

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electrotechnique
Spécialité : Energie et Environnement

Présenté par : BENHADJER Abdeslam

Thème

**Etude, simulation et réalisation d'un onduleur
triphase pour les trains électro-diesel**

Soutenu publiquement, le 09/07/2019 , devant le jury composé de :

Dr BOUKLI HACENE Fouad	MCA	ESSA Tlemcen	Président
Dr BRAHAMI Mostefa	Professeur	UDL Sidi Bel Abbas	Encadrant
Dr BOUSMAHA Imen	MAB	ESSA Tlemcen	Co-Encadrante
Dr KERBOUA Abdelfettah	MCB	ESSA Tlemcen	Examineur 1
Dr SARI Zaki	Professeur	UAB Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire : 2018 / 2019



Remerciement

En préambule à ce mémoire

Je remercie ALLAH qui m'aide et me donne la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

Mes vifs remerciements s'accordent à mon Encadrant Pr BRAHAMI Mostefa, et le co-encadrante Mme BOUSMAHA Imen leurs disponibilités et leurs conseils tout au long de ce projet de fin d'études.

Ma gratitude va aussi aux membres du jury qui ont accepté de juger mon travail.

Je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements aux personnes du laboratoire Intelligent Control and Electrical Power Systems (ICEPS) qui m'ont aidé et contribué à la préparation de cette mémoire et au succès de cette merveilleuse année universitaire. Je voudrais remercier sincèrement Mr BENCHÉKIR Seyf Eddine, Mr HALLOUCH Omar, Mr ATTOU Nasr-Eddine et Mlle BOUDJELLA Fatima Zohra.

Enfin, j'aimerais exprimer mes sincères remerciements à toute ma famille et à tous mes amis, qui m'ont toujours soutenu et encouragé durant la préparation de ce mémoire.

Merci à tous !





Dédicace

Avec un grand bonheur et un grand plaisir que je tiens à dédier ce modeste travail à :

***Mes parents** en signe de profondeur et affectueuse reconnaissance pour tous leurs sacrifices qu'ils ont bien consenti pour moi et que ce travail soit pour eux un témoignage de ma grande affection.*

*Spécialement à Mon frère **Zakaria** qui a toujours été très prêt pour me soutenir et encourager à terminer mes études*

*Pour mes frères : **Younes, Saadeddine, Khaled, Adnan et Mohamed**, toutes mes sœurs et ma grande mère puisse Allah la bienheureuse.*

A mes collègues, à mes amis et à tous ceux qui ont partagé avec moi de beaux moments de ma vie

*A mes professeurs pour m'avoir fourni toutes les connaissances requises
Ce modeste travail est pour vous.*

BENHADJER Abdeslam



Liste d'abréviations

Liste d'abréviations

AC : Alternative Courant

DC : Direct Courant

SNCF : Société Nationale des Chemins de Fer Algériens

SNTF : Société Nationale des Transport ferroviaires

EPIC : Etablissement Public à caractère Industriel et Commercial

SLR : Système Léger sur Rail

TGV : Train à Grande Vitesse

TRN : TRains Nationaux

TER : Trains Express Régionaux

GRTE : Gestionnaire du Réseau de Transport de l'Electricité

IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor

IGCT: integrated gate-commutated thyristor

GTO: Gate Turn Off

THT: Très Haute Tension

PD : Parallèle double

PDq : montage Parallèle double

Sq : montage Série

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsions

SHE : Selective Harmonic Elimination

MAS : Machine Asynchrone

PWM : Pulse Width Modulation

THD : Total Harmonic Distortion

Table de matières

Table des matières

Remerciement

Dédicace

Liste d'abréviations

Introduction générale1

Chapitre 1 : Généralités sur les trains électro-diesel

1.1.	Introduction.....	4
1.2.	Historique des trains.....	4
1.2.1.	Historique mondiale	4
1.2.2.	Chemin de fer en Algérie.....	5
1.2.3.	SNTF.....	6
1.3.	Train diesel (traction à combustion interne).....	7
1.4.	Tains électriques.....	8
1.4.1.	Tramways	8
1.4.2.	Métros.....	9
1.4.3.	Train à grande vitesse (TGV).....	10
1.4.4.	Train CORADIA	10
1.5.	Train électro-diesel.....	11
1.5.1.	L'intérêt de l'hybridation	12
1.5.2.	Éléments de suspension	12
1.5.3.	Bogies.....	14
1.5.4.	Essieux montés et roulements	15
1.5.5.	Couplage	16
1.5.6.	Matériel roulant de traction.....	16
1.5.7.	Fonctionnement.....	19
1.6.	Entraînements électriques pour les applications de traction.....	19
1.7.	Évolution des schémas de puissance en traction électrique	22
1.8.	Alimentation électrique	24
1.8.1.	Sous-station.....	25

1.8.2. Caténares	25
1.8.3. Pantographe.....	25
1.9. Conclusion.....	26

Chapitre 2 : Techniques de commande des onduleurs triphasés

2.1. Introduction.....	28
2.2. Conversion continu/alternatif (Onduleur).....	29
2.3. Types d'onduleurs.....	30
2.4. Classification	30
2.4.1. Onduleur autonome	30
2.4.2. Onduleur non autonome	30
2.4.3. Domaine d'application	30
2.5. Onduleur de tension triphasé	31
2.5.1. Harmonique généré par les onduleurs (Distorsion d'harmonique total THD)	33
2.5.2. Techniques de commande de l'onduleur	33
2.6. Techniques de commandes appliquées à la commande d'onduleurs	34
2.6.1. Commande symétrique.....	34
2.6.2. Commande décalée.....	35
2.6.3. Commande MLI sinus-triangle.....	35
2.6.4. MLI à angles pré-calculés (MLI sélective)	36
2.6.4.1. Principe de la MLI pré-calculée.....	37
2.6.4.2. Application de la méthode de Newton Raphson pour le calcul des angles de commutation	40
2.6.4.3. Avantage de la MLI calculée	42
2.6.4.4. Intérêt de la méthode de Newton-Raphson	42
2.7. Conclusion.....	43

Chapitre 3 : Simulation des commandes de l'onduleur triphasé

3.1.	Introduction.....	45
3.2.	Simulation sur MATLAB Simulink	45
3.2.1.	Commande symétrique d'un onduleur triphasé.....	46
3.2.2.	Commande décalée d'un onduleur triphasé.....	48
3.2.3.	Commande MLI sinus-triangle.....	50
3.2.4.	Commande MLI pré-calculée.....	54
3.3.	Simulation sur ISIS Proteus.....	63
3.3.1.	Onduleur triphasé sur ISIS Proteus	63
3.4.	Conclusion.....	65

Chapitre 4 : Essais et réalisations

4.1.	Introduction.....	67
4.2.	Réalisation des circuits sur plaque d'essai.....	67
4.2.1.	Composants utilisés	68
4.2.2.	Plaque d'essai	71
4.2.3.	Résultats d'essai	72
4.3.	Réalisation du circuit imprimé.....	73
4.3.1.	Tracé du circuit avec logiciel EAGLE	73
4.3.2.	Transfert du circuit sur la plaque du cuivre	77
4.4.	Résultats des circuits imprimés.....	80
4.4.1.	Essai de la commande MLI sinus-triangle.....	81
4.4.2.	Essai de la commande MLI pré-calculée (7 angles).....	83
4.5.	Conclusion.....	85
	Conclusion générale	87
	Bibliographie	89

Résumé

Introduction Générale

Introduction générale

Les transports algériens ont consenti un effort extraordinaire au cours de la dernière décennie pour développer de grands projets d'infrastructures et d'équipements publics, notamment dans le domaine ferroviaire. Pour faire face à ces défis, la politique des transports privilégiée par le secteur devait intégrer tous les modes de transport pour générer des synergies et renforcer la contribution des transports au développement de l'économie nationale et s'inscrire dans un plan national des transports à court, moyen et long terme où la transition des locomotives à vapeur vers l'électrification se fait du côté rural et du côté urbain du métro et tramway d'Alger.

Une des applications industrielles en plein essor est l'alimentation des moteurs électriques, par variateur de vitesse, grâce à l'utilisation des convertisseurs de l'électronique de puissance. Un variateur permet d'asservir le couple ou la vitesse des machines tournantes, tout en ayant un très bon rendement.

Les convertisseurs d'un variateur de vitesse relient une source électrique alternative (monophasée ou triphasée) à un moteur (le plus souvent alternatif) par l'intermédiaire d'un dispositif de filtrage situé de part et d'autre du convertisseur. Ces variateurs sont conçus autour d'une même architecture.

Il existe plusieurs topologies de convertisseurs. La première famille assure une conversion alternatif-continu suivie d'une conversion continu-alternatif (AC/DC/AC). C'est celle qui est actuellement la plus répandue dans l'industrie. La seconde famille assure une conversion directe alternatif-alternatif (AC/AC). Cette conversion directe peut être assurée, soit par des cycloconvertisseurs, soit par des convertisseurs matriciels. On écartera de cette étude les cycloconvertisseurs, qui sont utilisés pour des applications de très forte puissance (>10MW).

Ce mémoire s'intéresse à la conversion indirecte AC/DC/AC entre un réseau alternatif triphasé et une machine triphasée asynchrone à l'aide des convertisseurs statiques pour varier la vitesse de la machine asynchrone.

Le premier chapitre présente des généralités sur le train électro-diesel ainsi que l'historique de développement d'électrification des locomotives électriques et divers systèmes d'installation et les équipements nécessaires utilisés sont également cités.

Le traitement d'énergie électrique et l'étude de changement de forme et type de tension en utilisant ce dispositif électronique : onduleur ; avec les commandes convenables (symétrique, décalée, MLI sinus-triangle et SHE) sont présentés au deuxième chapitre.

Au chapitre trois, on présente les différentes simulations sur Simulink et ISIS Proteus de convertisseur onduleur équipant les locomotives électro-diesel. On a simulé le

fonctionnement d'onduleur avec différentes commandes des interrupteurs. Les résultats de simulation montrent un bon fonctionnement de ce convertisseur.

Fort des résultats de simulation, l'étape de réalisation est entamée. Après tests sur plaques d'essais les circuits de routage d'onduleur triphasé est développé sur logiciel EAGLE. L'insertion, soudure et câblage et tests des cartes des différents convertisseurs sont réalisés. Tout ceci est développé au chapitre quatre.

CHAPITRE 1

Généralités sur les trains électro-diesel

Chapitre 1 : Généralités sur les trains électro-diesel

1.1. Introduction

Le transport ferroviaire est devenu l'un des modes de transport les plus fiables en termes de sécurité. Les trains circulent rapidement et sont les moins affectés par les turbulences météorologiques habituelles comme la pluie ou le brouillard, comparativement aux autres mécanismes de transport. Il est cependant le mieux organisé que tout autre moyen de transport. Il a des trajets et des horaires fixes. Ses services sont plus sûrs, plus uniformes et plus réguliers par rapport aux autres modes de transport. Le transport ferroviaire provient d'engins tractés par l'homme en Grèce antique. Aujourd'hui, il est devenu un système moderne, complexe et sophistiqué utilisé à la fois dans les réseaux urbains et continentaux sur de longues distances.

