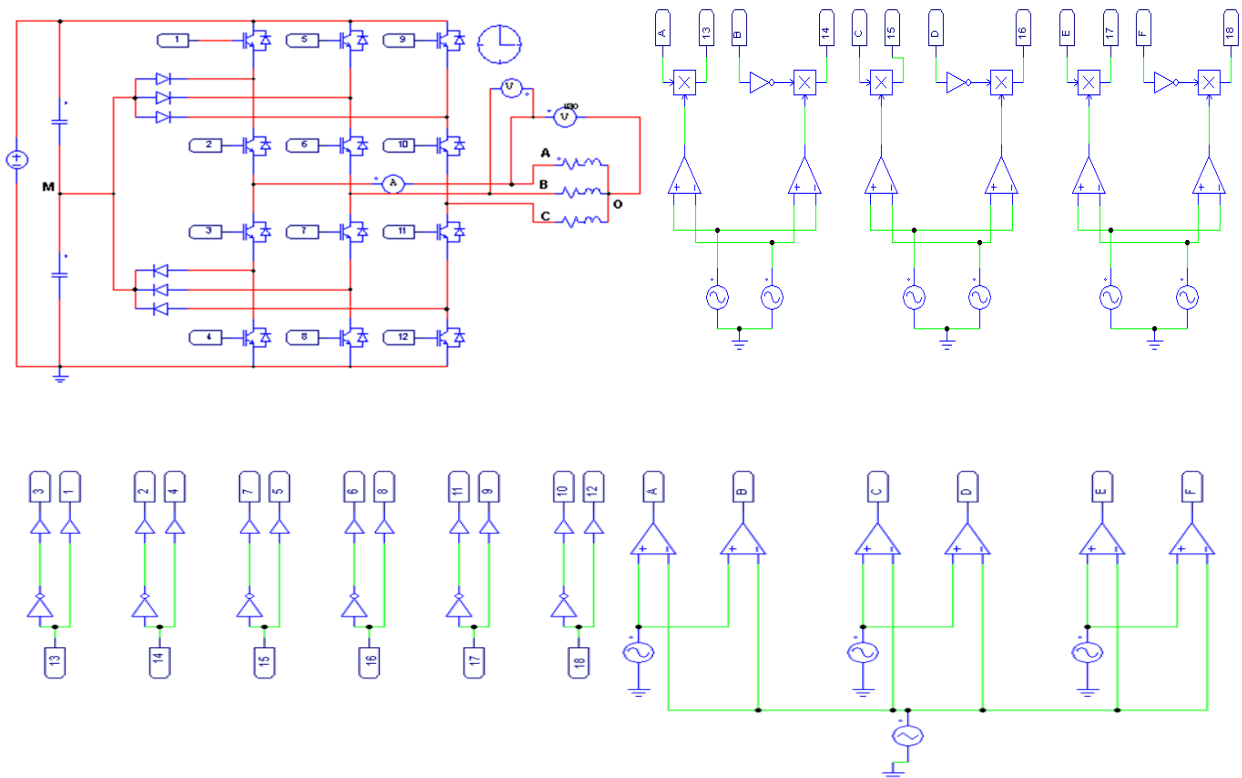


**Figure III 9:** les signaux d'entrée de l' Onduleur NPC à 3 niveaux





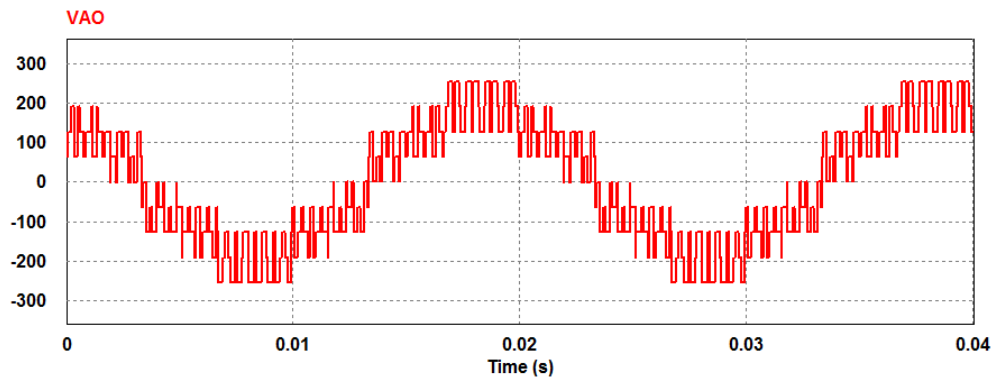
**Figure III 10:** Génération des signaux de commande par la modulation sinusoïdale classique d'un seul bras d'Onduleur NPC à 3 niveaux.



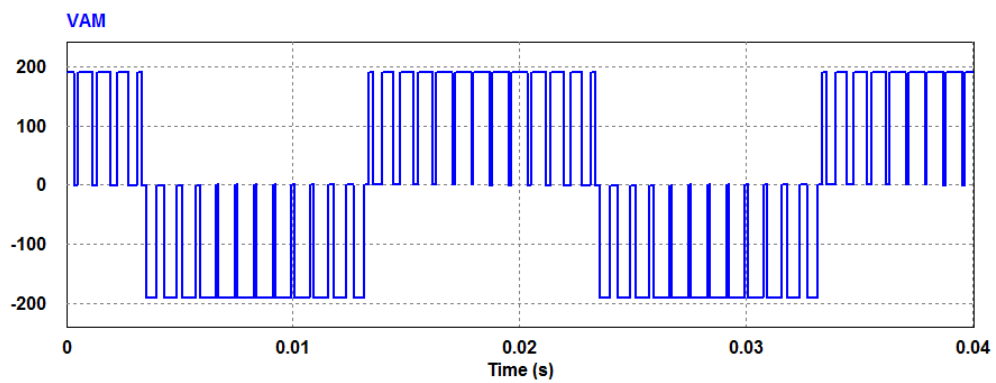
**Figure III 11:** schéma de simulation d'une commande MLI-ST classique d'un onduleur NPC à trois Niveaux

➤ **Résultats de simulation pour l'onduleur trois niveaux commandé par la modulation sinusoïdale classique**

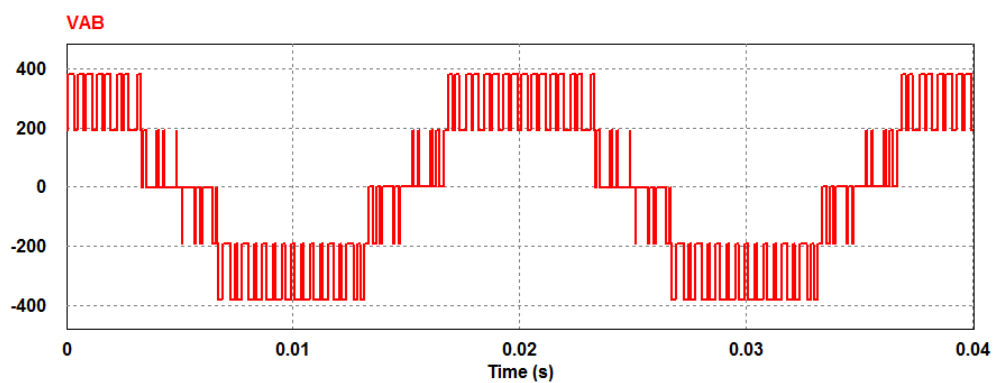
Nous présentons dans cette partie les résultats de simulations relatifs à la commande par la modulation sinusoïdale classique d'onduleur trois niveaux.



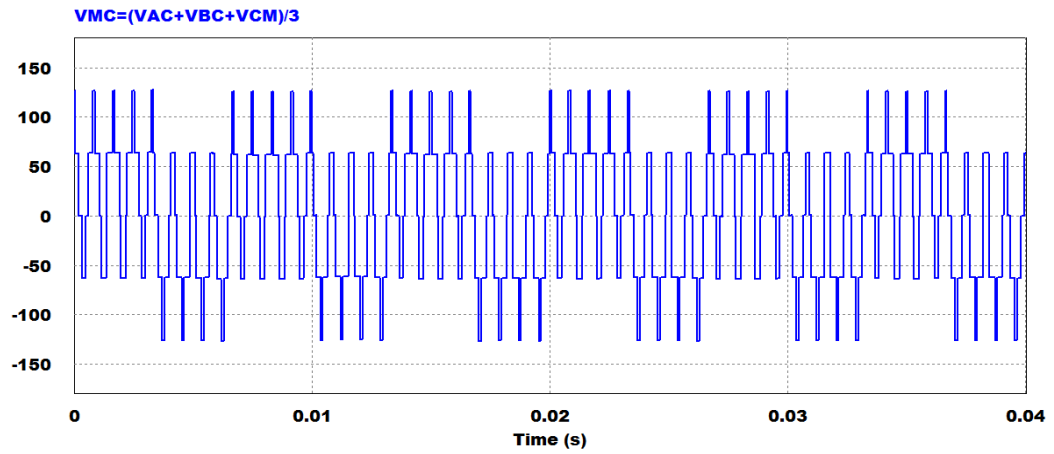
**Figure III 12:** Tension d'une phase de l'onduleur  $V_{ao}$



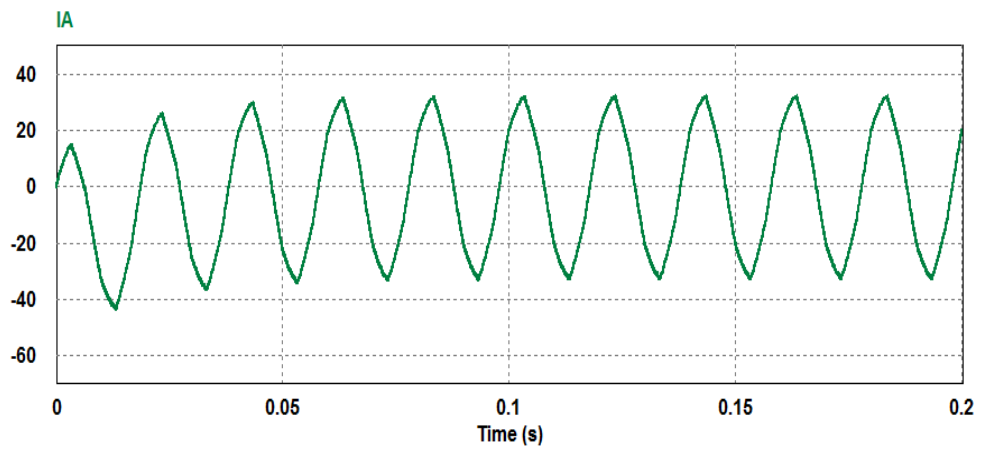
**Figure III 13 :** Tension d'une phase de l'onduleur par rapport au point neutre M,  $V_{am}$



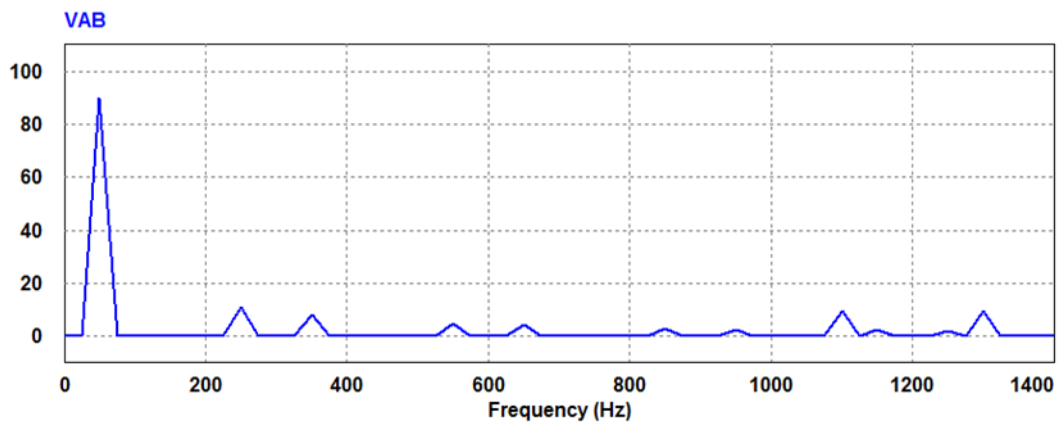
**Figure III 14:** tension entre phase de l'onduleur  $V_{ab}$



**Figure III 15:** tension du mode commun  $V_{mc}$ .



**Figure III 16:** courant de la phase  $I_a$ .



**Figure III 17:** spectre d'harmoniques de la tension composée  $V_{ab}$ , THD = 36.34 %

### Interprétation des résultats :

Les formes d'ondes des tensions de sortie de l'onduleur sont représentées dans les figures (III 13), (III 14) et (III 15). La Figure (III 16) montre la présence de la tension du mode commun tandis que le spectre de la tension composée générée par l'onduleur commandée par la modulation sinusoïdale classique est présenté par la figure (III 18). Le courant de la phase "A" est montré par la figure (III.17). Cette stratégie de commande permet d'augmenter la fréquence des premières harmoniques et donc facilite le filtrage.

#### III.5.2.2 Modulation sinusoïdale à triangles multiple

Cette technique est basée, dans son principe, sur la modulation sinusoïdale classique. Pour un onduleur à trois niveaux, elle recommande l'utilisation de deux signaux triangulaires de même fréquence  $f_c$  et de même amplitude  $A_c$  (crête à crête). Ces signaux triangulaires sont comparés, pour chaque phase, avec un signal de référence d'amplitude  $A_s$  et de fréquence  $f_s$ . C'est la modulation sinusoïdale à double triangle., la technique sinusoïdale classique avec son signal triangulaire unique, ne permet pas la génération de tous les signaux de commande requis. Alors, c'est la modulation sinusoïdale à triangles multiples qui le permet. Cette technique nécessite  $(m-1)$  signaux triangulaires de même fréquence  $f_c$  et de même amplitude  $A_c$ . Le taux de modulation  $m_a$  et le rapport de fréquence  $m_f$  sont donnés respectivement par les expressions suivante [3]