Un système d'électrification ferroviaire est appelé à fournir de l'énergie électrique aux trains, aux métros et aux tramways qui ne possèdent pas un approvisionnement local en carburant. En revanche, ils utilisent un moteur électrique garantissant leur propulsion. L'électrification présente de nombreux avantages, mais elle nécessite un large investissement au départ. La sélection d'un système d'électrification est basée sur l'économie de l'approvisionnement en énergie, de l'entretien et du coût initial par rapport aux revenus obtenus du trafic (marchandises et passagers). Différents systèmes sont utilisés pour les zones urbaines et interurbaines, alors certaines locomotives électriques peuvent passer à des tensions d'alimentation différentes pour assurer une exploitation flexible.[1]

Quelques lignes ferroviaires électrifiées possèdent leurs propres moyens de production et de transport de l'énergie électrique, mais la plupart entre eux sont raccordées à un ou plusieurs fournisseurs d'énergie. Généralement, le chemin de fer se charge des infrastructures de distribution (lignes, transformateurs, appareillages de manœuvres et de production...).

1.2. Historique des trains

1.2.1. Historique mondiale

La 1ère locomotive à vapeur fut construite en Grande-Bretagne en 1804 par le britannique Richard Trevithick, elle peut tirer 20 tonnes de wagons et atteint la vitesse de 8km/h.

Le train débarque en France, en 1829 George Stephenson utilisa une chaudière tubulaire sur sa locomotive à vapeur fusée ; ce fut la première locomotive qui fut mise en

service pour transporter les passagers du fret. Elle pouvait tirer une charge de près de 13 tonnes à environ 24 km/h.

En 1850, le réseau mondial s'étend sur 38000 Kilomètres ; un demi-siècle après il en comptera 800 000 Km.[2]

1.2.2. Chemin de fer en Algérie

Par décret impérial du 8 avril 1857, la force d'occupation française a décidé la création d'un réseau de chemin de fer en Algérie visant à mailler tout le nord du pays avec le double objectif de l'utiliser comme un outil logistique de pacification des territoires et un moyen de transfert des richesses algériennes vers la métropole. Durant la période coloniale, La réalisation du réseau de chemin de fer algérien s'est faite par étapes successives.

Trois programmes ont été initiés par l'administration :

- Programme de 1857

Le 8 Avril 1857, la force d'occupation française autorise la construction de 1357 km de lignes dans le territoire algérien. Le 12 Décembre 1859, le chantier de la ligne Alger-Blida fût ouvert. Une entreprise de statut privé, appelée "Compagnie des chemins de fer algériens" est créée. Cette compagnie obtient en plus de la réalisation de la ligne Alger-Blida, une concession pour la réalisation des lignes Oran-Sig et Constantine-Skikda, qui n'ont pas été réalisées faute de financement. Seule la ligne Alger-Blida a pu être réalisée et ouverte au service voyageur le 8 Septembre 1862.

- Programme de 1879

Un programme de 1747 km de lignes nouvelles a été ajouté au réseau existant. Dans la période 1879-1906, 2035 km de lignes ont été réalisées ou entamées (Souk Ahras-Tébessa, Sétif-Thénia avec embranchements vers Tizi-Ouzou, Béjaia et Sour El Ghozlane, Blida-Berrouaghia, Oran-Arzew, Sidi Bel Abbès-Tlemcen-Frontière...).

- Programme de 1907

En 1907, un troisième programme de nouvelles lignes portant sur 1256 km est établi et vient s'ajouter au réseau existant. Au cours de la période 1907-1946, les lignes ou tronçons de lignes suivants, totalisant une longueur de 1614 km, ont été réalisés.

Le 1er Janvier 1939, est institué un Office des Chemins de fer Algériens (Office CFA). En 1946, le réseau algérien comprend 5014 km de lignes en exploitation sans compter les embranchements miniers et les lignes de chemin de fer sur routes.

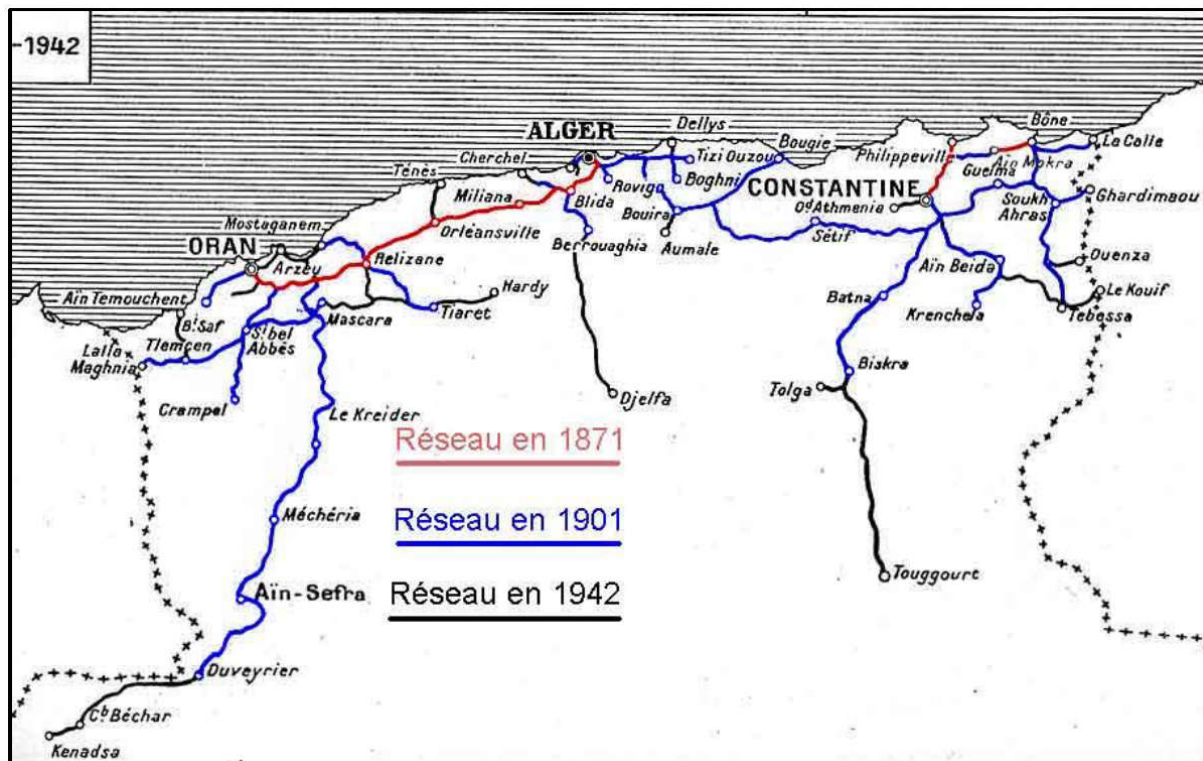


Figure 1.1 : Carte des chemins de fer d'Algérie de l'époque coloniale [3]

Le 1er Janvier 1960, est créée une Société des Chemins de Fer Français en Algérie régie par la convention du Juin 1959. La Société Nationale des Chemins de Fer Algériens (SNCFA).

Après l'indépendance, la Convention de Juin 1959 continua à régir les relations entre l'Etat et la SNCFA jusqu'à 1976, date à laquelle est créée : la Société Nationale des Transports Ferroviaires (SNTF). [3]

1.2.3. SNTF

La Société Nationale des Transports Ferroviaires a été restructurée en trois entreprises :

- Société nationale chargée de l'exploitation et de l'entretien du réseau ferroviaire (La SNTF)
- Société nationale chargée du renouvellement et de l'extension du réseau ferroviaire (La SNERIF)
- Société d'engineering et de réalisation d'infrastructures ferroviaires (La SIF)

Cette réorganisation avait pour objectif de séparer les activités d'exploitation et d'entretien de celles du renouvellement et l'extension du réseau. Cette expérience n'a pas atteint les objectifs attendus.

Une convention définissant les responsabilités respectives de l'état et de la SNTF a été instituée par un décret le 28 juin 1988. Cette convention reprend certaines dispositions de l'ancienne convention de juin 1959 concernant l'infrastructure et la compensation de service public. Au cours de cette période, un large programme

d'investissement a été lancé. Il se caractérise surtout par la modernisation et l'accroissement de la capacité des lignes du réseau, les grands aménagements ferroviaires régionaux et l'extension géographique du réseau.

Ce programme a permis les réalisations suivantes :

- Nouvelles lignes
- Renouvellement complet (voie et ballast) d'une grande partie du réseau soit un total de 1400 km de voie.
- Mise à double voie de tronçons de la rocade nord (200 km).
- Aménagement, modernisation et reconstruction des gares réparties sur le réseau.
- Aménagement ferroviaire des régions d'Annaba et d'Alger (partiellement).

En 1990, la SNTF change de statut et devient un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC) par un décret sorti le 1er Décembre 1990, sous tutelle du Ministère des Transports.

Dès 1999, une attention particulière a été accordée au secteur ferroviaire par les pouvoirs publics. De nombreux programmes d'investissements ont été inscrits et lancés depuis, notamment ceux de 1999-2005, 2005-2009 et 2009-2014.

L'ensemble de ces programmes vise le développement et la modernisation du réseau existant. Par la décision du 23 Mai 2007, une nouvelle organisation est adoptée au sein de la SNTF ; visant à répondre aux implications de la création de l'Agence Nationale d'Etudes et Suivi de la Réalisation des Investissements Ferroviaires (ANESRIF). Cette réorganisation permettra à la SNTF de se recentrer sur ses métiers de base qui sont le transport de voyageurs et de marchandises. Maintenant, le réseau des chemins de fer s'étend sur 4498 KM, et couvre 30 wilayas. Il est aujourd'hui parmi les plus modernes d'Afrique. Il sert au transport de personnes et de marchandises. L'ambition des pouvoirs publics est de connecter toutes les villes d'Algérie entre elles par le réseau ferroviaire.

Le parc roulant de la SNTF se composait de :

- 14 locomotives électriques.
- 154 locomotives diesels.
- 59 locomotives de manœuvre.
- 674 voitures.
- 13 000 wagons tous types
- 17 Autorail diesel hydraulique (CAF)
- 64 Rames Automotrices électrique 25 KV/CA monophasé (STADLER).[3]

1.3. Train diesel (traction à combustion interne)

La traction par moteur Diesel n'a cessé de progresser depuis 1925. Les locomotives diesel utilisent des moteurs à combustion interne ; cette combustion aura lieu à l'intérieur du moteur lui-même dans des cylindres fermés contenant des pistons. Le déplacement alternatif de ces derniers produit la rotation d'un arbre par l'intermédiaire d'une bielle et une manivelle (vilebrequin) en obtenant un mouvement rotatif. Ce mouvement se

transfert vers les roues motrices par un mécanisme (boîte à vitesse) donnant alors la traction du train diesel.[4]



Figure 1.2 : Locomotives diesel

1.4. Tains électriques

Il existe des trains électriques de différents types. La puissance de leurs moteurs et le mode d'alimentation diffère suivant leurs zones d'exploitation et leurs types d'application. On cite parmi eux les plus fréquents au monde de nos jours :

1.4.1. Tramways

Ce sont des systèmes de transport à basse vitesse, avec un profil d'exploitation moins exigeant et avec des véhicules plus légers. On pourrait dire que la tension d'alimentation est toujours en CC et que le niveau de tension peut prendre différentes valeurs comprises entre 500 et 750 V. La puissance installée correspond à peine à la puissance nominale d'un ou de quelques véhicules dans une section d'alimentation et correspond donc à quelques centaines de kW/km. De plus, les véhicules sont souvent équipés des systèmes de freinage récupératif. [5]



© RATP - Photo Jean-François Mauboussin

10816d081 - Métro d'Alger - 23/10/2011

Figure 1.3 : Tramway d'Alger

1.4.2. Métros

Avec plusieurs caractéristiques communes aux SLR, avec des arrêts plus fréquents et des profils de vitesse plus raides. Ils sont toujours intégrés dans les zones urbaines et pour cette raison, ils disposent d'une structure maillée, avec plusieurs lignes d'alimentation bouclées et de grands courants de court-circuit. L'intervalle de passage peut être très serré, selon les solutions mises en œuvre, de plusieurs minutes à 120 secondes pour la plupart des lignes modernes dans les grandes villes, voire 90 secondes pendant les heures de pointe. Cela détermine la marge de la puissance installée, qui peut être supérieure à celle d'un train léger environ un MW/km. [5]

**Figure 1.4 : Métro d'Alger**

1.4.3. Train à grande vitesse (TGV)

C'est un type de transport ferroviaire qui fonctionne beaucoup plus vite que le trafic ferroviaire traditionnel, en utilisant un système intégré de matériel roulant spécialisé et de voies dédiées. Bien qu'il n'existe pas de norme unique à l'échelle mondiale, les nouvelles lignes de plus de 250 km/h et les lignes existantes de plus de 200 km/h sont largement considérées comme étant à grande vitesse. On peut étendre la définition pour inclure des vitesses beaucoup plus faibles (par exemple, 160 km/h) dans des zones pour lesquelles ces vitesses représentent encore des améliorations significatives. [5]



Figure 1.5 : Train à grande vitesse au Maroc

1.4.4. Train CORADIA

Le Train Coradia polyvalent est un nouveau projet lancé par ALSTOM. Destiné à devenir le futur train utile, il dispose de nombreuses avancées technologiques.