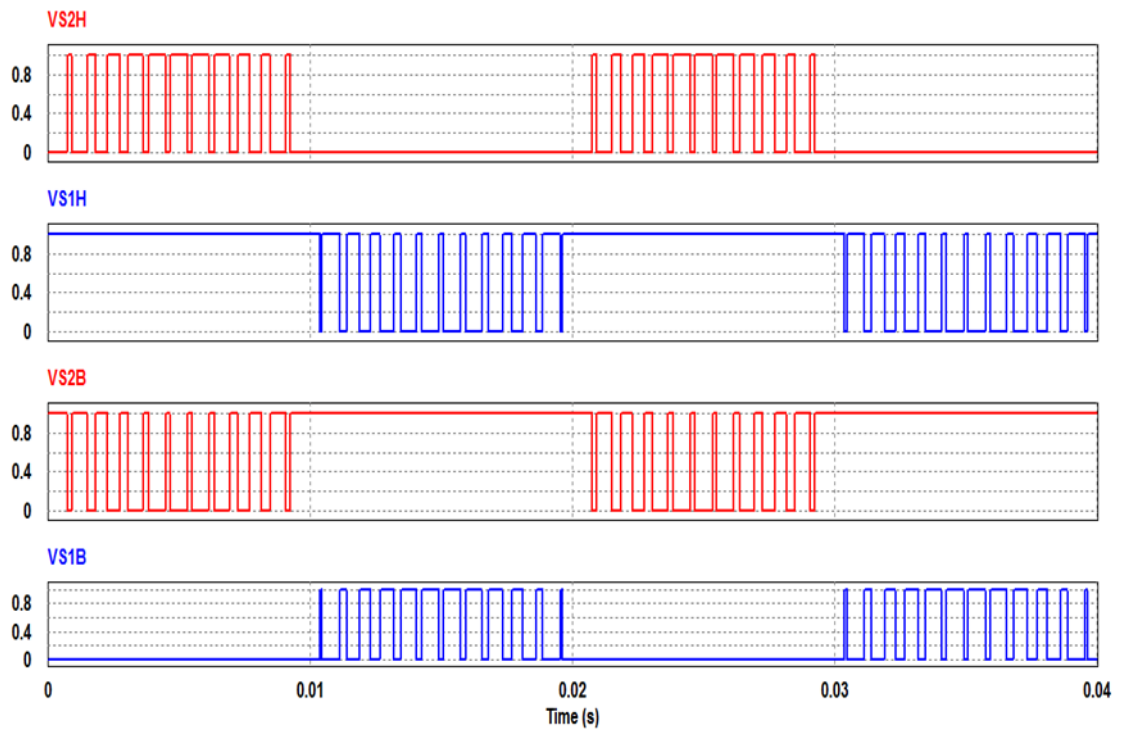
$$m_a = \frac{A_s}{A_c(m-1)} \quad (\text{III } 9)$$

$$m_f = \frac{f_c}{f_s} \quad (\text{III } 10)$$

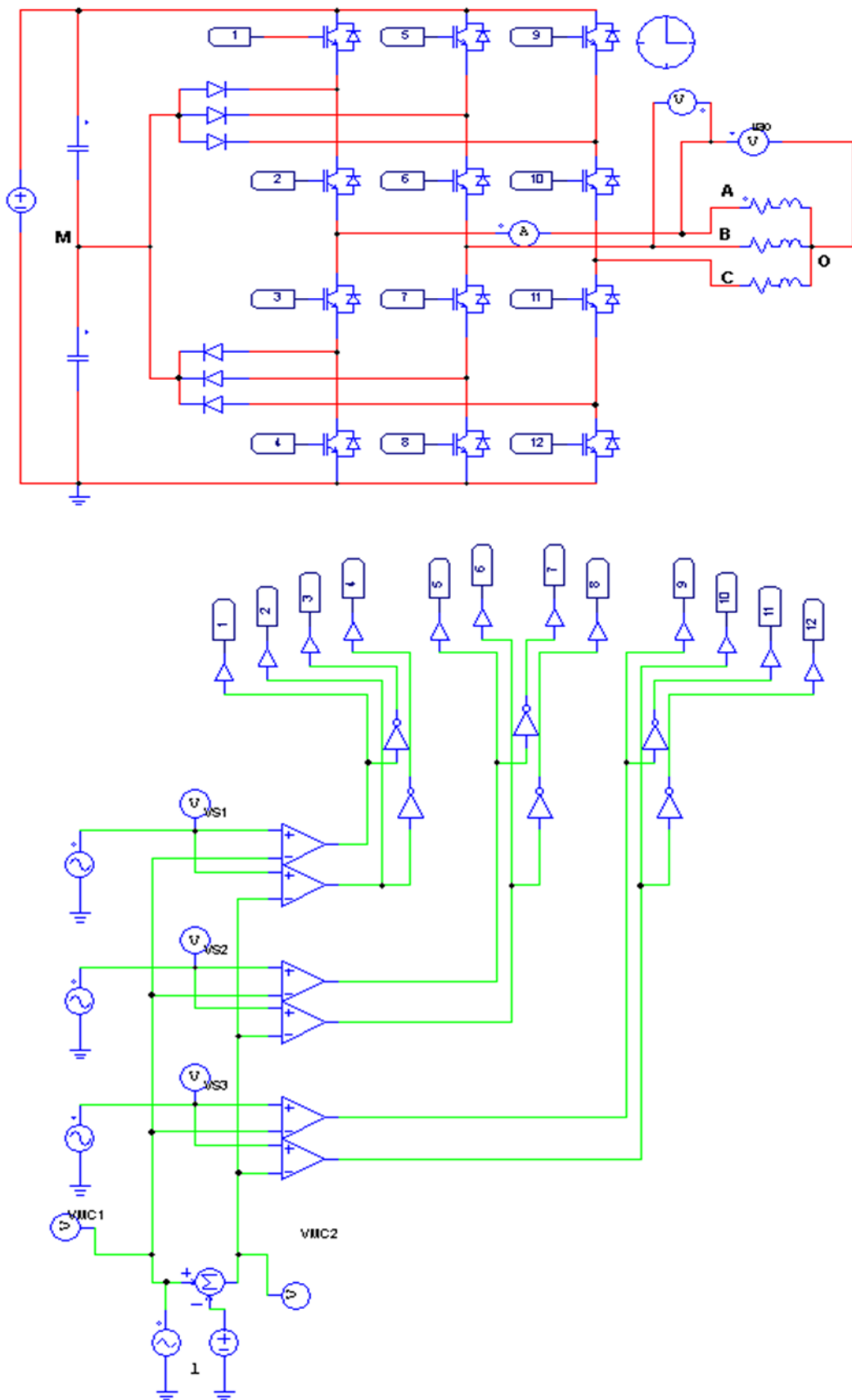
Figure (III 18) représente le principe de la modulation sinusoïdale à double triangle. Deux porteuses sont utilisées, avec trois signaux de référence Figure (III 21), qui génèrent les signaux de commande des interrupteurs. S2H, S1H, S2B et S1B représentent les signaux de commande des interrupteurs pour la phase "A" Figure (III 19), D'une façon similaire, on génère les signaux de commande des interrupteurs pour les phases "B" et "C".



**Figure III 20:** les signaux d'entrés pour la modulation sinusoïdale à triangles multiples (Onduleur NPC à 3 niveaux)



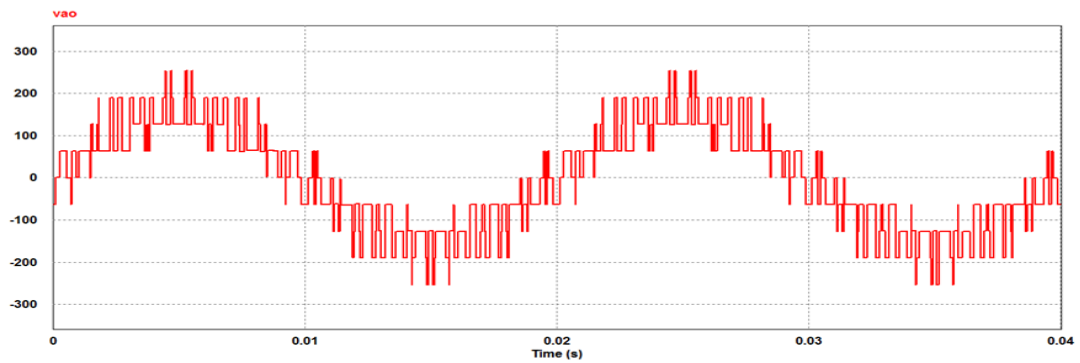
**Figure III 21:** Génération des signaux de commande par la modulation sinusoïdale à triangles multiples (Onduleur NPC à 3 niveaux)



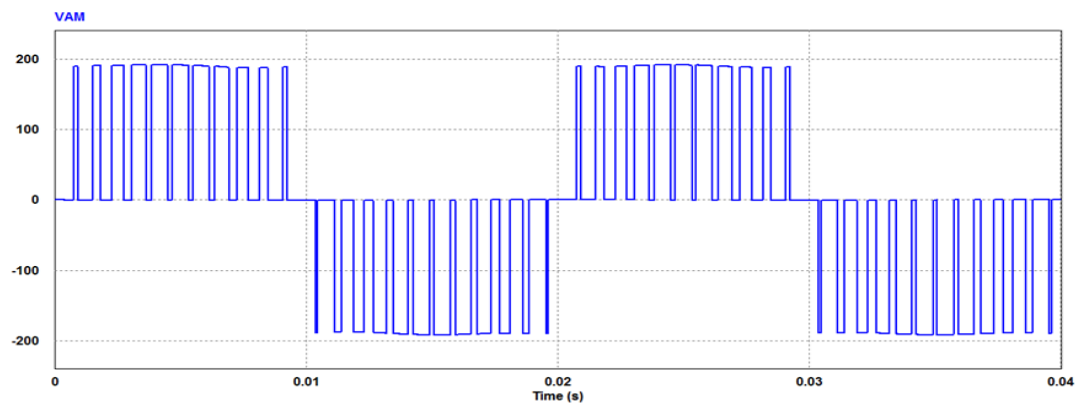
**Figure III 22:** schéma de simulation d'une commande MLI à triangle multiple d'un onduleur NPC à trois Niveaux

➤ **Résultats de simulation pour l'onduleur trois niveaux commandé par la Modulation sinusoïdale à triangles multiples**

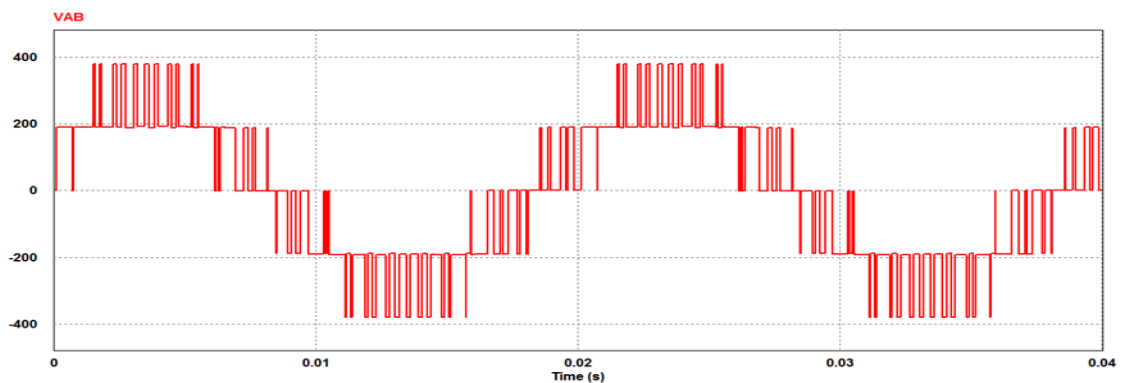
Les résultats de simulation pour l'onduleur trois niveaux commandé par la Modulation sinusoïdale à triangles multiples sont illustrés dans les figures (III 23– Figure III 24)



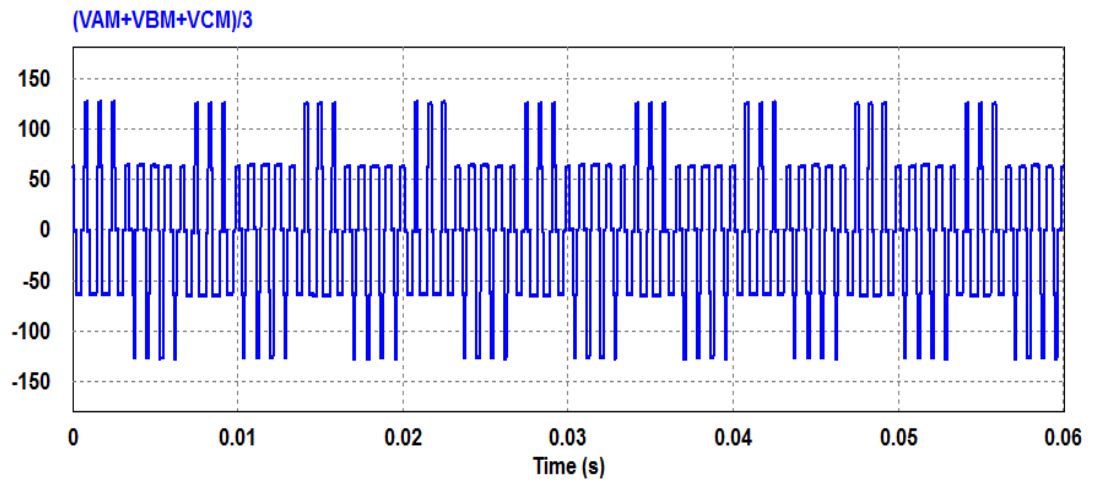
**Figure III 25:** Tension d'une phase de l'onduleur  $V_{ao}$



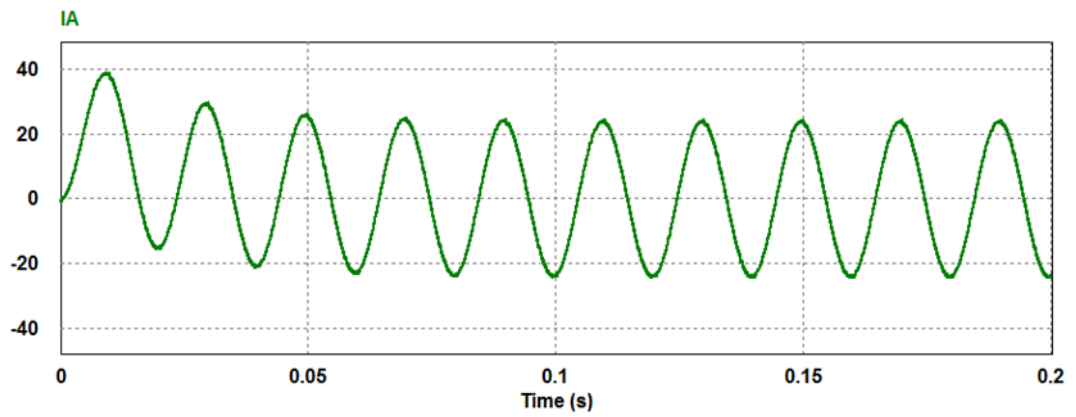
**Figure III 26 :** Tension d'une phase de l'onduleur par rapport au point neutre M,  $V_{am}$



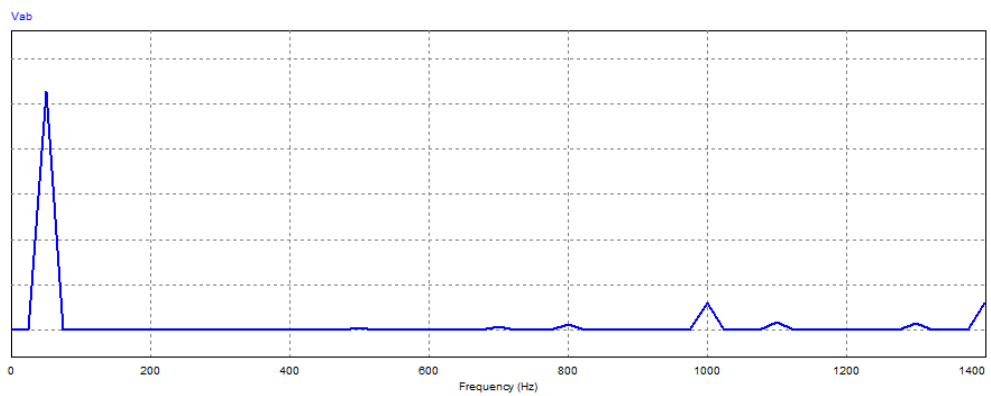
**Figure III 27:** Tension entre phase de l'onduleur  $V_{ab}$



**Figure III 28:** Tension du mode commun  $V_{mc}$ .



**Figure III 29:** courant de la phase IA



**Figure III 30:** spectre d'harmoniques de la tension composée  $V_{ab}$ , THD = 36.45%



### Interprétation de résultats :

D'après l'analyse des figures (III 26), (III 27) et (III 28) qui montrent les tensions simples et la tension composée, nous constatons que les tensions sont constituées de petits créneaux plus le  $mf$  est augmenté, le nombre de créneaux augmente. A partir de l'analyse de la figure (III 31) qui représente le spectre d'harmonique de la tension composée, nous constatons une nette amélioration du spectre par rapport à la commande précédente (commande sinusoïdale classique), cette amélioration est due à l'atténuation des harmoniques, et nous remarquons l'amélioration de la forme du courant  $I_a$  de charge sur la figure (III. 30).

Nous constatons la présence de la tension du mode homopolaire (mode commun) sur la figure figure (III.29), qui est due à cette technique de commande.

#### III.5.2.3 Modulation sinusoïdale modifiée :

Dans le but d'éliminer la tension homopolaire générée par les techniques de commande de l'onduleur présentées ci-dessus, il est recommandé d'utiliser une nouvelle technique à MLI. C'est la modulation sinusoïdale modifiée [3]

Cette méthode utilise trois signaux de références, de forme sinusoïdale d'amplitudes  $V_{s1}$ ,  $V_{s2}$  et  $V_{s3}$  décalées entre eux de  $2\pi/3$ , avec un seul signal triangulaire comme illustré sur la figure (III 33). En première étape, des signaux MLI intermédiaires  $K_1$ ,  $K_2$  et  $K_3$  sont obtenus par la comparaison de la porteuse avec les trois références  $V_{s1}$ ,  $V_{s2}$  et  $V_{s3}$  comme le montre la figure (III 34), En seconde étape la figure (III 35) montre la forme d'onde des états de la première phase  $K_1^*$  résultante qui est obtenue par l'équation suivante.

$$K_1^* = (K_1 - K_2) / 2$$

Le même algorithme est appliqué pour les autres phases, en utilisant les équations suivantes

$$K_2^* = (K_2 - K_3) / 2$$

$$K_3^* = (K_3 - K_1) / 2$$

Ainsi les états des interrupteurs de l'onduleur sont déterminés par les règles suivantes

$$\text{Si } K_1^* = 1 \text{ alors } S_{2H} = 1, \text{ et } S_{1H} = 1$$

$$\text{Si } K_1^* = 0 \text{ alors } S_{2H} = 0, \text{ et } S_{1H} = 1$$

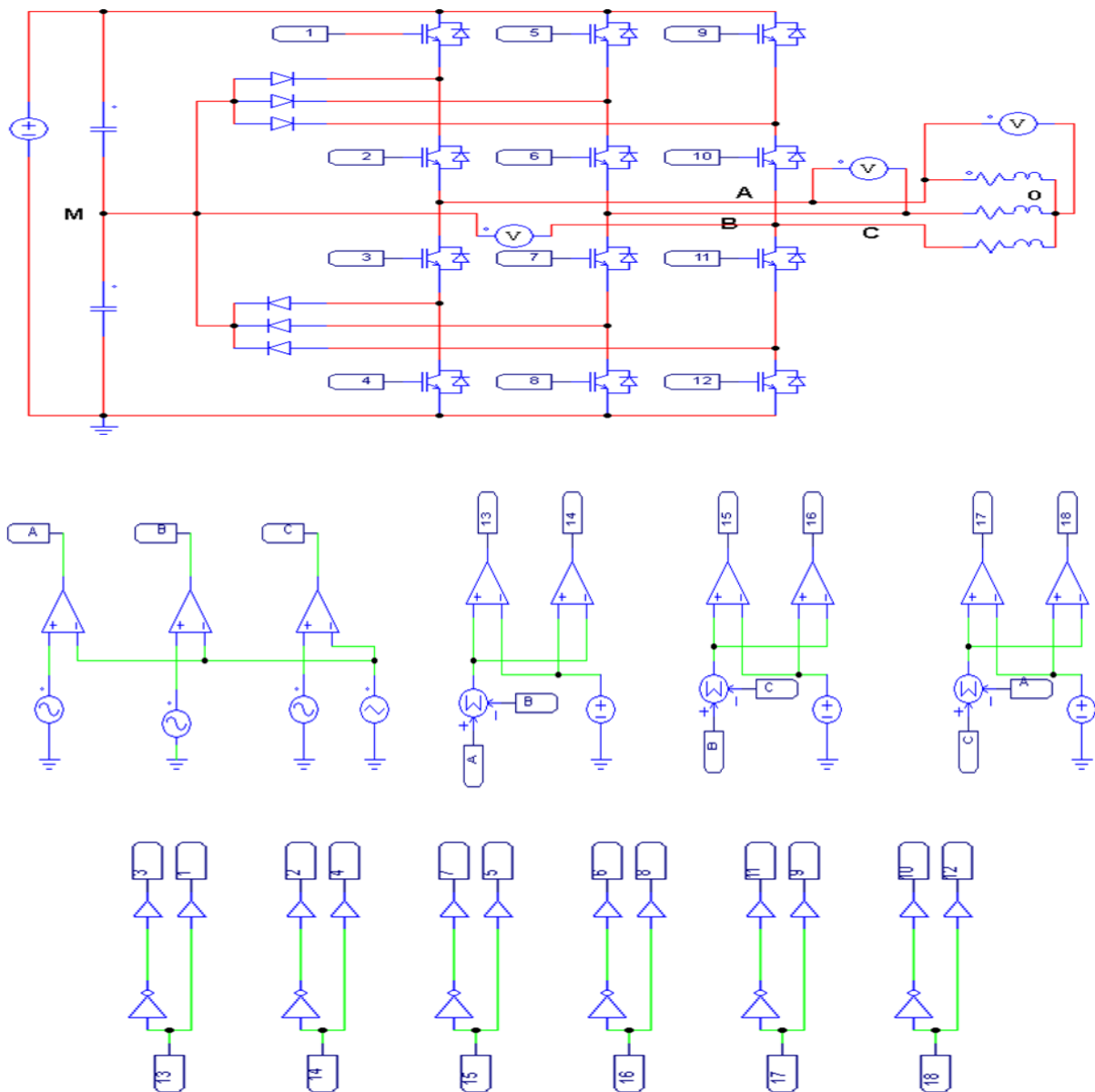
$$\text{Si } K_1^* = -1 \text{ alors } S_{2H} = 0, \text{ et } S_{1H} = 0$$

On note d'après la figure (III 36) que ( $S_{2B} = \overline{S_{2H}}$  et  $S_{1B} = \overline{S_{1H}}$ ), car les états des interrupteurs d'un même bras sont complémentaires.

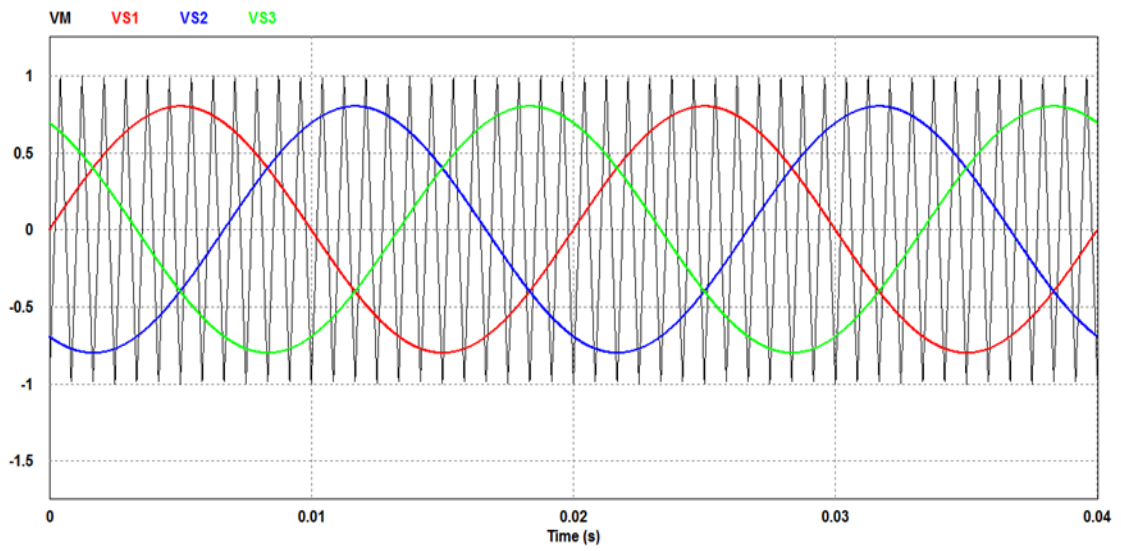
### Généralisation de la technique de modulation sinusoïdale modifiée

Le principe de cette technique a été présenté pour l'onduleur de tension à trois niveaux de type NPC. Elle utilise une seule porteuse (signal triangulaire) pour la génération des signaux de commande. on doit être en mesure de déterminer le nombre de porteuses requise pour chaque ordre d'onduleur, on a réussi à établir une relation qui permet, selon le nombre de niveaux de l'onduleur  $m$ , de déterminer avec exactitude le nombre de porteuses nécessaires. Cette relation est donnée par l'équation suivante :

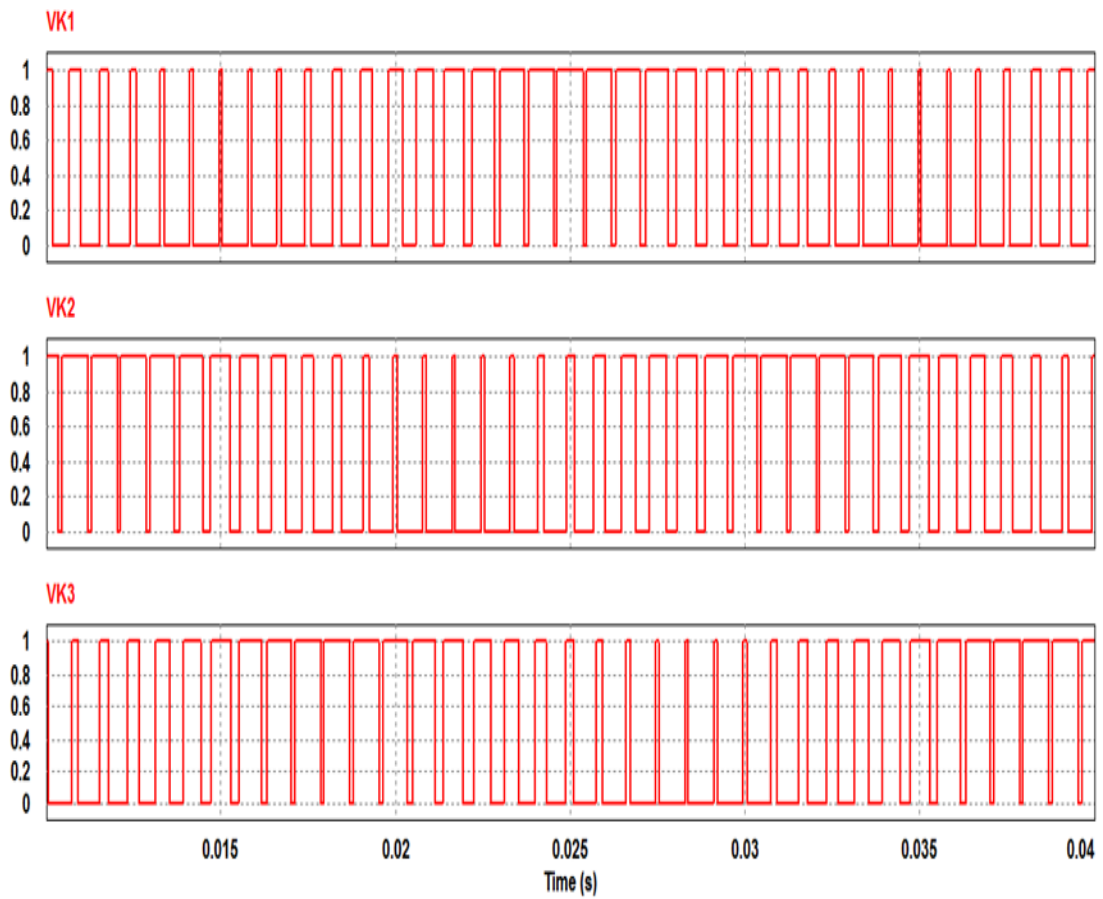
$$\text{Nombre de porteuses} = (m - 1)/2 \tag{III 11}$$



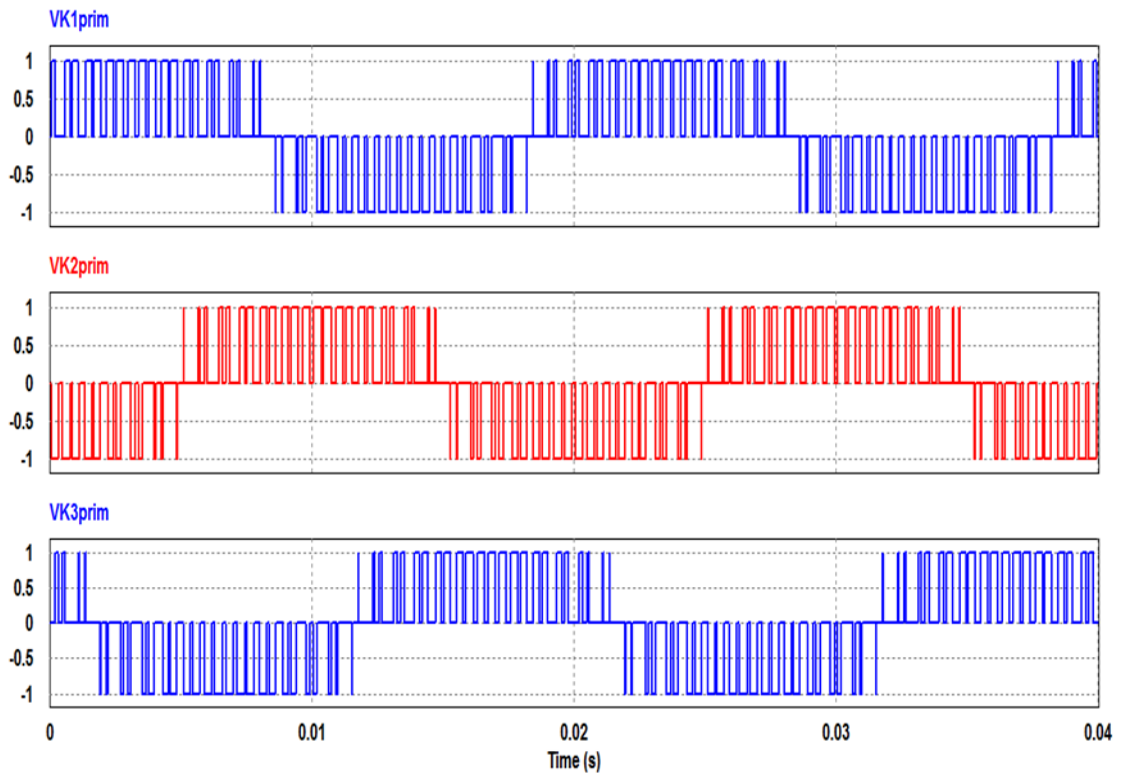
**Figure III 31:** schéma de simulation d'une commande MLI à triangle multiple d'un onduleur NPC à trois Niveaux



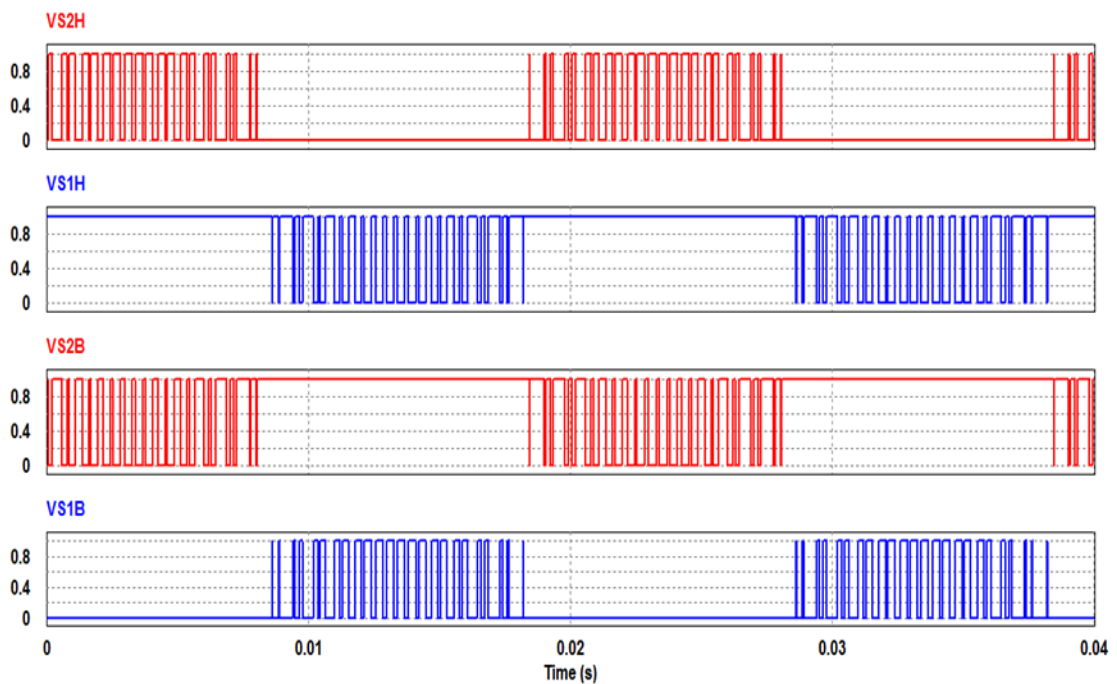
**Figure III 32:** les signaux d'entrés



**Figure III 33 :** Les signaux intermédiaires



**Figure III 34:** les formes d'ondes des états des phases



**Figure III 35:** Génération des signaux de commande par la modulation sinusoïdale modifiée (Onduleur NPC à 3 niveaux)

➤ Les résultats de simulation de l'onduleur trois niveaux commandés par la Modulation sinusoïdale modifiée sont présentés dans les figures (III.34) . (III.39) :