C'est un train à la fois écologique et économique. Il peut transporter jusqu'à plus de 1000 passagers et atteint des vitesses de 160km/h. De plus, il possède deux types de motorisations, électrique ou thermique, ce qui le rend polyvalent.

Coradia polyvalent combine moteur à aimants permanents et architecture articulée. C'est le premier train régional propulsé par des moteurs synchrones à aimants permanents. Compacts, légers et performants, ces moteurs sont capables de récupérer l'énergie générée lors des phases de freinage et non utilisée par le train pour ensuite la restituer au réseau d'alimentation électrique. De plus, la masse du train et sa consommation d'énergie ont été grandement réduites grâce à une optimisation des matériaux utilisés.[6]



Figure 1.6 : Train Coradia d'Alstom

Le train Coradia polyvalent peut rouler sous trois tensions possibles : 25kV, 1500V ou 15kV. Il dispose de trois rames différentes, de longueur variable (56m, 72m, ou 110m) afin de s'adapter au trafic. Ce train peut fonctionner selon deux modes, électrique ou bi-mode. Cela signifie que pour les sections de lignes non-électrifiées, grâce au bi-mode, le train peut continuer d'avancer en mode thermique (diesel). Ainsi Coradia polyvalent peut rouler indifféremment sur les lignes électrifiées et non-électrifiées. Les économies d'énergie sont réelles, et le bilan écologique amélioré, en limitant l'utilisation du mode diesel aux seules sections dépourvues d'électricité.[7]

La SNTF a passé une commande à ALSTOM de 17 autorails, Ces trains doivent relier Alger aux principales villes du pays comme Oran, Annaba, Constantine et Bechar. Le Coradia est un train de grandes lignes polyvalent bi-mode (diesel et électrique 25 kV) qui peut circuler à une vitesse de 160 km/h. D'une longueur totale de 110 mètres, le train est composé de six voitures dotées d'une capacité totale de 254 sièges dont 60 en première classe. Il dispose également d'un plancher bas facilitant l'accès et le déplacement à bord en particulier pour les personnes à mobilité réduite.[3]

1.5. Train électro-diesel

Les trains électro-diesel comportent des locomotives équipés d'un moteur diesel, la rotation des roues motrices n'est plus obtenue par la transmission mécanique mais à travers une transmission électrique.

Les transmissions électriques ont le gros avantage de permettre de disposer de la pleine puissance du moteur diesel dans les limites très étendues de la gamme des vitesses. Autrement dit, ces transmissions permettent à un engin moteur remorquant sa charge, de circuler à des vitesses très variables en utilisant la puissance maximale ou presque du moteur diesel, le moteur tournant à son régime nominal.[4]



Figure 1.7 : Locomotive hybride BR203 de RailPower (ALSTOM)

1.5.1. L'intérêt de l'hybridation

Selon l'ADEME et la SNCF en France, le transport ferroviaire voyageur émet en moyenne 5.38 gCO₂/(voyageur.km) contre 148 gCO₂/(voyageur.km) pour l'aérien. Cette performance est spécifique à la France où la plupart des trains voyageurs sont électriques. En tenant compte du taux de remplissage des trains, le parc de trains voyageurs à la SNCF est constitué de 85% de TGV (électriques), 10% de TRN dont 12% de Diesel et 5% TER dont 36% de Diesel. L'indicateur climatique du ferroviaire s'élève alors à 56 gCO₂/(voyageur.km). Ce chiffre est en encore plus mauvais aux USA où, en dehors des lignes de métro ou de tram, le réseau ferré est presque entièrement non électrifié. Mais le transport ferroviaire reste globalement, en comparaison à l'automobile et l'aérien, le moyen de transport qui a le moins d'impacts fâcheux sur l'environnement.

Pour cela, la première motivation de l'hybridation ferroviaire est la réduction de la consommation de gasoil et des émissions de CO₂, intersection entre l'économie et environnement. C'est pour cela que le cas d'hybridation ferroviaire le plus répandu est l'hybridation des locomotives Diesel. Une autre nouvelle forme d'hybridation ferroviaire est intéressante à développer : il s'agit d'ajouter une source d'énergie hybride embarquée dans une locomotive électrique existante afin de la rendre autonome pour les petites missions aux bouts de lignes.[8]

1.5.2. Éléments de suspension

La suspension d'un véhicule ferroviaire est utilisée entre les différents composants d'un wagon, depuis les roues jusqu'au châssis/corps du wagon. Les éléments de suspension sont dits " primaires " ou " secondaires " selon l'emplacement des éléments. Les éléments de suspension primaires sont directement reliés aux roues/essieux, tandis que les éléments de suspension secondaires sont tout élément de suspension qui n'est pas

directement relié à l'essieu. L'emplacement de la suspension secondaire dépend de la conception du wagon et du bogie. Les wagons ne peuvent avoir qu'une suspension primaire ou secondaire ou à la fois primaire et secondaire.

Dans les wagons de marchandises, des bogies en trois parties sont utilisés avec des ressorts de suspension secondaires et des amortisseurs à friction. Les amortisseurs à friction sont basés sur une conception en coin qui fournit soit un amortissement à friction constante, soit, dans certains bogies, un amortissement à friction variable si les emboîtements de ressort sont utilisés pour fournir la force du ressort. Les amortisseurs à friction constante peuvent avoir les ressorts en coin à l'intérieur ou à l'extérieur de la traverse. Dans certains modèles de bogies, l'angle des ressorts en coin est incliné par rapport à la verticale. Avec les amortisseurs à friction variable, plus le poids de la caisse du wagon augmente, plus le poids de l'essieu augmente sur les cales de frottement, ce qui entraîne un meilleur amortissement du frottement.[9]



Figure 1.8 : Bogie pour wagon de passagers [9]

Les wagons voyageurs n'utilisent généralement pas de bogies en trois parties, mais un bogie rigide en H avec ressorts pneumatiques de suspension secondaires entre le bogie et la caisse du wagon.

Les ressorts pneumatiques offrent de meilleures caractéristiques de roulement et d'amortissement. Un exemple de bogie passager est illustré à la figure 1.8.

1.5.3. Bogies

Les bogies sont l'ensemble qui contient les essieux montés et qui sont reliés à la caisse du wagon/cadre.

Le bogie est relié à la caisse du wagon par l'intermédiaire du " bol central ", qui permet au bogie de tourner par rapport à la caisse du wagon.

Le poids du wagon permet d'amortir la rotation par friction. Dans certains cas, un revêtement de cuve centrale (un disque de polymère plat) est placé dans la cuve centrale pour réduire le frottement en rotation et permettre au bogie de diriger plus librement. Les dégagements dans les liaisons entre la traverse et les longerons, les essieux montés et le longeron permettent au bogie de se " déformer " ou " parallélogramme " lorsque le bogie traverse une courbe. On a également mis au point des conceptions de bogies dirigés en trois parties qui utilisent des liaisons passives pour améliorer les angles entre les essieux et les longerons lorsque le bogie traverse une courbe. Les bogies à direction réduisent l'usure des roues et des rails, mais sont plus coûteux à fabriquer et à entretenir. Les wagons de voyageurs sont généralement équipés de bogies pleins de type "H" avec suspension pneumatique primaire et secondaire. Ces bogies sont plus chers pour maintenir mais fournir une meilleure conduite.[10]

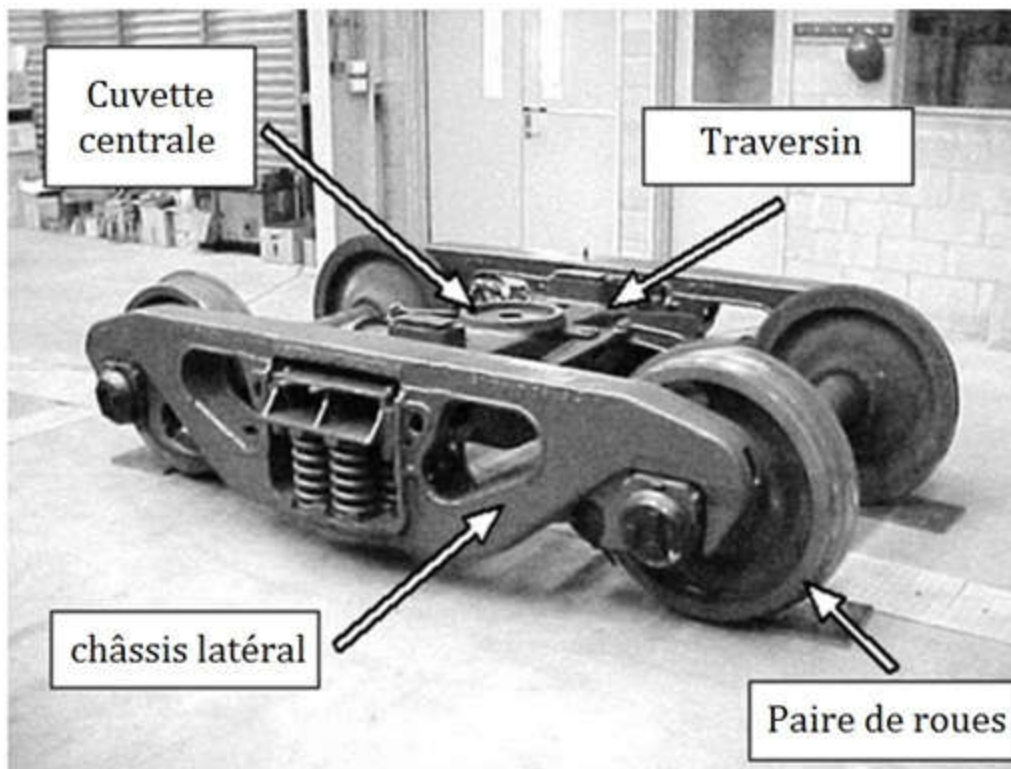


Figure 1.9 : Bogie de fret en trois pièces [9]

Les composants des bogies sont principalement conçus pour résister aux charges statiques, dynamiques et de fatigue dues à la charge verticale placée sur les composants, mais des forces latérales et longitudinales faibles existent en raison des impacts longitudinaux et courbes et des opérations de freinage, respectivement. Ces forces

supplémentaires doivent être prises en compte lors de la conception de la cuvette centrale et du cadre latéral pour renforcer les connexions.