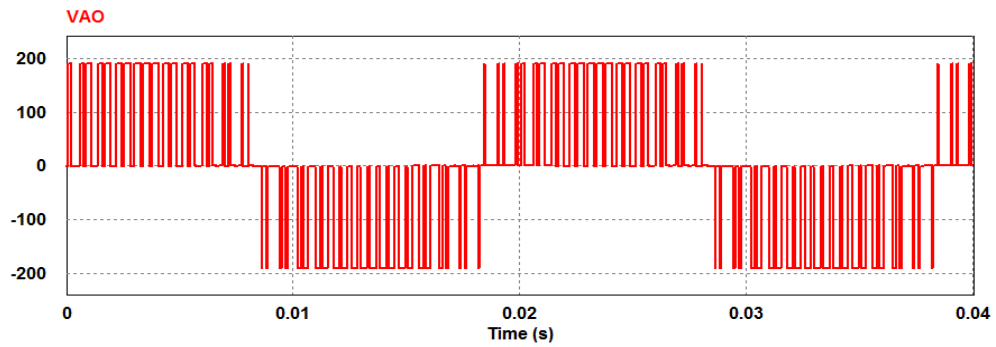


Figure III 36 : Tension d'une phase de l'onduleur VAO

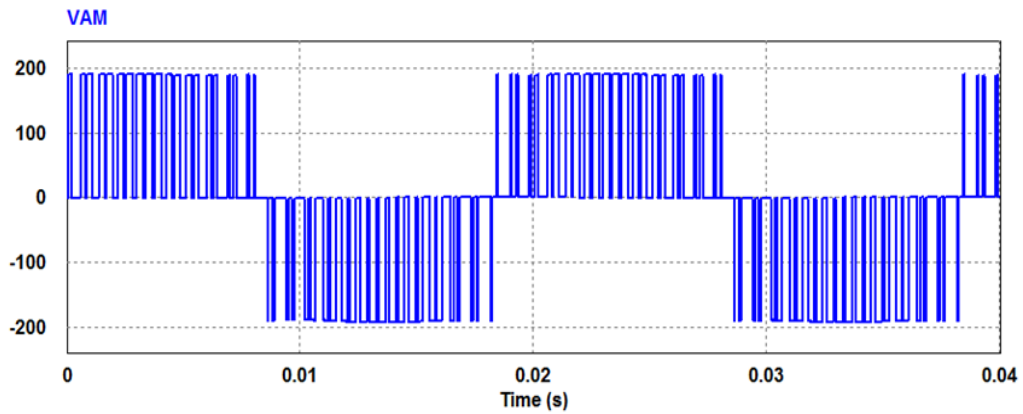


Figure III 37 : Tension d'une phase de l'onduleur par rapport au point neutre M, Vam

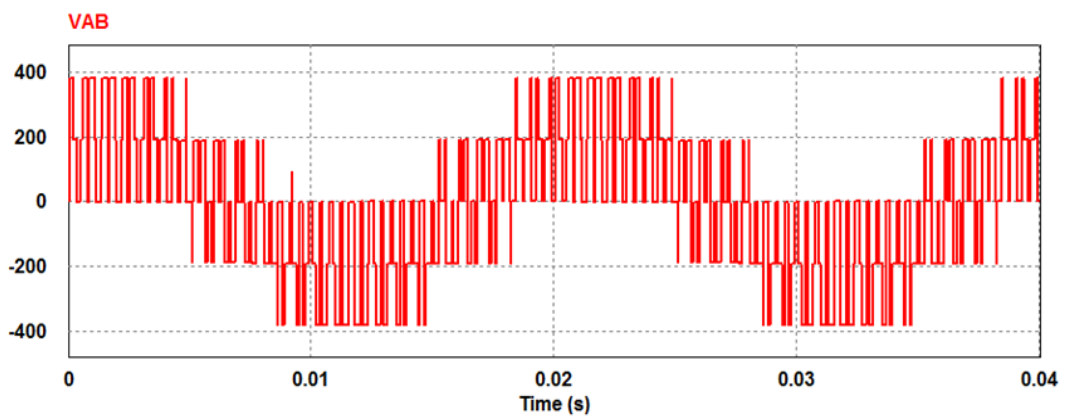
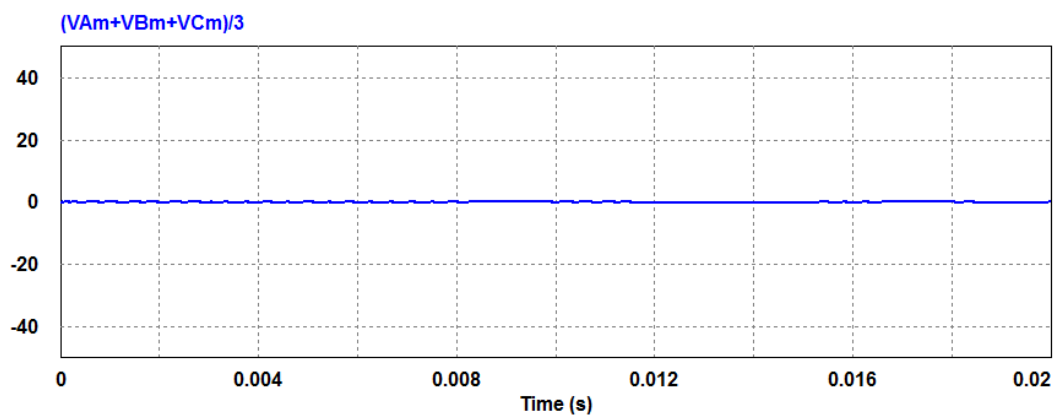
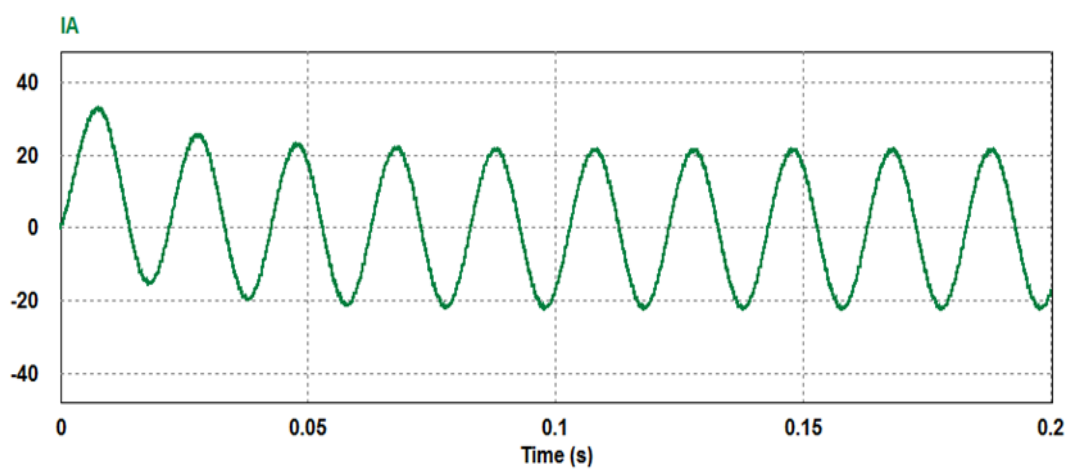


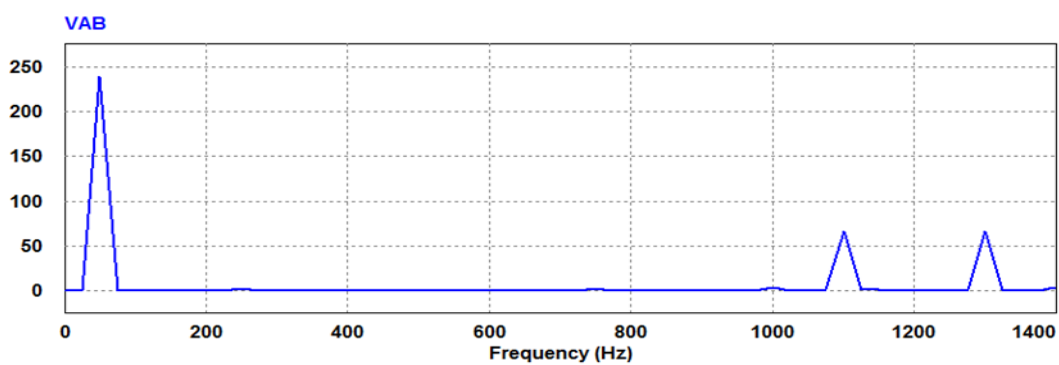
Figure III 38: Tension entre phase de l'onduleur Vab



**Figure III 39:** Tension du mode commun  $V_{mc}$



**Figure III 40:** Le courant de la phase  $I_a$



**Figure III 41:** Le spectre d'harmoniques de la tension composée  $V_{ab}$ , THD = 46.16 %

### **Interprétation des résultats :**

La simulation de l'onduleur NPC à trois niveaux commandés par la technique de modulation sinusoïdale modifiée donne les résultats présentés ci-dessus. On y représente les tensions de sortie de l'onduleur  $V_{ao}$ ,  $V_{am}$  et  $V_{ab}$  ainsi que la tension du mode homopolaire  $V_{mc}$ , sur les figures (III.37), (III.38), ( III.39 ) et (III.40) respectivement. L'avantage de cette commande est dans l'atténuation de la tension du mode homopolaire, et l'annulation des harmoniques d'ordre inférieure. La figure (III.41) montre l'amélioration du courant de charge.

### **III.6 Interprétation des résultats des différentes commandes**

L'analyse des courbes représentant la tension homopolaire est à la base de la comparaison des trois techniques de modulation utilisées pour la commande de l'onduleur NPC à trois niveaux. Les résultats présentés ci-dessus montrent l'importance de la tension homopolaire  $V_{mc}$  pour les stratégies de modulation (classique, triangle multiple et modifiée). Par contre la modulation sinusoïdale modifiée, la tension du mode commun est annulée par cette commande. La modulation sinusoïdale modifiée, élimine complètement toutes les harmoniques, à l'exception de celles autour de l'ordre de la fréquence de commutation. Donc, les résultats de simulation démontrent que cette technique améliore la qualité de la tension de sortie et réduit considérablement la tension du mode homopolaire.

### **III.7 Conclusion :**

A travers ce chapitre nous avons présenté les équations mathématiques utilisées pour la modélisation des convertisseurs utilisés dans les véhicules électriques, ainsi cette validation s'est effectuée par des simulations qu'on a également présentées. Il existe plusieurs topologies d'onduleurs, dont chacune correspond à un type d'application déterminé où permettant d'atteindre des performances recherchées. Nous avons étudié trois différentes stratégies de commande à MLI triangulo-sinusoïdale (classique, triangle multiple et modifiée) appliquées pour l'onduleur à trois niveaux de type NPC, Les résultats de simulation obtenus montrent la supériorité de la technique de commande à MLI modifiée dans l'annulation des harmoniques sauf de celles autour de l'ordre de la fréquence de commutation.

Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation et la simulation de l'ensemble onduleur multiniveaux-machine asynchrone.

## **CHAPITRE IV: Modélisation et simulation de l'ensemble onduleur multiniveaux- machine asynchrone**

### **IV.1 Introduction**

La modélisation de la machine asynchrone est une phase indispensable. Il est donc évident que cette étape est un passage obligatoire pour concevoir des systèmes de commande performants et adaptés aux variateurs de vitesse.

Le moteur asynchrone est le moteur électrique le plus utilisé dans l'industrie ; il est peu coûteux, on le fabrique en grande série, il est robuste, fiable et économique. Il fonctionne directement sur le secteur alternatif, sans transformations préalables de l'énergie électrique qui l'alimente, c'est le moteur industriel par excellence qui ne possède pas d'organes délicats comme le collecteur du moteur à courant continu et qui n'utilise pas de contacts glissants comme le moteur synchrone (pour l'excitation du rotor)

il est devenu possible d'utiliser la technique MLI pour améliorer la forme d'onde du courant du moteur et par conséquent minimiser des harmoniques provoquant l'échauffement de la machine et les pulsations du couple [3].

Dans ce chapitre, sera présentée la simulation d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur à 3 niveaux commandé par La MLI modifiée

### **IV.2 Généralités sur les machines asynchrones**

#### **IV. 2.1 Description et principe de fonctionnement**

Le moteur asynchrone comporte deux parties essentielles, l'une fixe appelée stator (primaire), portant un bobinage triphasé logé dans les encoches, relié à la source d'alimentation, et l'autre mobile ou rotor (secondaire) qui peut être soit bobiné soit à cage d'écurie. Ces deux parties sont coaxiales et séparées par un entrefer. Le principe de fonctionnement repose entièrement sur les lois de l'induction :

- La machine asynchrone est un transformateur à champ magnétique tournant dont le secondaire (rotor) est en court-circuit.
- La vitesse de rotation  $\Omega_s$  du champ tournant d'origine statorique, rigidement liée à la fréquence  $f_s$  de tension triphasée d'alimentation.

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad (\text{tr/min}) \quad (\text{IV.01})$$

$\omega_s$  : Pulsation statorique , liée à la fréquence du stator.



On désigne par "p" le nombre de paires de pôles de chacune des enroulements des phases statoriques. Lorsque le rotor tourne à une vitesse  $\Omega_r$ , différente de  $\Omega_s$ (asynchrone), l'application de la loi de Faraday aux enroulements rotoriques montre que ceux-ci deviennent le siège d'un système de forces électromotrices triphasées, engendrant elles-mêmes trois courants rotoriques, d'après la loi de LENZ ces derniers s'opposent à la cause qui leur a donné naissance, c'est-à-dire la vitesse relative de l'induction tournante statorique par rapport au rotor. Ceci va entraîner le rotor vers la poursuite du champ et essayer de le faire tourner à la même vitesse  $\Omega_s$ , cette vitesse ne peut être atteinte ; car il n'y aurait plus de courants induits, donc plus de force, et le rotor tourne à une vitesse  $\Omega_r$  inférieure à  $\Omega_s$ , il n'est pas au synchronisme du champ : la machine est dite asynchrone. De ce fait, selon que  $\Omega_r$  est inférieure (hypo-synchrone) ou supérieure (hyper synchrone) à  $\Omega_s$ , la machine développe respectivement un couple moteur tendant à accroître  $\Omega_r$ , ou un couple résistant tendant à réduire  $\Omega_r$ , de toute évidence le couple électromagnétique s'annule à l'égalité de vitesse. L'échange énergétique avec le réseau donne le signe de l'écart ( $\Omega_s - \Omega_r$ ). On caractérise ainsi le fonctionnement asynchrone par le glissement défini par :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} \quad (IV\ 02)$$

Dans les conditions nominales de fonctionnement de la machine en moteur, le glissement exprimé en pourcent est de quelques unités. Une augmentation de la charge mécanique provoque une augmentation du glissement et des pertes joules dans les enroulements statoriques et rotoriques.

#### **IV.2.2 Hypothèse simplificatrices**

La modélisation de la machine asynchrone s'appuie sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, qui sont [1]:

L'entrefer est d'épaisseur uniforme.

L'effet d'encochage est négligeable.

La saturation du circuit magnétique,

L'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.

Pertes ferromagnétiques négligeables.

Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau.

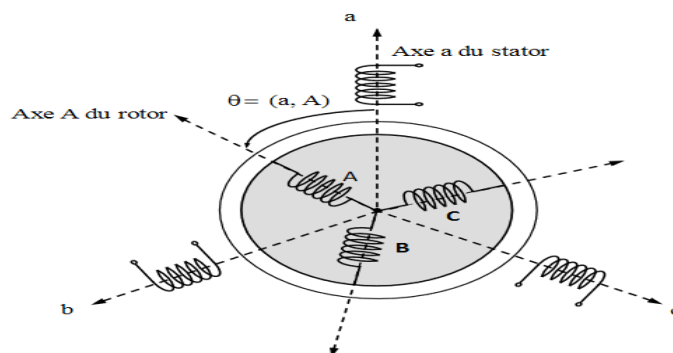
On admet de plus que les forces magnétomotrices f.m.m créées par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale.

#### IV.2.3 Avantages et inconvénients la machine asynchrone

Les courants qui circulent dans le stator, constituent l'unique source externe du champ magnétique. Sa vitesse varie un peu quand on le charge, on dit qu'il glisse, mais ce glissement est en générale ne dépasse pas quelques centièmes de la vitesse à vide, il est négligeable le plus souvent. Le démarrage des moteurs asynchrones ne pose pas de problèmes pour les unités de petite puissance. Par contre, pour les moteurs de forte puissance, il faut démarrer sous tension réduite pour éviter un appel de courant trop élevé. Par contre dans le moteur asynchrone les courants statoriques sont à la fois à générer le flux et le couple. Le découplage naturel de la machine à courant continu n'existe pas. D'autre part on ne peut connaître les variables internes du rotor à cage qu'à travers le stator. L'inaccessibilité du rotor nous amènera à modifier l'équation vectorielle rotorique pour exprimer les grandeurs rotoriques à travers leurs actions sur le stator. La simplicité structurelle cache donc une grande complexité fonctionnelle due aux caractéristiques qui viennent d'être évoquées mais également aux non linéarités, à la difficulté d'identification étaux variations des paramètres (  $R_r$  en particulier) [3].

#### IV.3 Modèle triphasé de la MAS :

Pour avoir le modèle simplifié de la machine on utilise les hypothèses précédentes : La mise sous forme d'un modèle mathématique d'une machine asynchrone nous facilite largement son étude pour sa commande dans les déférents régimes de fonctionnement transitoire ou permanent. Les axes rotoriques tournent avec  $\Omega$  par rapport aux axes statoriques fixes comme le montre la



**Figure IV 1:** Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée

### IV.3.1 Equations des tensions :

En partant de la Figure (4.01), les équations électriques du modèle de la machine asynchrone triphasée s'écrivent respectivement par rapport au stator avec l'indice (s) et par rapport au rotor avec l'indice (r) comme suit :

Pour le stator:

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{IV } 03)$$

En désignant par :

$V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$  : Tensions appliquées aux trois phases statoriques.

$I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}$  : Courants qui traversent les trois phases statoriques.

$\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}$  : Flux totaux à travers ces enroulements.

$R_s$  : Résistance d'une phase statorique.

Ou sous la forme compacte comme suit :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s]$$

Pour le rotor:

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{IV } 04)$$

$V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}$  : Tensions rotoriques.

$I_{ra}, I_{rb}, I_{rc}$  : Courants rotoriques.

$\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}$  : Flux rotoriques.

$R_r$  : Résistance d'une phase rotorique.

Ou sous la forme compacte comme suit :

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r]$$

### IV.3.2 Equations des flux

Les relations entre flux et courants s'écrivent sous forme matricielle comme suit :

Pour le stator :

$$[\Phi_s] = [L_{cs}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r]$$

Où :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} = [L_{cs}] \cdot \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \cdot \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{IV } 05)$$

Pour le rotor

$$[\Phi_r] = [L_{cr}] \cdot [I_r] + [M_{sr}] \cdot [I_s]$$

Où :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} = [L_{cr}] \cdot \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \cdot \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.06})$$

Tel que :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}] \cdot T$$

On désigne par :

$[L_{cs}]$ : Matrice des inductances statorique

$[L_{cr}]$ : Matrice des inductances rotoriques

$[M_{sr}]$  : Matrice des inductances mutuelles statoriques.

$[M_{rs}]$  : Matrice des inductances mutuelles rotoriques

Avec :

$$L_{cs} = \begin{bmatrix} I_s & M_s & M_s \\ M_s & I_s & M_s \\ M_s & M_s & I_s \end{bmatrix} \quad (\text{IV } 07)$$

$$L_{cr} = \begin{bmatrix} I_r & M_r & M_r \\ M_r & I_r & M_r \\ M_r & M_r & I_r \end{bmatrix} \quad (\text{IV } 08)$$

$$[Msr] = [Msr]^t = M \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) & \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{IV } 09)$$

Avec :

$\theta$  : Angle qui définit la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phases «as» et «ar» pris comme axes des références.

M : valeur maximale de l'inductance mutuelle lorsque les deux axes (ar et as) se coïncident.

### IV.3.3 Equation d'état du modèle de la MAS

La représentation du modèle de la machine dépend du référentielle choisi. On choisit le repère liée au stator ( $\alpha, \beta$ ) ce qui ne permet d'obtenir des grandeurs instantanées, considérons les courants ( $I_{s\alpha}, I_{s\beta}$ ) les flux rotorique ( $\Phi_{ra}, \Phi_{r\beta}$ ) et la vitesse mécanique comme variable d'état, les tensions ( $V_{s\alpha}, V_{s\beta}$ ).

$$\left\{ \begin{array}{l} dI_{s\alpha} dt = -\frac{R_t}{\sigma L_s} I_{s\alpha} + \frac{M}{\sigma L_s L_r T_r} \Phi_{ra} + \frac{M}{\sigma L_s L_r} \omega \Phi_{r\beta} + \frac{1}{\sigma L_s} V_{s\alpha} \\ dI_{s\beta} dt = -\frac{R_t}{\sigma L_s} I_{s\beta} + \frac{M}{\sigma L_s L_r T_r} \Phi_{ra} + \frac{M}{\sigma L_s L_r} \omega \Phi_{r\beta} + \frac{1}{\sigma L_s} V_{s\beta} \\ \frac{d\Phi_{ra}}{dt} = \frac{M}{V} I_{s\alpha} - \frac{1}{T_r} \Phi_{ra} - \omega \Phi_{r\beta} \\ \frac{d\Phi_{r\beta}}{dt} = \frac{M}{V} I_{s\beta} - \frac{1}{T_r} \Phi_{ra} - \omega \Phi_{r\beta} \end{array} \right. \quad (\text{IV } 10)$$

Où :

$\sigma = 1 - (M^2 / L_s L_r)$  : est le coefficient de dispersion.

$T_r = L_r / R_r$  ; est la constate de temps rotorique

$R_t = R_s + M^2 L_r / T_r$  : est la résistance totale ramenée au stator.

En identifiant le système (I-27) à la forme  $dX/dt = AX+BU$  on aura :

Le vecteur d'états  $X = [I_{s\alpha} \ I_{s\beta} \ \Phi_{ra} \ \Phi_{r\beta}]$ , A la matrice dynamique du système, le vecteur de commande  $U = [V_{s\alpha} \ V_{s\beta}]$ , t et B la matrice d'application de commande,

donc :

$$X = \begin{bmatrix} Is\alpha \\ Is\beta \\ \Phi r\alpha \\ \Phi r\beta \end{bmatrix} ; \quad U = \begin{bmatrix} Vs\alpha \\ Vs\beta \end{bmatrix} ; \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma Ls} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma Ls} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{IV } 11)$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-Rt}{\sigma Ls} & 0 & \frac{M}{\sigma Ls Lr Tr} & \frac{M}{\sigma Lr Ls} \omega \\ 0 & \frac{Rt}{\sigma Ls} & \frac{M}{\sigma Ls Lr} \omega & \frac{M}{\sigma Ls Lr Tr} \\ \frac{M}{Tr} & 0 & \frac{-1}{Tr} & -\omega \\ 0 & \frac{M}{Tr} & \omega & \frac{-1}{Tr} \end{bmatrix}$$

#### IV.3.4 Expression du couple :

Pour le couple électromécanique :

$$C_{em} = P \frac{M}{Lr} (\Phi r. \alpha. Is. \beta - \Phi s. \beta. Ir. \alpha) \quad (\text{IV } 12)$$

#### IV.3.5 Equation du mouvement

L'étude du comportement de la machine asynchrone aux différents régimes de fonctionnement en particulier le régime transitoire, met en évidence l'équation du mouvement définie comme suit [2]

$$C_e - C_r = J \frac{d\Omega}{dx} + f\Omega \quad (\text{IV } 13)$$

J : Moment d'inertie des masses tournantes.

Cr : Couple résistant imposé à l'arbre de la machine

$\Omega_r$  : Vitesse rotorique.

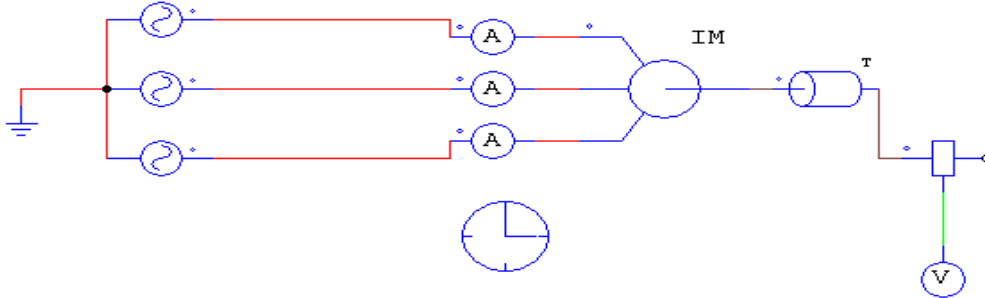
Ce : Couple électromagnétique.

f : Coefficient de frottement visqueux.

#### IV. 4 Simulation de machine asynchrone connectée à un réseau triphasé équilibré

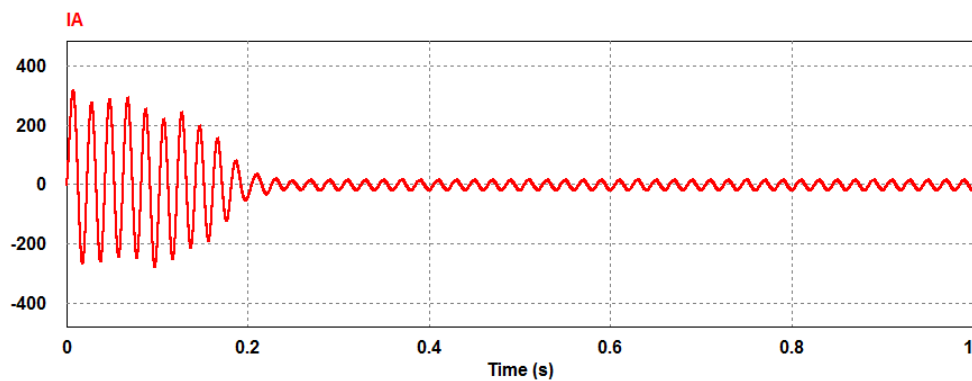
On utilise le logiciel de simulation de circuits électriques PSIM pour analyser les grandeurs électriques (tension, courant, puissances) en amont d'un moteur asynchrone connecté en direct à un réseau triphasé.

- La puissance nominale du moteur est :  $P_N = 15 \text{ kW}$  ;
- Le nombre de pôles est :  $P = 6$

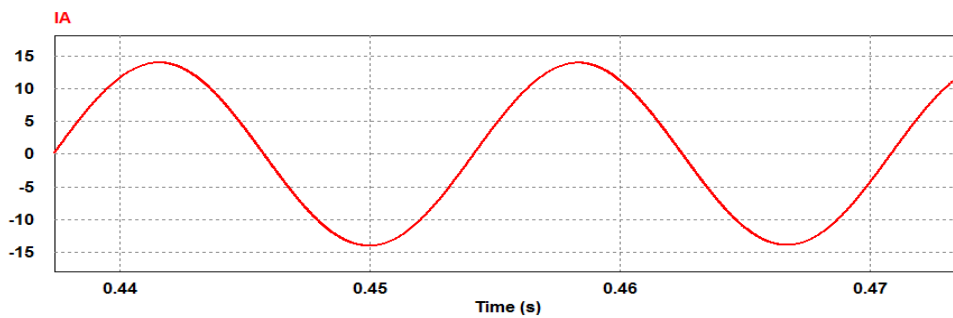


**Figure IV 2:** Schéma de simulation d'un moteur asynchrone connecté en direct à un réseau triphasé

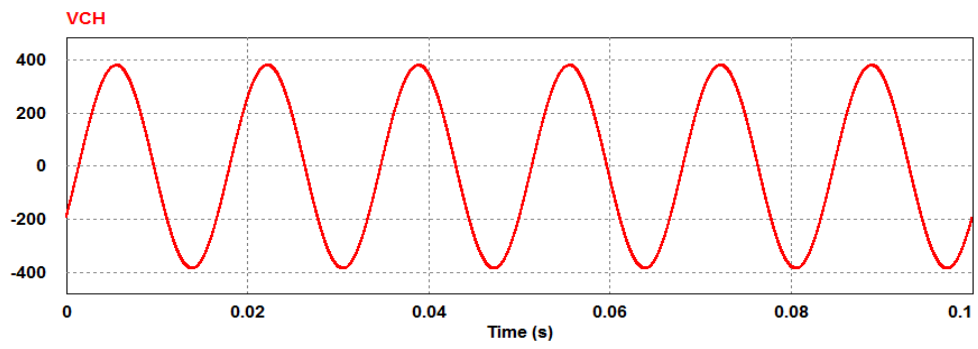
#### IV.4.a) Résultats de la simulation : pour un couple résistant $C_r = 0 \text{ Nm}$



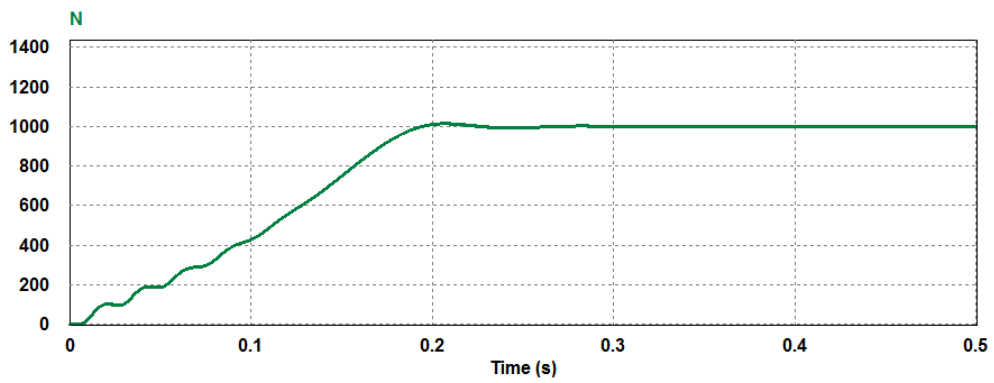
**Figure IV 3:** Courants de charge  $I_a(t)$



**Figure IV 4:** Courants de charge  $I_a(t)$  dans le régime permanent

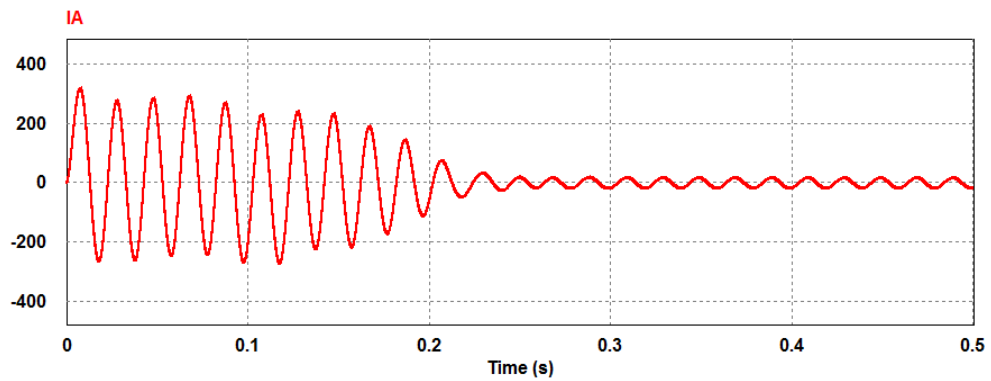


**Figure IV 5:** Tension de charge  $V(t)$



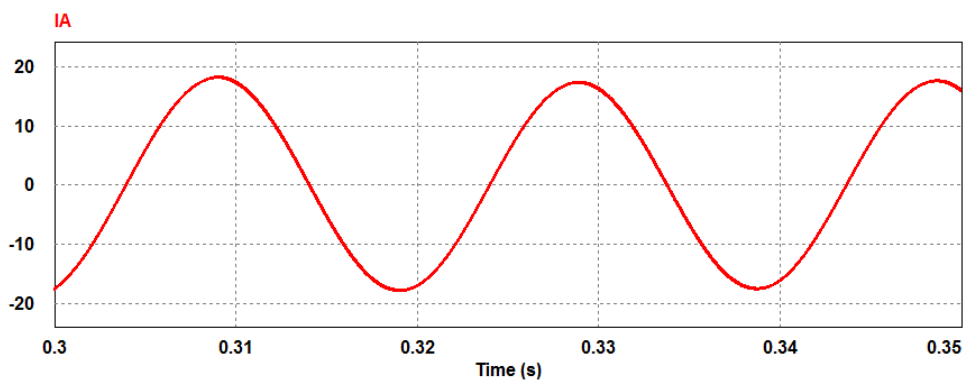
**Figure IV 6:** La vitesse de rotation.