1.5.4. Essieux montés et roulements

Une paire de roues est un ensemble composé de deux roues montées sur un essieu. Le profil conique de la bande de roulement des roues permet aux véhicules ferroviaires de rester centrés sur la voie en fournissant une force latérale sur le véhicule ferroviaire lorsqu'elle est décalée par rapport au centre de la voie. La roue est munie d'un rebord pour empêcher la bande de roulement de se déplacer latéralement par rapport au rail. Dans les virages serrés et dans les cas graves de déplacement latéral sur voie tangente, la bride peut entrer en contact avec le rail ; dans ce cas, on l'appelle " bridage ". L'interaction du profil de rail et du profil de roue est importante pour la stabilité et la performance de virage d'un véhicule ferroviaire. La conicité de la bande de roulement de la roue est appelée sa " conicité " ; une conicité élevée produit des forces latérales plus importantes.

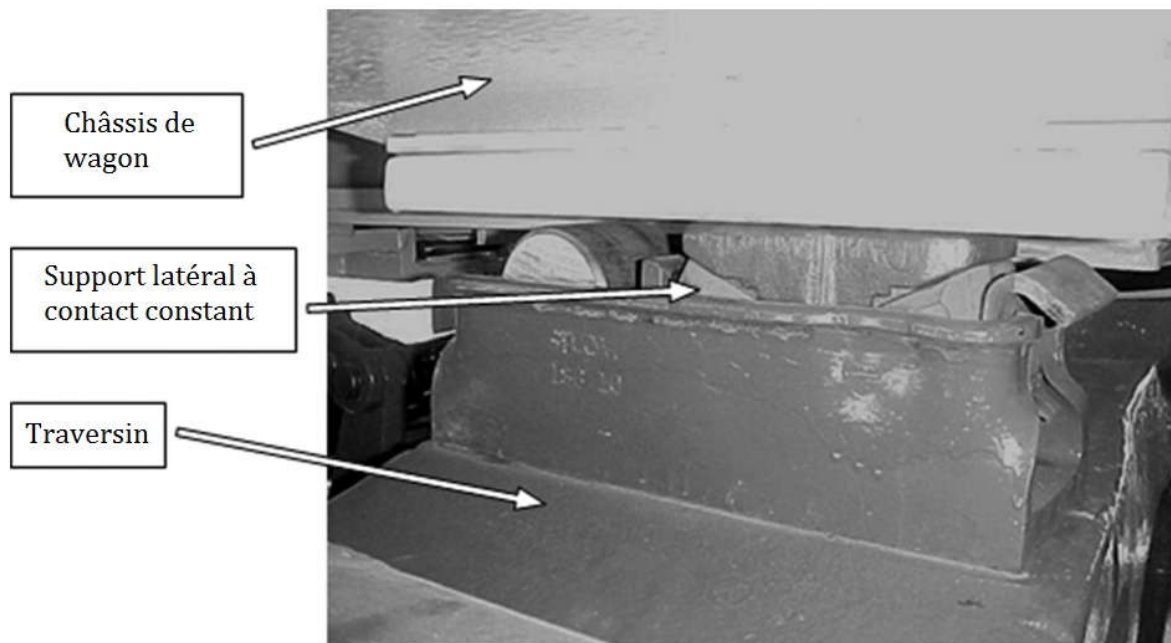


Figure 1.10 : Support latéral du wagon [9]

La figure 1.10 montre le profil d'une roue, ce qui indique à quel point l'angle de conicité de la bande de roulement est faible. Une conicité élevée est bénéfique pour les performances en courbe, mais elle réduit également la vitesse critique du véhicule ferroviaire. La vitesse critique est la vitesse à laquelle le véhicule ferroviaire commence à " chasser ", c'est-à-dire à se déplacer d'un côté à l'autre en raison des forces latérales élevées causées par la conicité et l'amortissement dans le bogie et le wagon n'est pas assez élevé pour amortir cette vibration. Au-dessus de la vitesse critique, le wagon est dit instable. Les concepteurs de véhicules ferroviaires doivent s'assurer que la vitesse critique est supérieure à la vitesse d'exploitation.[9]

1.5.5. Couplage

Le couplage est un élément important de la conception du wagon ; il affecte à la fois la dynamique longitudinale et latérale. La dynamique longitudinale provoquée par les efforts de traction et de freinage et les variations de la pente de la voie sont amorties par l'amortissement présent dans les pièces d'accouplement.

Les forces latérales sur les wagons sont causées par l'interaction des forces longitudinales et des angles de l'attelage. Les forces longitudinales peuvent comprendre les forces en régime permanent dues à des niveaux et des inclinaisons constants de freinage et de traction, ou les forces transitoires dues à des changements dans les niveaux et les inclinaisons de freinage et de traction. La force latérale créée par la force longitudinale, dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment le décalage du wagon par rapport aux wagons adjacents, la courbure de la voie et les dimensions de l'attelage et de l'espacement des bogies du wagon et des wagons adjacents. [9]

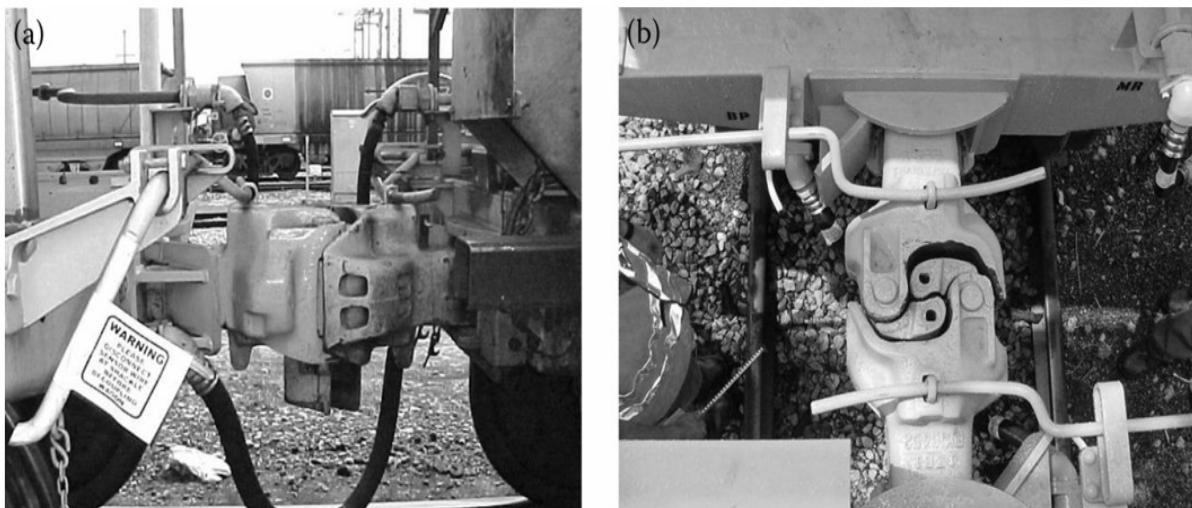


Figure 1.11 : Auto coupleur pour wagons. (a) Vue latérale, (b) vue de dessus.[9]

1.5.6. Matériel roulant de traction

Le niveau élevé de concurrence sur le marché des transports, le renforcement des exigences en matière de protection de l'environnement et les nouvelles limites imposées à la consommation des ressources en hydrocarbures ont amené les ingénieurs des transports à s'engager activement dans le développement et l'introduction de nouvelles technologies, notamment pour les locomotives, qui comprennent également les locomotives hybrides.

Par leur conception, ces véhicules sont semblables aux locomotives diesel et à turbine à gaz ; une différence importante est qu'en plus des locomotives diesel ou à turbine à gaz, les locomotives hybrides utilisent également de l'énergie électrique stockée dans des batteries électriques, des supercondensateurs ou des volants. Le processus de charge de ces composants se produit pendant le fonctionnement du générateur diesel ou de la turbine à gaz au ralenti, ou lorsque l'énergie cinétique de freinage (du train et de la

locomotive) est transformée en énergie électrique. Pendant les opérations de transport (mode traction), la combinaison d'énergies peut être utilisée (c'est-à-dire puiser simultanément dans le stockage d'énergie et le générateur principal) lorsqu'une puissance supplémentaire est nécessaire pour accélérer ou remonter de longues pentes. La transformation et la transmission de l'énergie aux roues de la locomotive s'effectuent de manière standard, comme dans les locomotives diesel ou turbine-électriques à transmission électrique.[11]

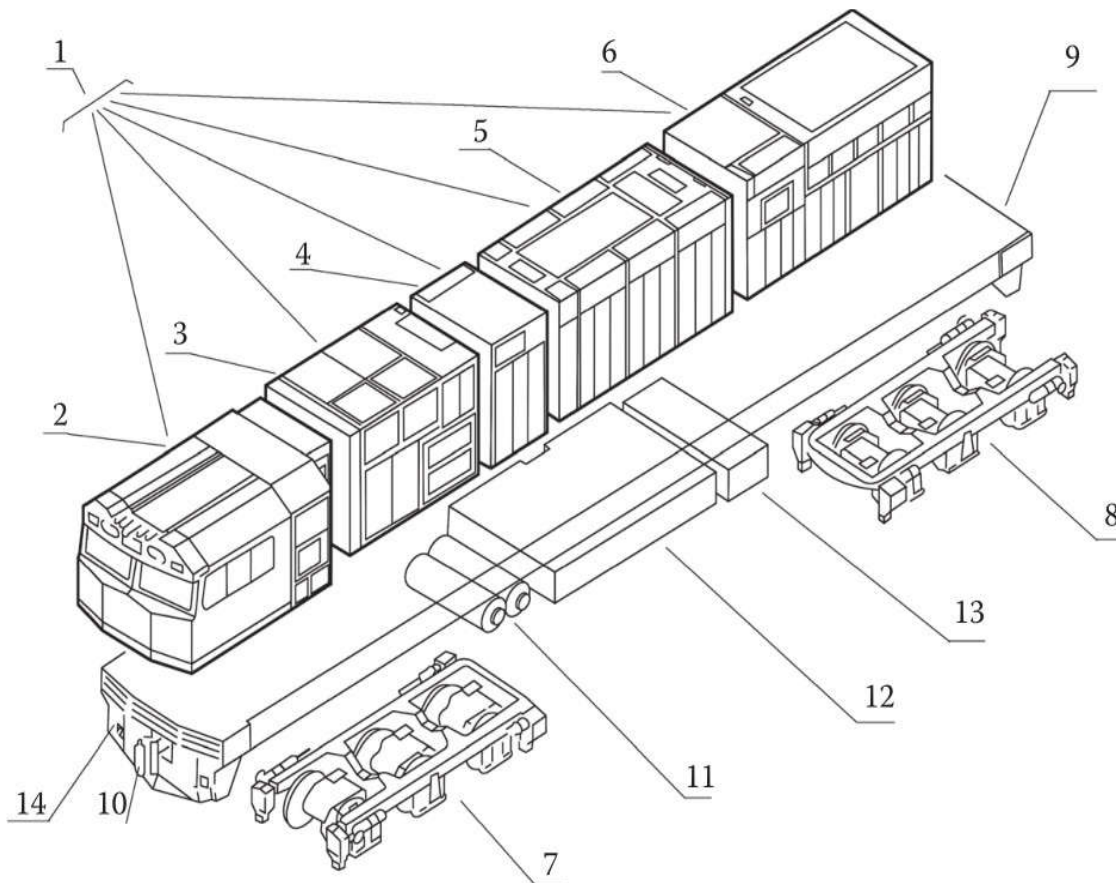


Figure 1.12 : Exemple d'emplacement des principaux composants d'une locomotive électro-diesel.