**IV.4.b) Résultats de la simulation : pour un couple résistant  $C_r = 20 \text{ Nm}$**

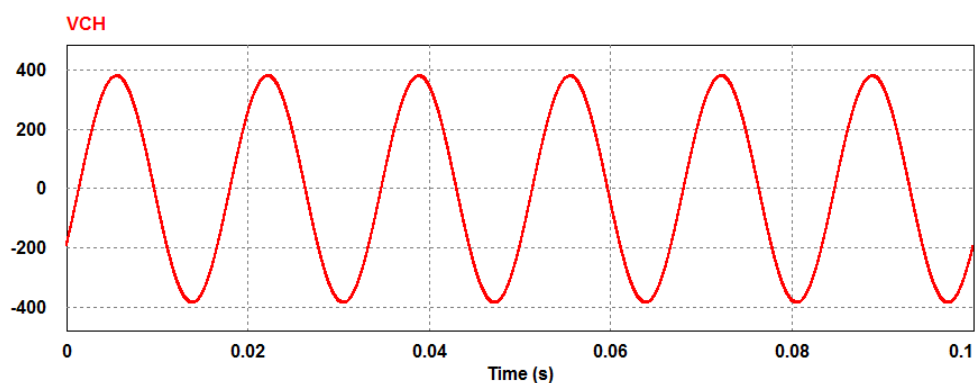


**Figure IV 7:** Courants de charge  $I_a(t)$  pour  $C_r = 20 \text{ Nm}$

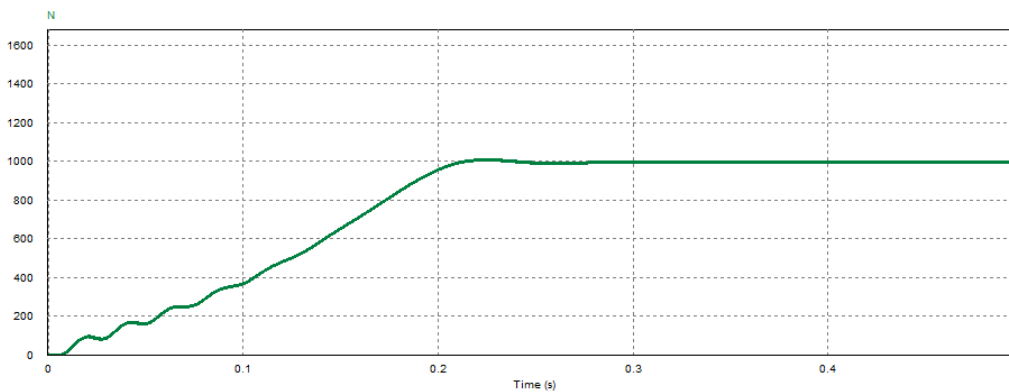




**Figure IV 8:** Courants de charge  $I_a(t)$  dans le régime permanent pour  $C_r = 20 \text{ Nm}$



**Figure IV 9:** Tension de charge  $V(t)$



**Figure IV 10:** La vitesse  $N$  de rotation de la MAS

#### IV.4.c) Interprétation des résultats:

Lors du démarrage, on constate des pics de courant importants qui s'atténuent avec l'évolution du régime transitoire.

La vitesse : En régime transitoire, on remarque un croisement linéaire de vitesse, avec une tendance à osciller à cause de l'inertie des masses tournantes et du coefficient d'amortissement du aux faibles valeurs des flux.

L'augmentation de la charge à 80 Nm fait une augmentation du courant à une valeur qui peut attendre la valeur de 38 A.

**IV.5. Simulation de la machine asynchrone à cage alimenté par un onduleur à 3 niveaux commandé par La MLI modifiée :**

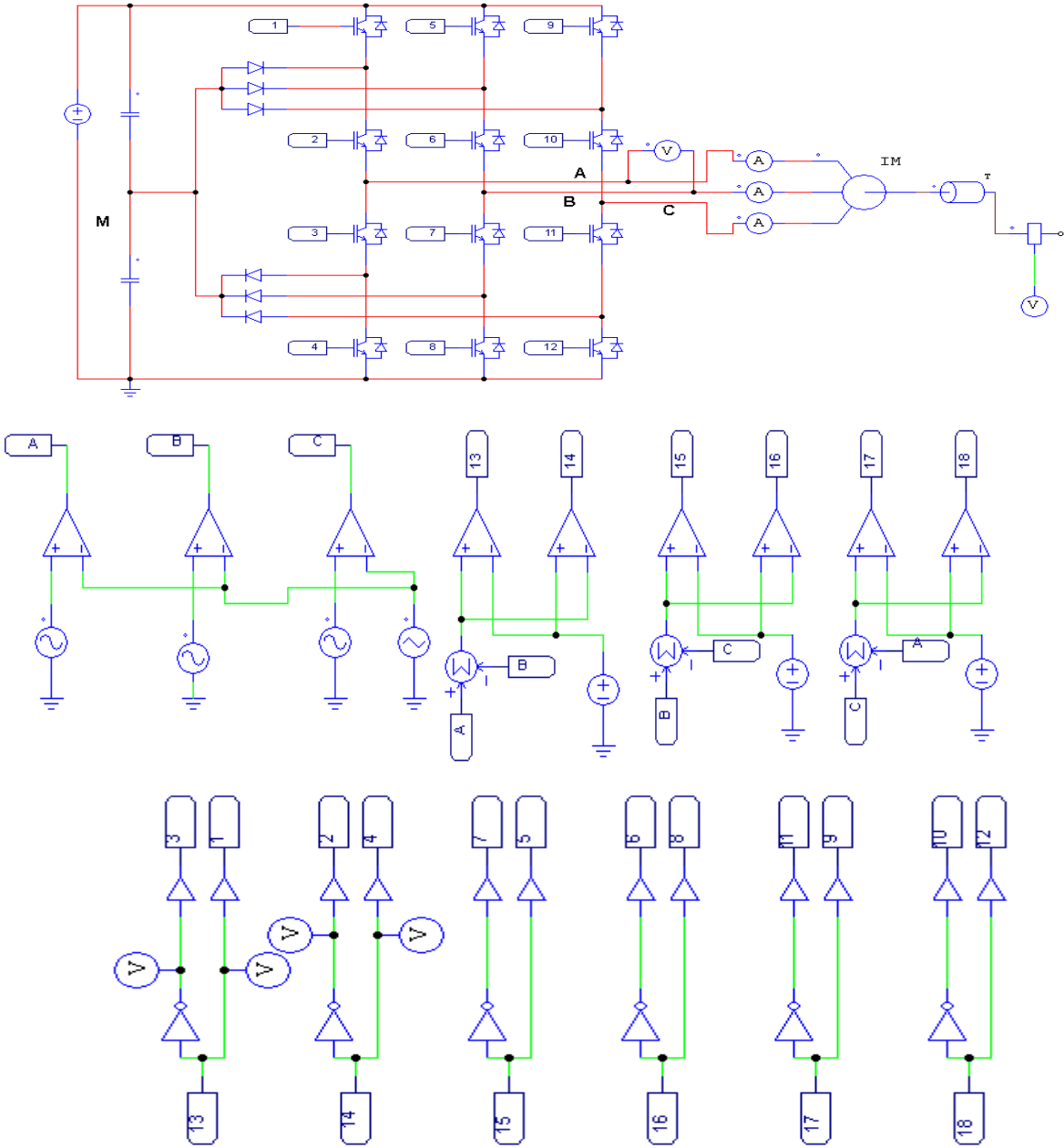
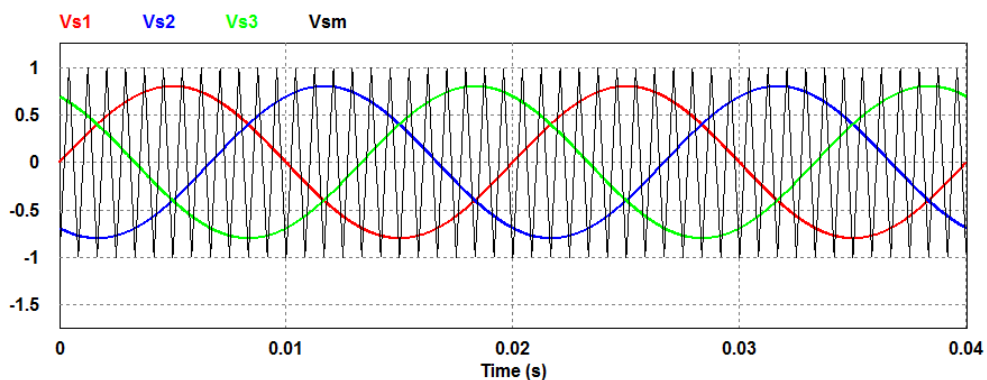
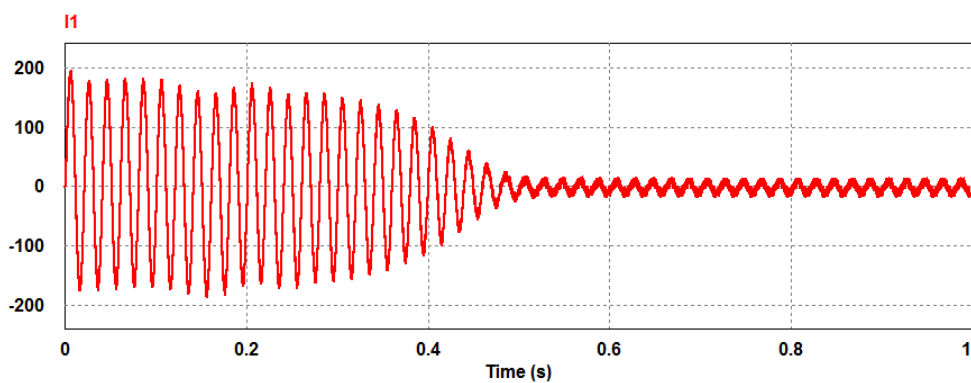


Figure IV 11 : Schéma de simulation d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur de 3 niveaux commandé par La MLI modifiée.

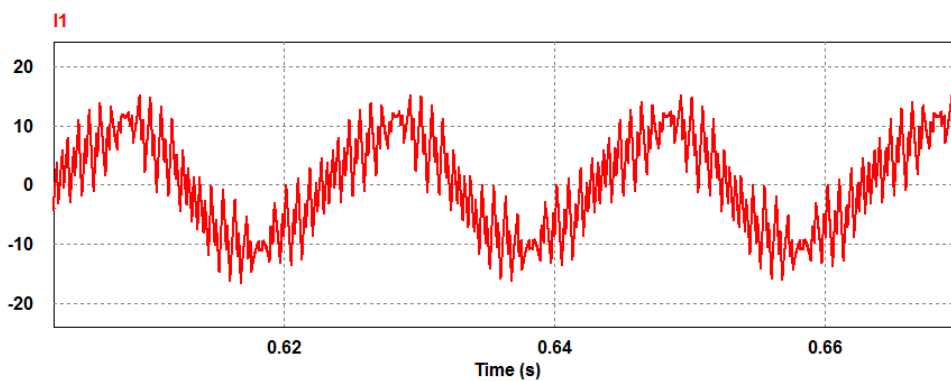
**IV.5.a) Résultat de simulation d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur à 3 niveaux commandé par La MLI modifiée : pour un couple résistant  $C_r = 0 \text{ Nm}$**



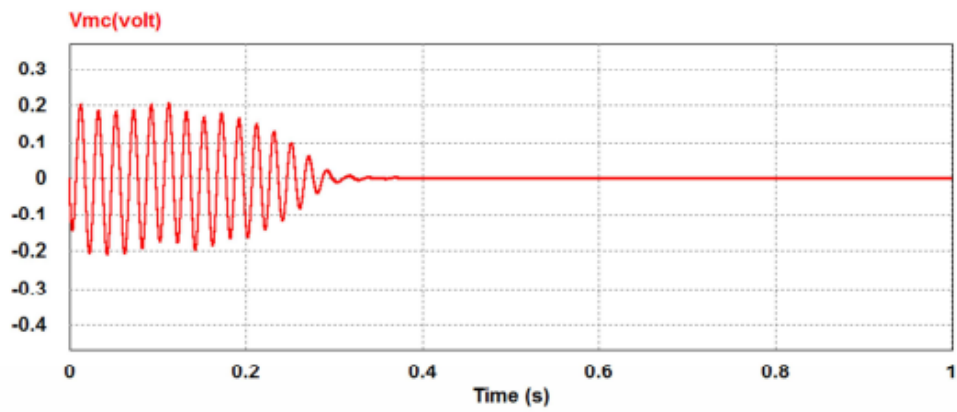
**Figure IV 12:** Les signaux de commande de l'Onduleur



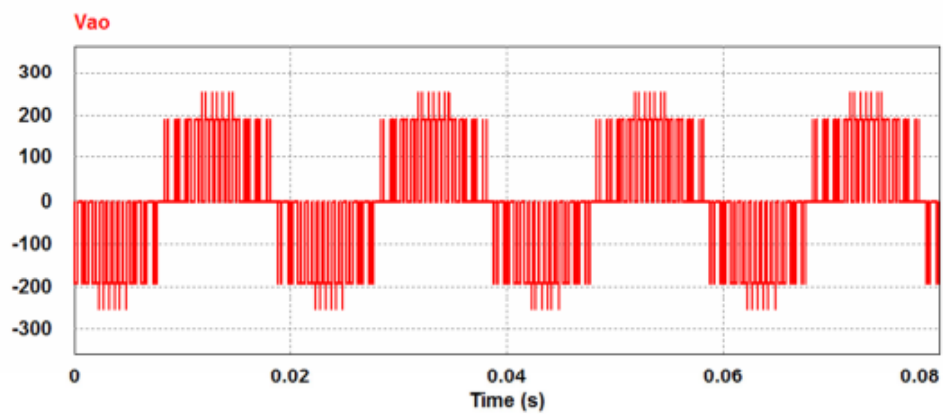
**Figure IV 13:** Le courant de la phase Ia



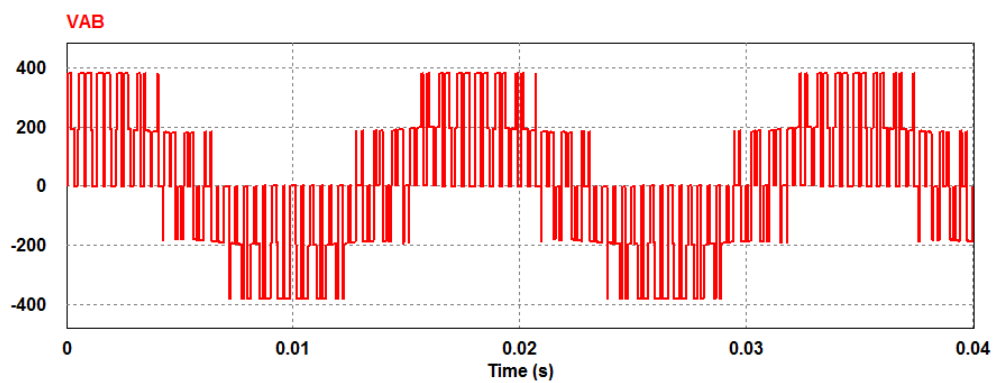
**Figure IV 14:** Courant de charge  $I_a(t)$  dans le régime permanent



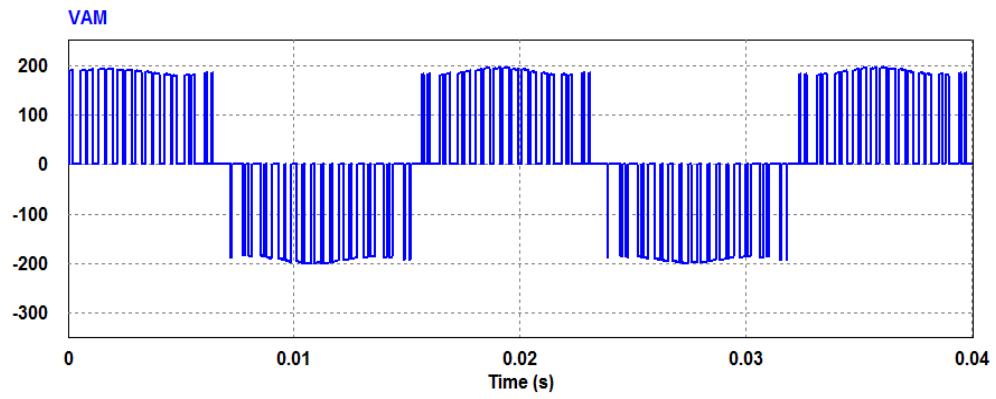
**Figure IV 15:** Tension du mode commun  $V_{mc}(t)$ .



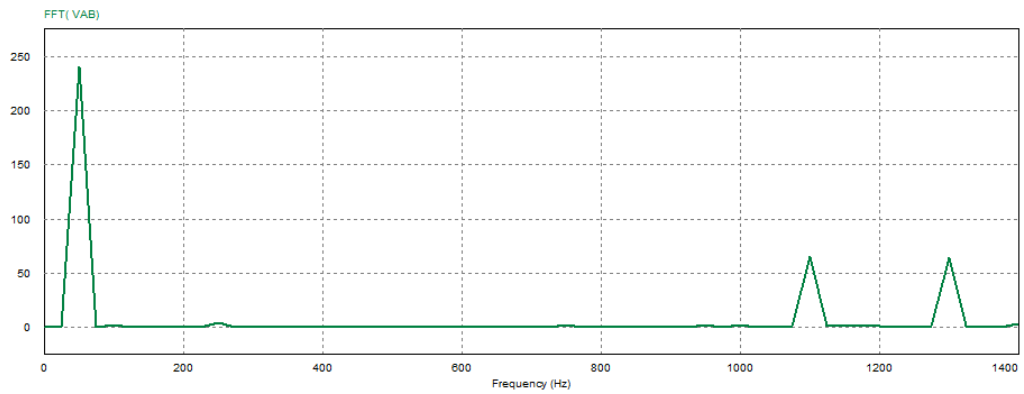
**Figure IV 16:** Tension d'une phase de l'onduleur  $V_{ao}$



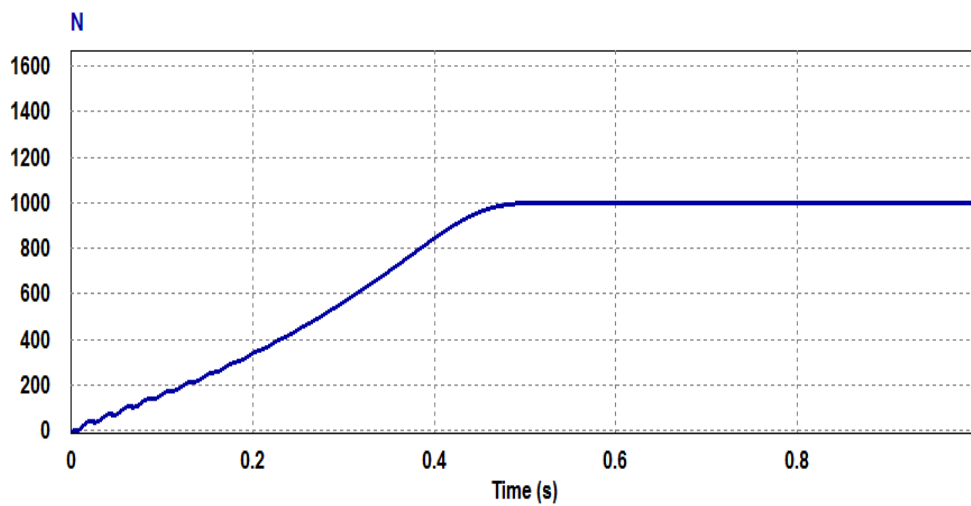
**Figure IV 17:** Tension composée de l'onduleur  $V_{ab}$



**Figure IV 18:** Tension d'une phase de l'onduleur par rapport au point neutre M,  $V_{am}$

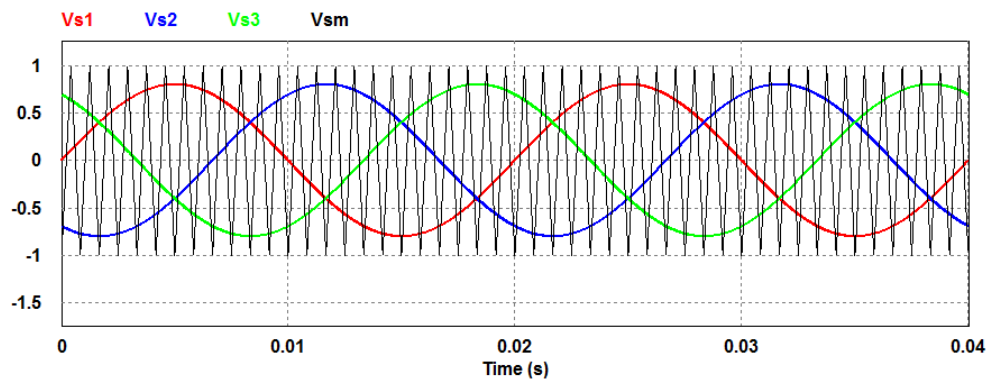


**Figure IV 19:** Spectre d'harmoniques de la tension composée  $V_{ab}$ , THD = 31.42 %

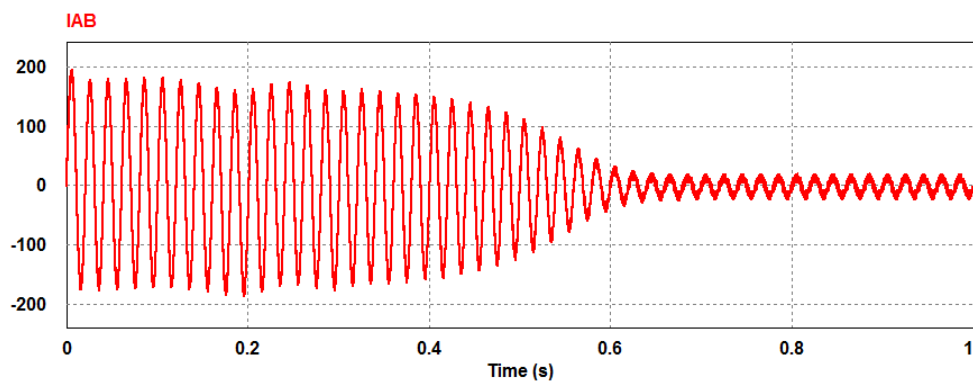


**Figure IV 20 :** La vitesse de rotation de la machine N

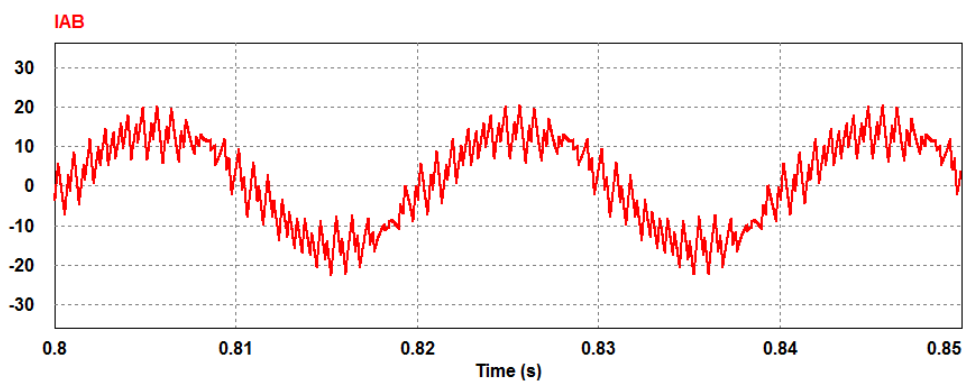
**IV.5.b) Résultat de simulation d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur à 3 niveaux commandé par La MLI modifiée : pour un couple résistant  $C_r = 20\text{Nm}$**



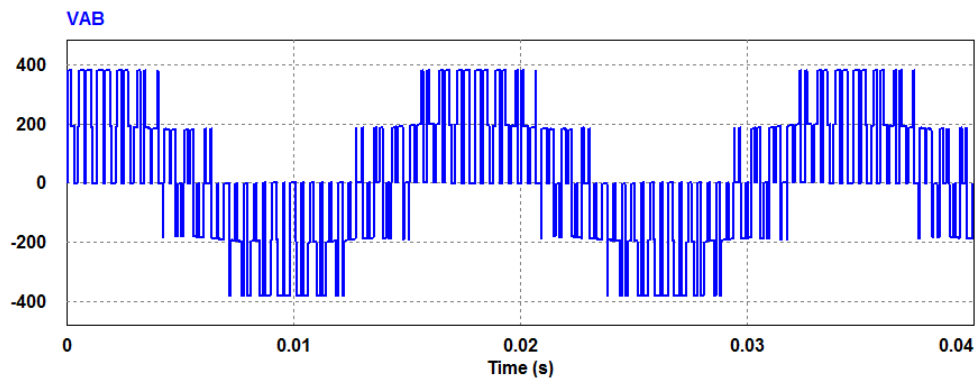
**Figure IV 21:** Les signaux de commande de l'Onduleur



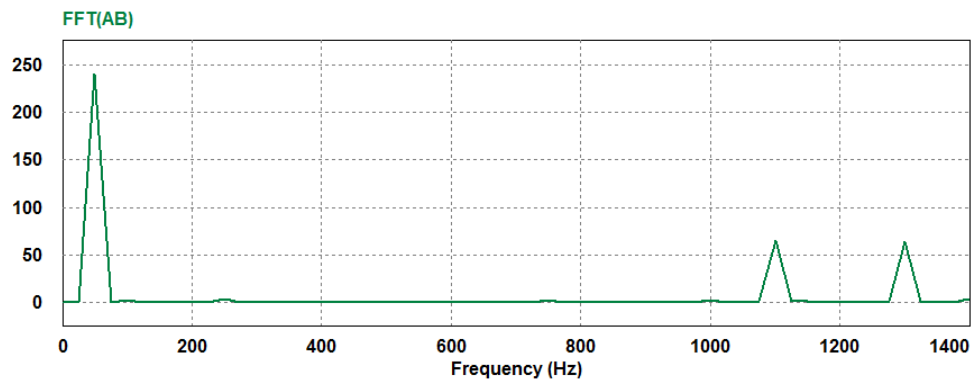
**Figure IV 22:** Le courant de la phase Ia



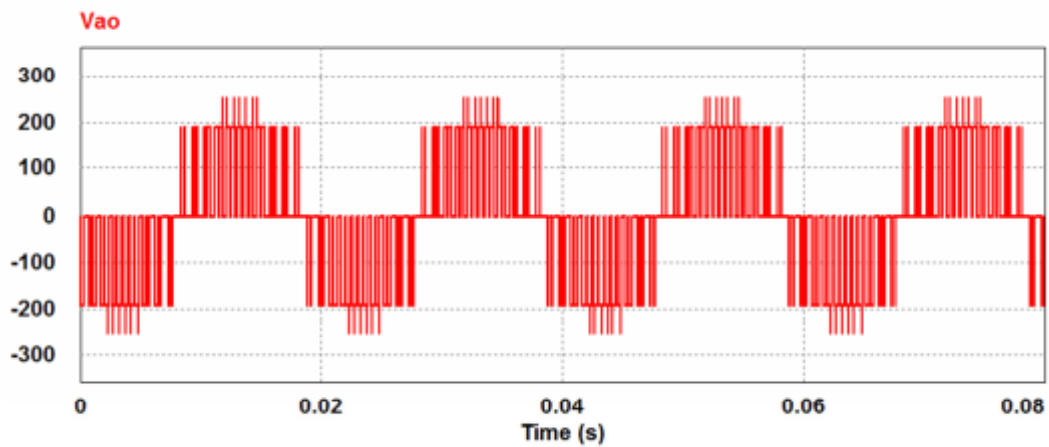
**Figure IV 23:** Courants de charge  $I_a(t)$  dans le régime permanent



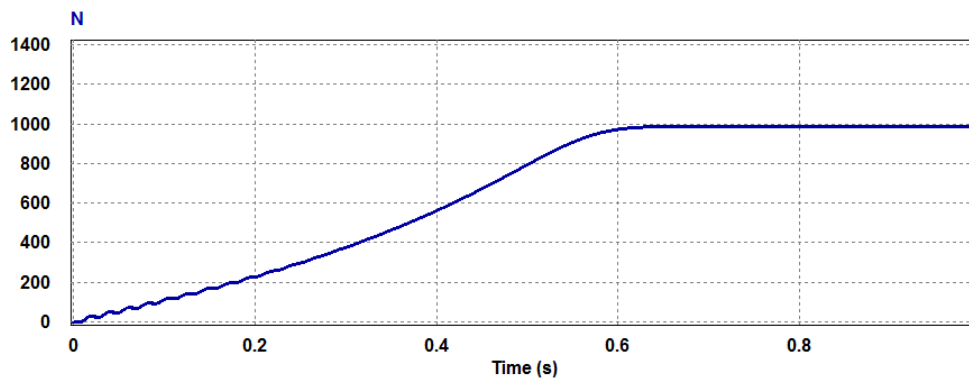
**Figure IV 24:** Tension d'une phase de l'onduleur Vab