1- Carrosserie de voiture ; 2- cabine de conduite ; 3- compartiment auxiliaire ; 4- bloc de l'alternateur ; 5- compartiment moteur diesel ; 6- bloc radiateur ; 7 et 8- bogies ; 9- châssis principal ; 10- coupleur ; 11- réservoirs d'air ; 12- réservoir de carburant ; 13- batteries ; 14- poupée fixe.

La classification des systèmes principaux (systèmes mécaniques, électriques, hydrauliques et pneumatiques) des locomotives hybrides est similaire à celle des locomotives diesel. A cette classification, les modèles d'hybridation suivants peuvent être ajoutés :

- Conception hybride sans stockage d'énergie interne, seulement des unités de stockage externes (l'énergie de réseau hybride est stockée dans les installations d'alimentation en énergie ou mise à disposition d'autres véhicules de traction ferroviaire via les équipements de la ligne aérienne) ;

- Construction hybride avec accumulateurs internes (stockage d'énergie interne hybride autonome) ;

- Des structures hybrides complexes qui combinent plusieurs variétés de ces types.

Au stade actuel de développement de la technologie de traction hybride, des locomotives hybrides sont déjà en service pour les services de manœuvre, ainsi que pour le trafic suburbain et urbain de voyageurs. Toutefois, ils ne sont pas utilisés pour le transport de marchandises ou la traction de poids lourds en raison des limites des options de stockage de l'énergie existantes. Un diagramme schématique de la transmission pour ce type de locomotives est présenté à la figure 1.13.

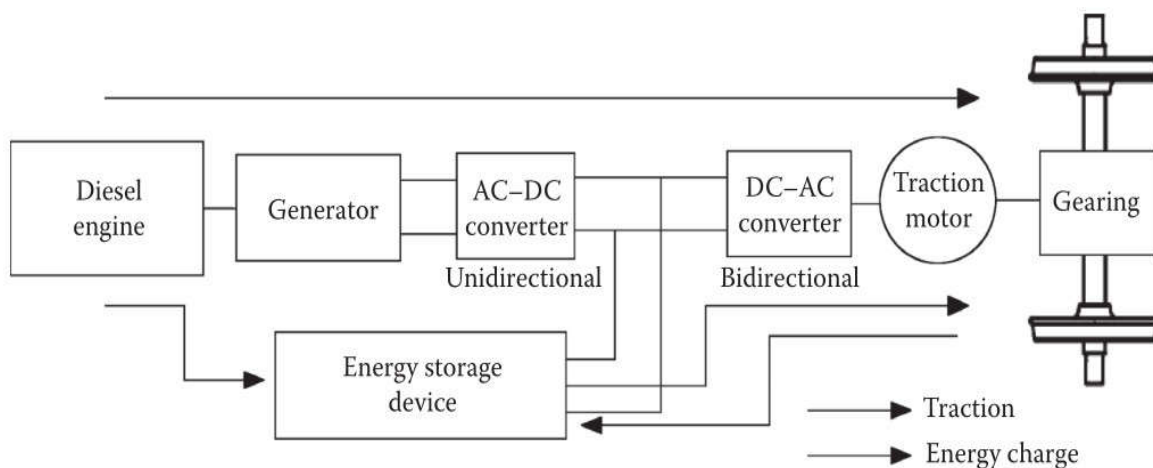


Figure 1.13 : Structure hybride de locomotive

Les batteries sont généralement utilisées pour stocker l'énergie électrique ; elles peuvent être fabriquées à partir de métaux (lithium, sodium, nickel, cadmium, zinc, plomb, plomb) et de leurs composés, d'éléments non métalliques (soufre, carbone, azote, brome, chlore) et leurs composés chimiques.

Les principaux inconvénients sont le poids élevé des éléments de la batterie, leur coût, le faible nombre de cycles de charge-décharge et un changement significatif de leurs caractéristiques en fonction de la température ambiante de fonctionnement, ce qui signifie que l'utilisation de systèmes hybrides équipés de batteries est imprévisible en climat froid et très chaud. Dans ces cas, il est nécessaire de créer un système avancé pour le maintien de l'intégrité de l'information. La température de fonctionnement de la batterie dans la plage prédéterminée, ce qui implique un coût énergétique supplémentaire.

Les avantages de l'utilisation de la traction hybride sont les faibles coûts énergétiques et la réduction des émissions de polluants atmosphériques associés à la centrale électrique par rapport au matériel roulant autonome existant. Les inconvénients sont liés à l'augmentation du coût des véhicules hybrides et aux coûts d'exploitation supplémentaires associés à l'entretien de leurs systèmes de stockage de l'énergie.[9]

1.5.7. Fonctionnement

Le courant électrique arrivant aux locomotives, l'essentiel reste à faire : s'en servir pour produire l'énergie mécanique qui fera tourner les roues motrices. Ce travail est effectué par des moteurs électriques. Ces moteurs, en nombre variable suivant le type de machine, entraînent les essieux par l'intermédiaire d'une transmission mécanique. L'appareillage des locomotives est constitué par des organes dont le rôle est de permettre au conducteur d'agir à volonté sur le fonctionnement des moteurs électriques de traction : les mettre en marche, augmenter ou ralentir leur vitesse, augmenter ou diminuer l'effort qu'ils produisent. Cet appareillage dont une partie importante est le câblage permet la distribution du courant aux moteurs dans des conditions qui correspondent, à chaque instant, au travail qui leur est demandé. La variation de vitesse des locomotives est obtenue par variation de vitesse de leurs moteurs. On peut résumer brièvement le fonctionnement des locomotives en trois stades :

1. Captation du courant sur le conducteur d'alimentation (caténaire)
2. Distribution du courant aux moteurs de traction
3. Utilisation de ce courant par les moteurs de traction qui le transforment en effort mécanique transmis aux roues.[12]

1.6. Entraînements électriques pour les applications de traction

L'entraînement électrique en général est composé de nombreux éléments ; cependant, les plus importants sont probablement les suivants :

- La machine électrique, est l'élément qui fournit la vitesse de rotation et le couple à la charge mécanique pour assurer le mouvement correct du système. Cependant, il existe différents types de configurations (ou topologies) de machines électriques. Afin d'obtenir des performances de vitesse réglables, la machine doit être alimentée à des conditions de fonctionnement à tension réglable.

- Le convertisseur électronique de puissance, la machine électrique doit être alimentée de manière appropriée pour pouvoir fournir le couple et la vitesse appropriés à l'arbre. L'élément chargé de l'alimentation en électricité est le convertisseur électronique de puissance et est relié à l'alimentation en énergie. Il est en mesure de fournir la tension réglable nécessaire à la machine électrique, en convertissant la tension d'une tension normalement fixe tension fournie par la source d'énergie. Il existe différents types d'électronique de puissance les configurations (ou topologies) des convertisseurs.

- Le contrôle : en général, le convertisseur électronique de puissance est régi par un algorithme de commande (souvent simplement) qui permet d'obtenir des variables essentielles de l'entraînement électrique à contrôler, telles que la vitesse de rotation, le couple et courants. L'algorithme de contrôle doit mesurer en continu certaines variables de l'entraînement électrique (électrique et/ou mécanique), afin d'être en mesure de contrôler les paramètres définis par l'utilisateur. Pour des raisons d'efficacité ou de sécurité. Ainsi par exemple dans un véhicule électrique, l'utilisateur définit avec la pédale

le couple d'accélération du véhicule. L'algorithme de contrôle sera en charge de définir la tension réglable nécessaire que doit fournir le convertisseur de puissance, de sorte que la tension électrique Le moteur répond à l'accélération demandée du véhicule.[13]

Par conséquent, la machine électrique produit la vitesse de rotation et le couple requis par la charge sur l'arbre. Pour cela, si le couple et/ou la vitesse doit varier pendant le fonctionnement, il est nécessaire d'alimenter la machine avec une tension alternative réglable, comme illustré dans la figure 1.14.

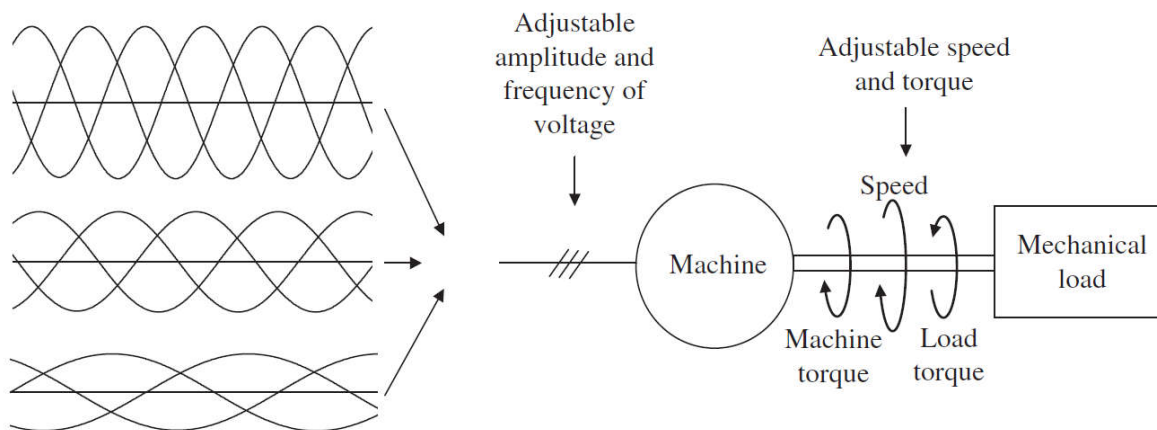


Figure 1.14 : Interaction entre la machine électrique et la charge mécanique. [13]

De nos jours, les machines électriques les plus efficaces, les plus fiables et les plus rentables sont les machines à courant alternatif ; par conséquent, la tension d'alimentation réglable requise est celle du courant alternatif. Cela signifie que la tension d'alimentation peut présenter des amplitudes et des fréquences différentes, comme le montre la figure 1.14. Notez que la machine électrique peut être conçue comme un convertisseur électromécanique, qui d'un côté, électrique, fonctionne avec des variables électriques telles que tensions et courants, tandis que de l'autre, mécanique, fonctionne avec des variables mécaniques telles que couple et vitesse de rotation.

D'autre part, l'élément qui peut produire les tensions alternatives ajustables nécessaires pour la machine électrique est le convertisseur électronique de puissance. Comme le montre le schéma de la figure 1.15, le convertisseur de puissance d'un entraînement électrique convertit généralement la tension fixe de la source d'énergie en une tension alternative réglable nécessaire à la machine. Selon les caractéristiques de l'application, il est possible de trouver des sources d'énergie à tension continue fixe ou à tension alternative fixe. Ainsi, selon la nature de la source d'énergie, la nature ou la configuration du convertisseur de puissance serait également différente. Pour effectuer la conversion correcte du courant continu en courant alternatif, l'alimentation reçoit, en continu, des commandes d'ordre de l'algorithme de commande.