**Figure IV 25:** Spectre d'harmoniques de la tension composée Vab, THD = 32.14%



**Figure IV 26:** Tension d'une phase de l'onduleur Vao



**Figure IV 27:** La vitesse de rotation N de la MAS

#### **IV.5.c) Interprétation des résultats**

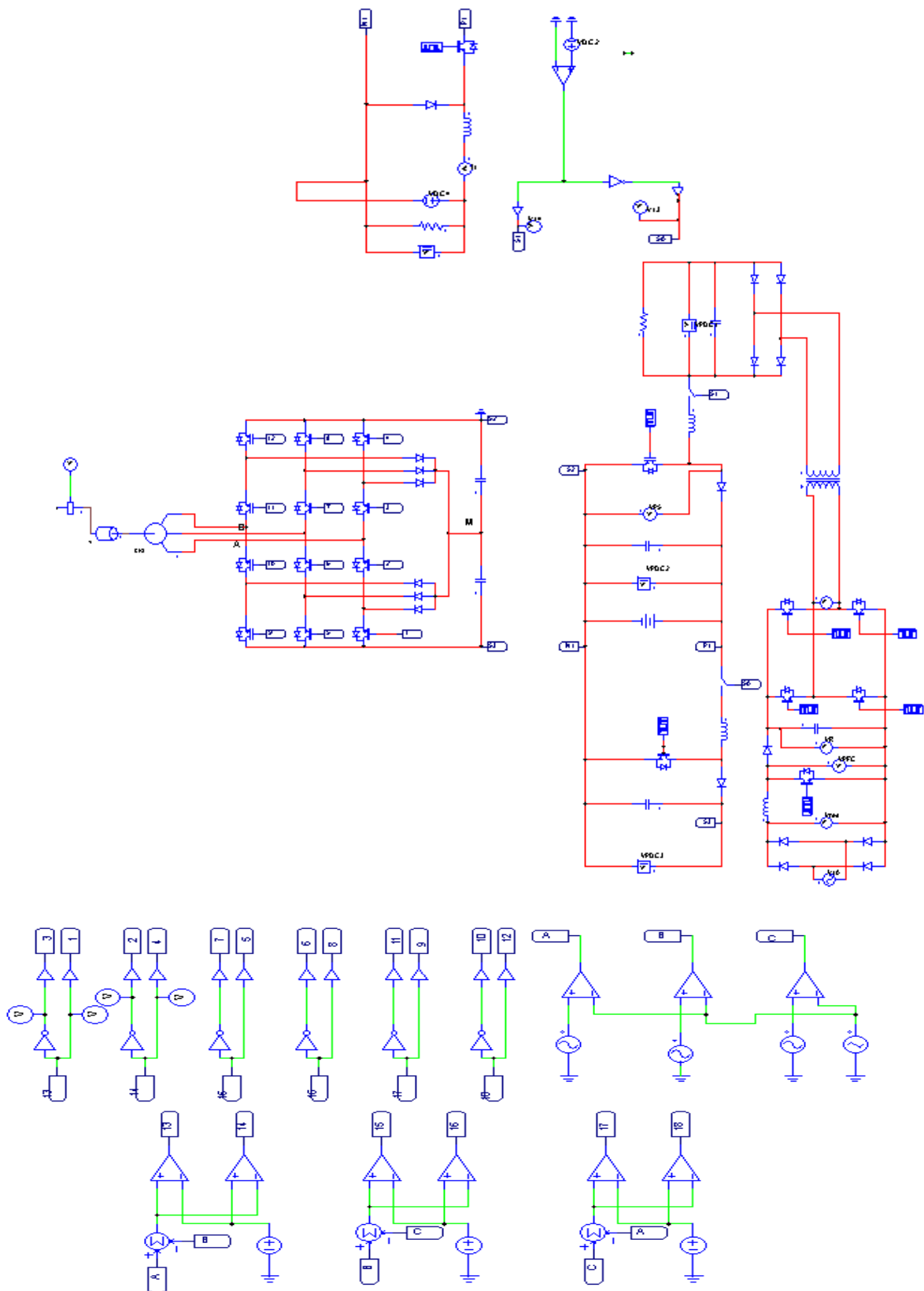
D'après les résultats de simulation de l'onduleur associé à la machine asynchrone qui ont montrés que la vitesse en régime permanent se stabilise à une valeur proche de la vitesse du synchronisme, exactement comme dans le cas de la MAS alimentée directement par le réseau triphasé.

La forme du courant est presque la même que celle dans le cas sans onduleur sauf Qu'ici les valeurs maximales ont diminué

#### **IV.6 Conclusion :**

La modélisation et la simulation de l'association onduleur multiniveaux–moteur asynchrone, confirme et valide les résultats obtenus avec l'onduleur NPC seul. Dans notre cas, l'onduleur NPC à trois niveaux et la technique MLI sinusoïdale modifiée sont encore la solution optimale pour l'élimination de la tension du mode commun ou la tension homopolaire. On peut conclure que la modulation sinusoïdale modifiée réduit efficacement le courant de fuite dans les enroulements. Elle est donc plus avantageuse par rapport aux autres techniques présentées dans chapitre trois.





**Figure IV 28:** schéma global de circuit de puissance d'un véhicule électrique

## Conclusion générale

Le travail réalisé dans ce mémoire présente une étude sur une chaîne de traction intégrée pour véhicule électrique avec des batteries rechargeable. Conscients des préoccupations environnementales, ainsi que des normes en vigueur, nous avons proposé des solutions de convertisseurs embarqués qui permettent au véhicule d'assurer un mode tout électrique en zones urbaines tout en étant rechargeable pour limiter le recours au moteur thermique lors de phases de livraison, une simple juxtaposition de convertisseurs dédiés à une tâche particulière (recharge, traction, génération de réseau de bord de puissance pour les charges électriques du véhicules. Il devient alors inévitable de concevoir des topologies de convertisseurs qui permettent de mutualiser différentes fonctions de conversion d'énergie au sein du véhicule

En effet, sur les véhicules électriques modernes, les mêmes convertisseurs, et parfois les machines électriques sont utilisées dans le mode de traction et les différents modes de recharge des batteries.

Dans Le premier chapitre, on a abordé l'historique du véhicule électrique afin de mieux comprendre son arrivée dans le marché de l'automobile. De plus, nous avons vu que les batteries représentent une de ses majeures faiblesses, plusieurs solutions furent proposées à fin d'améliorer ceci. Quelques généralités théoriques de base, dont les composantes des véhicules électriques, leurs performances, leurs avantages ainsi leurs inconvénients, sont également présentés

Le second chapitre est consacré pour les différents types de batteries utilisées dans les véhicules électriques, ainsi qu'une comparaison. Deux grandes familles de chargeurs ont été présentées ensuite afin de mettre en évidence la segmentation du marché de la recharge (chargeurs externes et embarqués). Plusieurs types de recharge peuvent être classés suivant leur durée et la puissance de la source. On a pu voir deux principaux types de chargeurs, la première catégorie concerne les chargeurs de moyenne puissance (en générale 3 kW), qui sont les chargeurs lents, le second type est réservé aux recharges de fortes puissances (supérieures à 10 kW), ils sont qualifiés de chargeurs rapides.

Le temps de recharge est directement lié à la puissance, plus la source est puissante, plus le temps de charge est réduit. Par contre, il est fortement conseillé de privilégier la recharge lente à la recharge rapide. Ces différents scénarios de recharges exigent que les structures d'électronique de puissance soient capables de s'adapter facilement à la source d'énergie disponible. Ces

différents scénarios de recharges exigent que les structures d'électronique de puissance soient capables de s'adapter facilement à la source d'énergie disponible.

Donc les résultats obtenus après plusieurs essais de simulation sous PSIM dans le chapitre trois, nous avons présenté les équations mathématiques utilisées pour la modélisation des convertisseurs utilisés dans les véhicules électriques.

On a aussi optimisé les commandes triangulo- sinusoïdale à modulation (classique, triangle multiple et modifiée) afin de déduire l'indice de modulation en fréquence qui permet d'éliminer les harmoniques multiples.

Le chapitre quatre nous a montré l'efficacité de la commande à MLI. Et nous dirons que cette dernière s'adopte mieux aux entraînements à vitesse variable, le cas des moteurs asynchrones, car elle s'intègre de façon naturelle dans le système de régulation.

Ce travail nous a permis d'élargir nos connaissances dans le domaine de l'électronique de puissance, tel que : Le comportement des semi-conducteurs, les différentes topologies des convertisseurs, ainsi que la maîtrise de l'outil de simulation Powersim pour la validation des résultats du schéma global proposé présentant le circuit de puissance du véhicule électrique.

## **Bibliographie**

### **Chapitre: 01**

[1]: Shadi Sadeghia.( Développer la mobilité électrique Des projets d'acteurs au projet de territoire ) Thèse de doctorat Université Paris-Est, France. Le 18 décembre 2013.

[2] : Ahmed NEFFATI . (Stratégies de gestion de l'énergie électrique d'un système multi-source : décision floue optimisée pour véhicule électrique hybride.) Thèse de doctorat. Université de Toulouse III France. Le 11 avril.2013

[3]: Jean Syrota, P. Hirtzman, D. Auverlot, "La voiture de demain : carburants et électricité", Centre d'analyse stratégique, Rapport & Document, juin 2011

[4]: HOUACINE Karima (COMMANDE NEURO-FLOUE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE DANS UNE CHAÎNE DE PROPULSION D'UN VÉHICULE ÉLECTRIQUE) Thèse de doctorat. UNIVERSITÉ MOULOUGD MAMMERI DE TIZI-OUZOU 2016

(6) : Ahmed Boucherit. Conception d'un convertisseur de puissance pour véhicules électriques multi- sources. Autre [cond-mat.other]. Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2011. Français. NNT: 2011BELF0171. tel-00823565

[7] : Benjamin DAGUSÉ (Modélisation analytique pour le dimensionnement par optimisation d'une machine dédiée à une chaîne de traction hybride à dominante électrique) THÈSE DE DOCTORAT. Ecole Doctorale . France . le 17 juin 2013. UNIVERSITE PARIS-SUD.

[8] :AIMAN NOUH[CONVERTISSEUR AU DEVELOPPEMENT DUN SIMULATEUR LES VHECULE ELECTRIQUE ROUIERS] THÈSE DE DOCTORAT LUNIVERSITE DE FRANCHE COMTE le 26 MARS 2008

[9] : Samantha LACROIX .[ Modélisation et commande d'une chaîne de conversion pour véhicule électrique intégrant la fonction de charge des batteries] THÈSE DE DOCTORAT. le 29/05/2013.

[10] :[https://www.autoaubaine.com/dossier-comment-ameliorer-la-duree-de-vie-de-la-batterie-de-ma-voiture-electrique\\_9002446.html](https://www.autoaubaine.com/dossier-comment-ameliorer-la-duree-de-vie-de-la-batterie-de-ma-voiture-electrique_9002446.html)

### **Chapitre: 02**

[1] : Jean Syrota, P. Hirtzman, D. Auverlot, "La voiture de demain : carburants et électricité", Centre d'analyse stratégique, Rapport & Document, juin 2011

- [2]: Jean Syrota, P. Hirtzman, D. Auverlot, "La voiture de demain : carburants et électricité", Centre d'analyse stratégique, Rapport & Document, juin 2011.
- [3]: Christelle SABER – Najib ROUHANA "Chargeurs de batteries de véhicule électrique" Culture sciences de l'ingénieur Édité le 06/04/2020
- [4] : MERFED Djamel et HAMROUN Kamal "Etude et Stratégies de Commande d'un Véhicule Hybride Série" MEMOIRE DE FIN D'ETUDES UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI OUZOU Promotion: 2012 / 2013
- [5] : Alexandre Laurent " LES DIFFÉRENTS TYPES DE BATTERIES DE VOITURES ÉLECTRIQUES " GROUPE RENAULT, N°1 DE LA MOBILITÉ ÉLECTRIQUE EN EUROPE le 18.10.2019
- [6] : <https://www.automobile-propre.com/dossiers/batteries-voitures-electriques/>
- [7] : Aurélien Etiemble " Etude de matériaux hydrurables par émission acoustique– Application aux batteries Ni-MH" École doctorale matériaux de Lyon Soutenu le 18 octobre 2013
- [8] : M. Ghellil, H. Didi, *Établissement d'un modèle de véhicule électrique*, Mémoire de master, Université Abou-Bakr-Belkaid, Tlemcen, Octobre 2014.
- [9] : Bordji Abdelmalek et Flitti Hamza "Etude et simulation des éléments de chargeurs intégrés pour véhicule électrique" Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem .MEMOIRE Présenté pour obtenir le diplôme de MASTER EN GENIE ELECTROTECHNIQUE. 2019
- [10] M. Lowe, S. Tokuoka, T. Trigg, G. Gereffi, Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles: the U.S. Value Chain, October 2010
- [11] : M.Coleman, W.G.Hurley An improved battery characterization method using a Two-Pulse Load Test, )IEEE transaction on energy conversion, June 2008
- [12]. BOUKELA Amar. AISSIOUENE Sabrina « Etude des sources d'énergies associées au véhicule électrique. » UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU. Mémoire soutenu 2018.
- [13] Moez HADJ KACEM , Souhir TOUNSI, Rfik NEJ « Utilisation des supercondensateurs et des batteries pour le stockage de l'énergie embarquée pour véhicule électrique » University of Sfax Laboratory of Electronic and Information Technology (LETI-Sfax), E.N.I.S Tunisia 2014
- [14]. <https://entretien-voiture.ooreka.fr/astuce/voir/481853/supercondensateur>
- [15]. Nassim RIZOUG: «Modélisation électrique et énergétique des supercondensateurs et méthodes de caractérisation : Application au cyclage d'un module de supercondensateurs basse tension en grande»; Thèse de Doctorat 2006 ,l'Université des Sciences et Technologies de Lille
- [16]. Guven ALCICEK « Contribution à l'étude du vieillissement et à l'intégration des supercondensateurs dans une chaîne de propulsion électrique (CPE) haute tension pour des

applications véhicule électrique » UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE BELFORT MONTBELIARD. THÈSE DOCTEUR2014

[17]. Walid LAJNEF « Modélisation des supercondensateurs et évaluation de leur vieillissement en cyclage actif à forts niveaux de courant pour des applications véhicules électriques et hybrides » L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 1 . DOCTEUR Soutenu le 5 décembre 2006

[18]. <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/pile-a-combustible>

[19]. J. Larminie et A. Dicks, Fuel Cell Systems Explained, John Wiley and Sons, Inc., New York, 2003.

[20] : A. NEFFATI, Stratégies de gestion de l'énergie électrique d'un système multi source : décision floue optimisée pour véhicule électrique hybride ; Université de Toulouse III Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier),2013

[21]: Sylvaine PIQUE « PILE À COMBUSTIBLE STATIONNAIRE : CONTEXTE REGLEMENTAIRE ET NORMATIF INTERNATIONAL ET NATIONAL RISQUES POTENTIELS » Direction des Risques Accidentels. RAPPORT D'ETUDE 31/01/2017 . N° DRA-17-156712-00653A

[22]: ZAOUZAOU Sabrina ,MEZIANI Sabrina « Etude et simulation des convertisseurs statiques existant dans un véhicule électrique » Mémoire de fin d'étude. Université Abderrahmane Mira, Bejaia 2017

[23] M.BNEALI YOUCEF « contribution à la modélisation et commande de l'ensemble convertisseur deux moteurs roues (2MSAP) pour l'entraînement de véhicule électrique » Université USTO doctorat 2020

[24]: M. NICOLAS VIDEAU « CONVERTISSEURS CONTINU-CONTINU NON ISOLEES A HAUT RAPPORT DE CONVERSION POUR PILES A COMBUSTIBLE ET ELECTROLYSEURS - APPORT DES COMPOSANTS GaN » DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE . lundi 5 mai 2014

[25]: Mamadou Baldém, Comparative "Study of NPC and Cascaded Converters Topologies", International Conference on Renewable Energies and Power Las Palmas de Gran Canaria (Spain), 13th to 15th April, 2011

[26]: Benghanem M. " Etude et Commande Numérique d'un STATCOM à base d'onduleurs Multi- niveaux", Phd Thèse 2006, USTOran

### **Chapitre: 03**

[1] Arnaud Videt, " Variateur de vitesse à impact électromagnétique réduit : onduleur multiniveaux et nouvelles stratégies de modulation", Ph.D Thesis, Ecole Centrale de Lille, 2008.

[2] M. Benghanem, '(Etude et Analyse D'un Onduleur à Trois Niveaux Utilisé Comme Compensateur Statique D'énergie Réactive), USTOMB, Thèse De Magister 2001

[3] YAKOUB KHADIDJA ( Réduction des effets de la tension homopolaire dans les associations onduleur multiniveaux-moteur à induction) UNIVERSITE DE BATNA.DIPLOME MAGISTER 2005.

#### **Chapitre: 04**

[1]: Mr. MOKHTARI Raouf: (Étude et simulation d'un moteur asynchrone). M'sila2004/2005 ingénieur d'état en génie électrotechniqu

[2] MESSOUCI Ourdia (COMMANDE SANS CAPTEUR D'UNE MACHINE ASYNCHRONE A CAGE : Application sur la plateforme temps réel NI CompactRIO cRIO 9022) UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES, Année Universitaire : 2014/2015

[3] : GueddaSmail , Alia Salim (Commande Vectorielle d'une Machine à Induction)

Université EchahidHamma Lakhdar d'El-Oued , MASTER ACADEMIQUE, Mai 2018