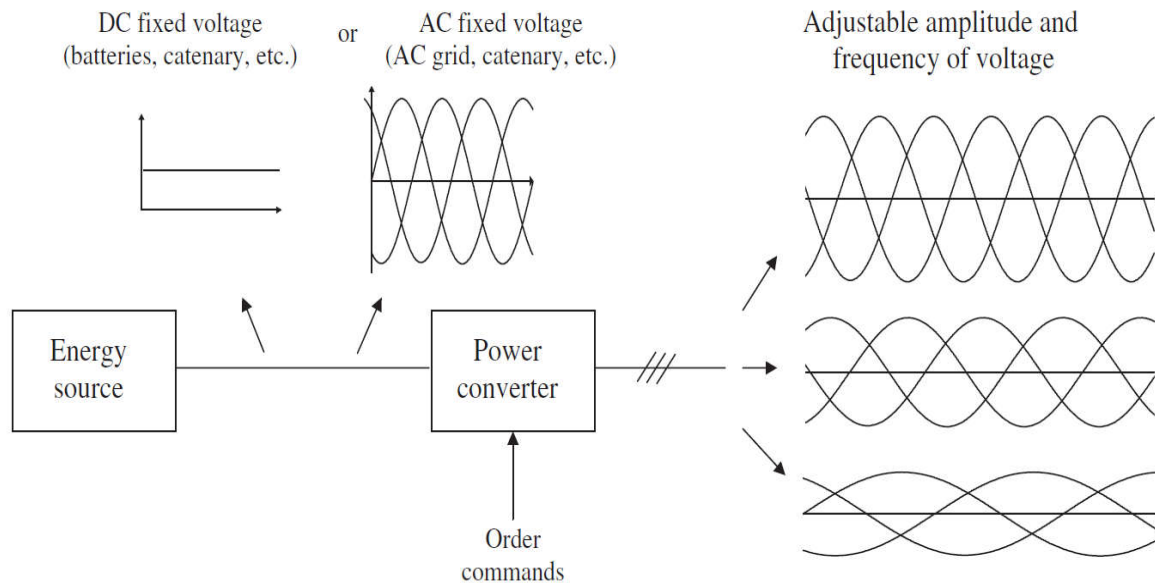


Figure 1.15 : Interaction entre la source d'énergie et le convertisseur de puissance, pour alimenter la machine électrique. [13]

Il faut souligner qu'idéalement, les machines à courant alternatif auraient besoin de tensions de forme sinusoïdale d'amplitude et de fréquence différentes pour fonctionner correctement. Cependant, du moins de nos jours, les convertisseurs électroniques de puissance les plus efficaces et les plus rentables ne sont pas capables de produire des tensions de forme sinusoïdale idéale. Au lieu de cela, le convertisseur électronique de puissance du côté CA est capable de créer des tensions décalées ou hachées, avec un degré de similitude différent des tensions sinusoïdales. Comme représenté, sous une forme simplifiée, dans la Figure 1.16, en fonction de la configuration ou de la topologie du convertisseur électronique de puissance, il est possible de créer des tensions de différents niveaux constants qui présentent différentes similitudes d'aspect avec la tension sinusoïdale idéale. Ainsi, on peut remarquer que si le nombre de niveaux de tension employés est élevé (cinq dans cet exemple), la similitude avec la forme sinusoïdale est plus proche que si le nombre de niveaux employés est faible (deux dans cet exemple). Par conséquent, on peut dire qu'avec ce type de formes d'onde de tension étagée, les machines électriques sont assez bonnes et donc utiles, fournissant une performance acceptable des comportements de couple et de vitesse pour la plupart des applications.

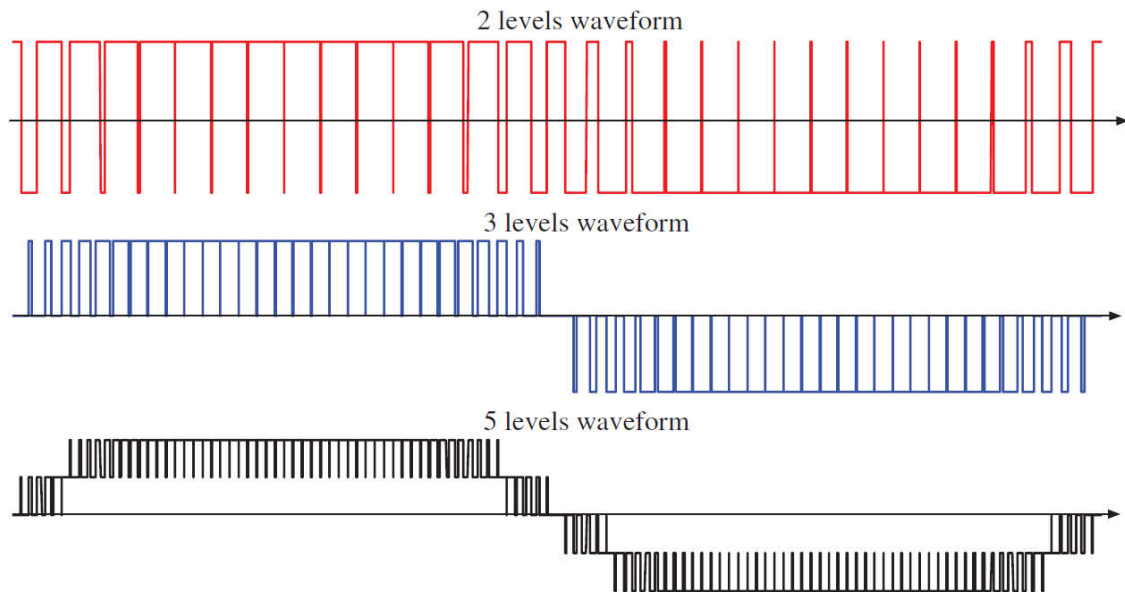


Figure 1.16 : Tensions de sortie AC obtenues par différentes topologies de convertisseurs avec différents niveaux de tension. [13]

Le convertisseur électronique de puissance est normalement composé de différents types et nombres de commutateurs contrôlés et non contrôlés, également appelés semi-conducteurs. En outre, des éléments passifs tels que, le plus souvent, des condensateurs et, dans une moindre mesure, des inductances sont également présentes dans le convertisseur. En fonction de la disposition et du nombre de commutateurs utilisés, la forme de la tension alternative de sortie qui peut être obtenue est différente. En commandant les commutateurs du convertisseur électronique de puissance, la forme d'onde de tension de sortie du convertisseur est également contrôlée. En fonction de la disposition ou de l'agencement des commutateurs du convertisseur, on dit qu'une topologie de convertisseur électronique de puissance différente est obtenue. Généralement, les commutateurs non contrôlés utilisés sont les diodes, tandis que les commutateurs contrôlés peuvent être : des transistors bipolaires à grille isolée (IGBT), des transistors à oxyde métallique (IGBT), des transistors à oxyde métallique (IGBT), transistors à effet de champ à semi-conducteurs (MOSFET), thyristors à grille isolée (IGCT), et ainsi de suite.[13]

1.7. Évolution des schémas de puissance en traction électrique

Au début, on a adapté l'alimentation au moteur à courant continu faute de mieux, puis on a adapté le moteur et son contrôle aux nouvelles tensions d'alimentation alternatives haute tension et récemment les performances des composants de contrôle et l'électronique de puissance ont permis de choisir les moteurs triphasés sans collecteur les plus performants quelle que soit l'alimentation. La figure 1.17 et le tableau 1.1 résumant de 1880 à 2010 la situation. Toutes les tensions d'alimentation du passé subsistent sauf

le triphasé à fréquence fixe et l'on peut penser qu'il en sera encore ainsi pour longtemps, car on n'ose pas imaginer ce que coûterait la standardisation à une seule tension alternative haute tension en Europe, d'ailleurs laquelle 25 kV-50 Hz ou 15 kV-16,7Hz.

Côté moteur de traction, la situation est plus aisée : le moteur asynchrone à cage économique et robuste s'impose quasiment partout, sauf quand la place manque dans le bogie ; on va alors chercher la dernière technologie du moment, le moteur synchrone à aimants permanents MSAP plus compact et plus performant encore.

Pour l'interrupteur électronique, l'IGBT a détrôné thyristors et GTO depuis près de dix années et rien pour le moment n'apparaît à l'horizon pour le remplacer. Même si on parle depuis quelque temps du carbure de silicium, il faudra encore attendre.[14]

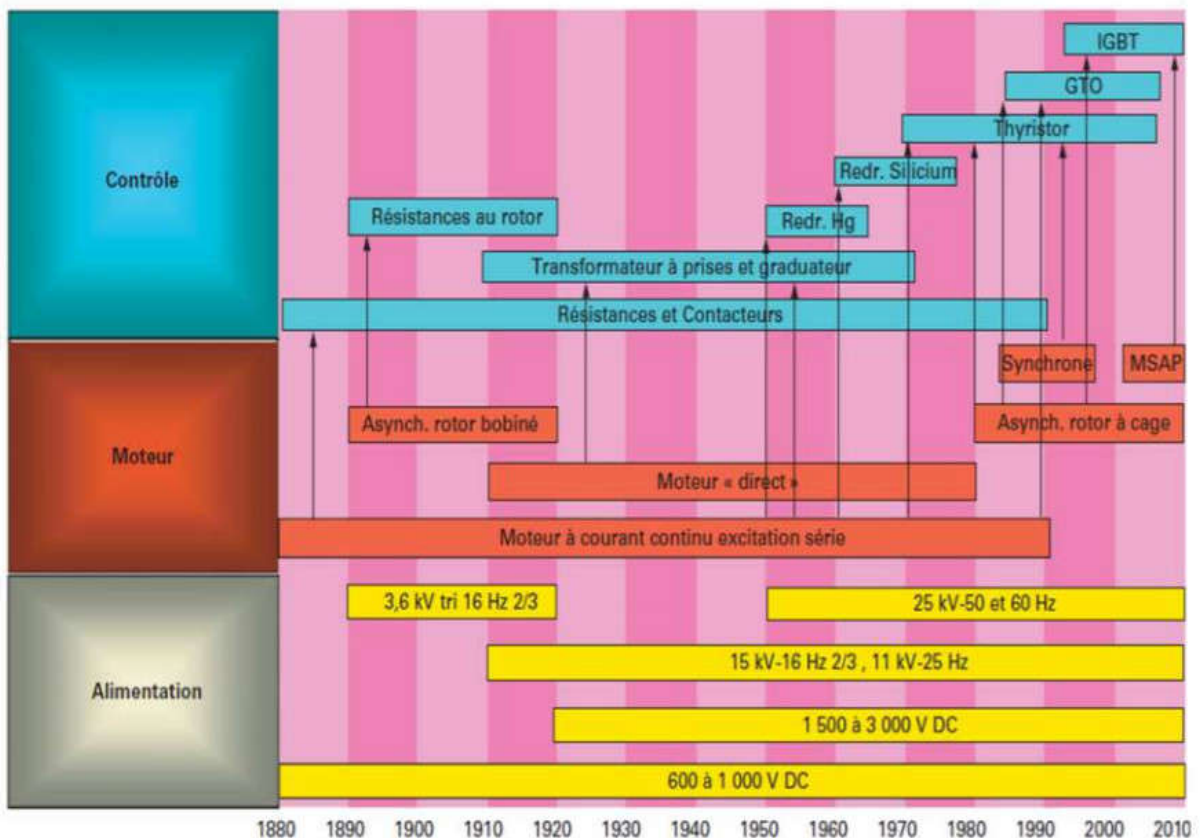


Figure 1.17 : Historique des technologies utilisées en traction électrique.[15]

Tableau 1.1 : Évolution des schémas avec les différents types de moteurs de traction.[15]

		MOTEURS					
		Moteur CC	Asyn rotor bobiné	Moteur direct	Synch rotor bobiné	Asyn rotor cage	MSAP
SCHEMA	Résistances-Contacteur	1880					
	Résistances au rotor		1890				
	Transformateur graduateur			1910			
	Redresseur Hg	Ignitrons (1950)					
	Redresseur Silicium	Diodes (1960)					
	Ponts mixtes/complets	THY(1971)			THY(1988)	THY(1988)	
	Hacheur	THY (1976) GTO (1983)			THY(1988) GTO (1992)	THY(1988) GTO (1993)	
	Onduleur de courant				THY(1988)	THY (1988)	
	Onduleur de tension					THY (1980) GTO (1991) IGBT (1992)	IGBT(2006)
	Redresseur 4QC/PMCF					GTO (1985) IGBT (2000)	IGBT(2006)

Électronique de puissance contrôlée

1.8. Alimentation électrique

Le système d'alimentation électrique d'une ligne ferroviaire est constitué de trois éléments principaux :

- Les sous-stations,
- Les caténaires,
- Le pantographe,

Principe de fonctionnement de la traction électrique est illustré dans la figure 1.18

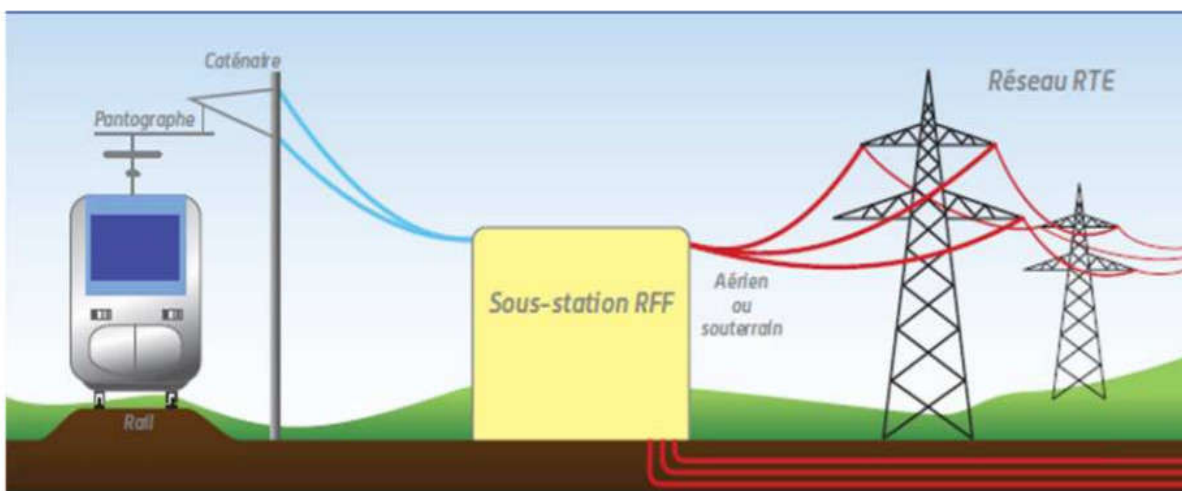


Figure 1.18 : Schéma global de la traction électrique [15]

1.8.1. Sous-station

Point névralgique du système d'alimentation électrique, les sous-stations d'alimentation électrique doivent garantir une qualité constante du courant et répondre aux exigences d'énergie des TGV. Elles couvrent en moyenne les besoins d'alimentation électrique sur environ de 60 Km, c'est pour cette raison que cette alimentation se fait à partir de lignes à Très Haute Tension [THT]. Le rôle de la sous-station est de transformer le courant THT en courant de traction de 25000 Volts.

Une sous-station comporte plusieurs éléments :

- une partie assurant l'interface avec le réseau GRTE 400/225 kV,
- un transformateur « produisant » les 25 000 Volts de la caténaire,
- une partie assurant les protections électriques et le contrôle commande.[15]

1.8.2. Caténaires

Un système caténaire est un ensemble de câbles soutenu par des supports. On distingue le câble porteur du fil de contact. Ce dernier est suspendu au câble porteur par des pendules. Il doit être situé à une hauteur constante. La caténaire distribue le courant à la locomotive. Le point de contact s'effectue à l'aide d'un appareil appelé pantographe. Pour une parfaite transmission de puissance, ce contact doit être le plus continu possible. Les caténaires sur les lignes existantes du territoire de GPSO possèdent un support caractéristique en forme d'ogive : on l'appelle « caténaire midi ».[15]

1.8.3. Pantographe

Le pantographe capte le courant sur la caténaire et le transmet à la locomotive. Il est fabriqué en alliages légers comportant du carbone et du cuivre. Il a une forme en « Z » et un archet au sommet. Des ressorts permettent de maintenir l'archet sur la caténaire avec une pression la plus constante possible.[15]

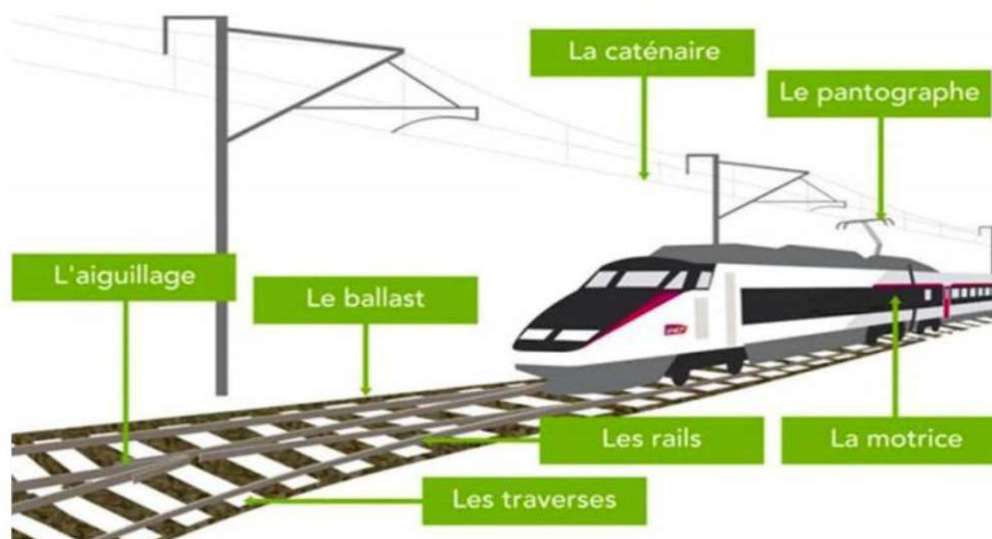


Figure 1.19 : Illustration des différents éléments servant à une traction électrique

1.9. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté l'état de l'art des chemins de fer, en commençant par l'historique des trains électrifiés, les différentes caractéristiques des équipements, la conception des véhicules ferroviaires non motorisés et le matériel roulant de traction. Nous avons étudié par la suite l'entraînement électrique pour les applications de traction qui utilise les convertisseurs statiques, ce qui va faire le sujet du chapitre suivant.

CHAPITRE 2

Techniques de commande des onduleurs triphasés

Chapitre 2 : Techniques de commande des onduleurs triphasés

2.1. Introduction

Une des applications industrielles en plein essor est l'alimentation des moteurs électriques, par variateur de vitesse, grâce à l'utilisation des convertisseurs de l'électronique de puissance. Un variateur permet d'asservir le couple ou la vitesse des machines tournantes, tout en ayant un très bon rendement.

Comme le montre le synoptique de la Figure 2.1, le convertisseur d'un variateur de vitesse relie une source électrique alternative (monophasée ou triphasée) à un moteur (le plus souvent alternatif) par l'intermédiaire d'un dispositif de filtrage situé de part et d'autre du convertisseur.

Ces variateurs sont conçus autour d'une même architecture. Des grandeurs importantes (comme le couple, la vitesse de la machine tournante, les tensions ou les courants) sont traitées par un organe de commande permettant de piloter le convertisseur et ainsi réguler la ou les grandeurs souhaitées. Un dispositif de protection est connecté au convertisseur du variateur afin de réduire au maximum tout risque de destruction du système.

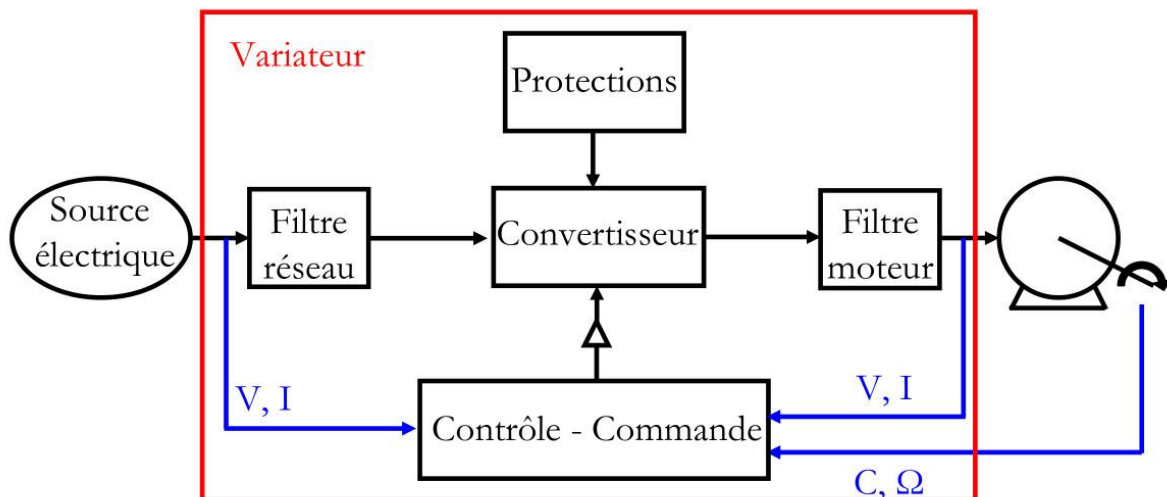


Figure 2.1 : Synoptique d'un variateur de vitesse

Il existe plusieurs topologies de convertisseurs. La première famille assure une conversion alternatif-continu suivie d'une conversion continu-alternatif (AC/DC/AC). C'est celle qui est actuellement la plus répandue dans l'industrie. La seconde famille assure une conversion directe alternatif-alternatif (AC/AC). Cette conversion directe peut

être assurée, soit par des cycloconvertisseurs, soit par des convertisseurs matriciels. On écartera de cette étude les cycloconvertisseurs, qui sont utilisés pour des applications de très forte puissance ($>10\text{MW}$). [16]

Cette mémoire s'intéresse à la conversion DC/AC dans la première famille, entre une tension redressée d'un réseau triphasé et une machine triphasée asynchrone pour varier la vitesse d'un locomotives électro-diesel. Ce chapitre présente, tout d'abord, le principe de fonctionnement d'un onduleur triphasé et les différentes techniques de commandes de ce dernier.

2.2. Conversion continu/alternatif (Onduleur)

Un onduleur est un dispositif d'électronique de puissance permettant de délivrer des tensions et des courants alternatifs à fréquence fixes ou variables sous forme d'une alimentation alternative monophasée ou triphasée à partir d'une source d'énergie électrique continue. L'onduleur est utilisé pour fournir une tension ou un courant alternatif pour assurer l'alimentation en énergie des charges (micro-ordinateur, station de télécommunication) pendant la coupure du réseau électrique ou une alimentation permanente pour les systèmes autonomes (centrales photovoltaïques, engins aérospatiaux, ...). La représentation symbolique d'un onduleur est donnée par la figure 2.2 : [17]

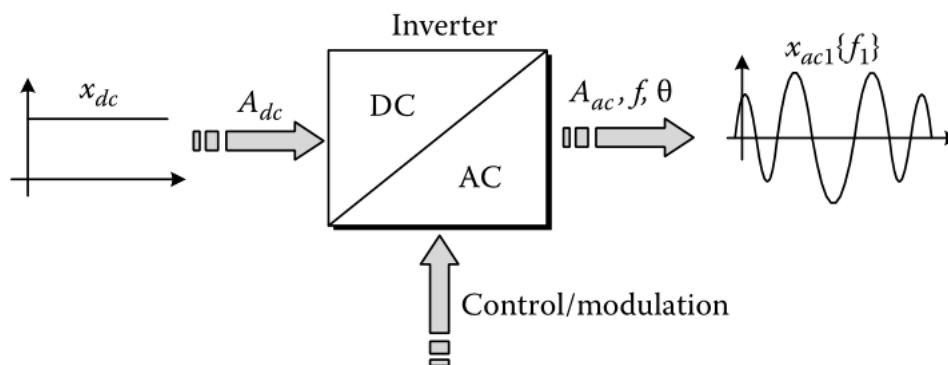


Figure 2.2 : Schéma de principe de l'onduleur [18]

Les onduleurs sont utilisés en électrotechnique pour : Soit fournir des tensions ou courants alternatifs de fréquence et amplitudes variables. C'est le cas des onduleurs servant à alimenter des moteurs à courant alternatif devant tourner à vitesse variable par exemple (la vitesse est liée à la fréquence des courants qui traversent la machine). Soit fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes. C'est le cas en particulier des alimentations de sécurité destinées à se substituer au réseau en cas de défaillance.

L'énergie stockée dans les batteries de secours est restituée sous forme continue, l'onduleur est alors nécessaire pour recréer la forme de tension et fréquence du réseau.

On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue : source de tension ou source de courant.

La technologie des onduleurs de tension est la plus maîtrisée et est présente dans la plupart des systèmes industriels, dans toutes les gammes de puissance (quelques Watts à plusieurs MW).[19]

2.3. Types d'onduleurs

Coté commande : il existe trois types

- Onduleur à commande pleine d'onde (commande symétrique) ;
- Onduleur à commande décalée ;
- Onduleur à modulation de largeur d'impulsion.

Coté puissance : il existe aussi trois types

- Onduleur en demi-pont ;
- Onduleur avec transformateur à point milieu (isolé) ;
- Onduleur en pont complet.[20]

2.4. Classification

2.4.1. Onduleur autonome

Un onduleur est dit autonome s'il utilise l'énergie d'un circuit auxiliaire propre à lui pour la commutation des thyristors ou d'autres semi-conducteurs. Dans ce cas nous commandons la fréquence et la forme d'onde de la tension de sortie.

On distingue deux types d'onduleurs autonomes :

- Les onduleurs de tension alimentée par une source de tension continue.
- Les onduleurs de courant alimentés par une source de courant continue. [21]

2.4.2. Onduleur non autonome

C'est le nom donné au montage redresseur tous thyristors (pont de Graëtz) qui, en commutation naturelle assistée par le réseau auquel il est raccordé, permet un fonctionnement en onduleur (par exemple par récupération de l'énergie lors des périodes de freinage dans les entraînements à moteurs électriques).

À la base du développement des entraînements statiques à vitesse variable pour moteurs à courant continu et alternatif, cyclo-convertisseurs, onduleurs de courant pour machines synchrones et asynchrones, jusqu'à des puissances de plusieurs MW, ce type de montage est progressivement supplanté, au profit de convertisseurs à IGBT ou GTO.[21]

2.4.3. Domaine d'application

Les onduleurs ont été conçus essentiellement pour fonctionner dans 2 domaines d'application :

-La variation de vitesse : la façon la plus efficace de régler la vitesse des machines (MAS) et d'agir sur la fréquence de leur tension d'alimentation. Pour répondre à ce besoin, on conçoit donc un redresseur triphasé qui fournit une tension continue et on place un onduleur à la suite qui crée le réseau de tension triphasé sinusoïdal à une l'amplitude et à la fréquence permettant le fonctionnement désiré.

-Les alimentations sans interruption (ASI) : Certaines applications sensibles (hôpitaux, serveurs informatiques...) ne peuvent supporter la moindre panne d'alimentation. Pour réaliser une alimentation sécurisée, on a la même structure que précédemment avec des batteries sur le bus continu, ce qui permet de continuer à fournir de l'énergie et donc une tension sinusoïdale le temps qu'un groupe électrogène prenne le relais. (Rq : onduleurs plus souvent en monophasé)

2.5. Onduleur de tension triphasé

Les onduleurs triphasés sont généralement utilisés pour alimenter des charges triphasées. Il est possible d'alimenter une charge triphasée au moyen de trois onduleurs monophasés distincts, chaque onduleur produisant une sortie décalée de 120° l'un par rapport à l'autre. Bien que cette disposition soit préférable dans certaines conditions, elle nécessite soit un transformateur de sortie triphasé, soit un accès séparé à chacune des trois phases de la charge. En pratique, cet accès n'est généralement pas disponible et nécessite 12 commutateurs.

Le circuit d'alimentation d'un onduleur triphasé est obtenu en ajoutant un troisième bras à l'onduleur monophasé, comme illustré à la figure 2.3

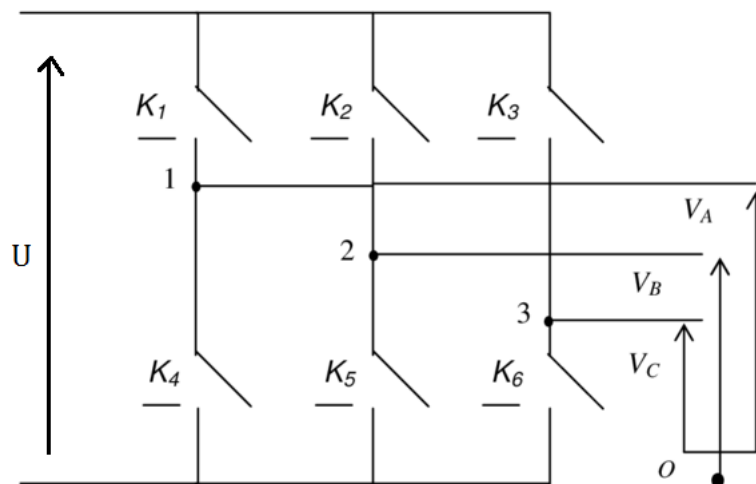


Figure 2.3 : Montage d'un onduleur triphasé

En supposant, comme précédemment, celui des deux interrupteurs d'alimentation dans chaque branche de l'onduleur, un et un seul est toujours allumé ; en d'autres termes, si nous négligeons les intervalles de temps lorsque les deux commutateurs sont désactivés (temps de suppression), trois variables de commutation a , b et c peuvent être affectées au variateur.

Les états totaux d'un onduleur sont $2^3 (= 8)$, à partir de l'état 0, lorsque toutes les bornes de sortie sont bloquées sur le bus CC négatif, alors que l'état 7, lorsqu'elles sont bloquées sur le bus positif. Les états de fonctionnement sont illustrés à la figure 2.4 (a).

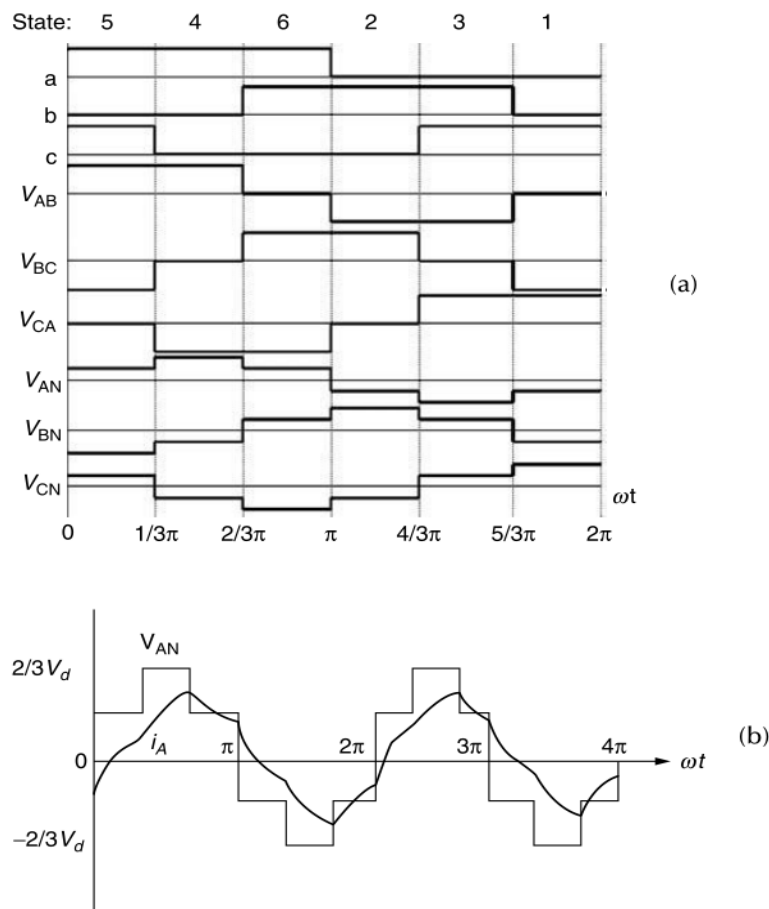


Figure 2.4 : (a) Variables de commutation et formes d'onde de tension de sortie dans un onduleur triphasé (b) onde de tension et de courant de sortie dans un onduleur triphasé [22]

Si la séquence d'états 5-4-6-2-3-1-... est imposée à un onduleur, chaque état dure un sixième de la période souhaitée de la tension de sortie fondamentale, les états individuels ligne-ligne et ligne-neutre les tensions ont des formes d'onde représentées à la figure 2.4(a). Dans ce mode de fonctionnement carré, chaque commutateur de l'onduleur est activé et désactivé une fois dans le cycle de la tension de sortie.[22]

La forme d'onde de tension et de courant de sortie pour une phase de l'onduleur est illustrée à la figure 2.4(b).

Il est facile de montrer que les tensions ligne à ligne instantanées, V_{AB} , V_{BC} , V_{CA} , sont données par :

$$\begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{bmatrix} = V_d \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Dans les systèmes triphasés équilibrés, les tensions de sortie ligne à neutre, V_{AN} , V_{BN} et V_{CN} instantanées peuvent être exprimées comme suit [22] :

$$\begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Normalement, la tension et la fréquence de sortie de l'onduleur sont contrôlées en continu. Pour les applications d'entraînement de machine, la plage de contrôle de la tension et de la fréquence est large. Pour une alimentation en courant alternatif régulée, la fréquence est constante, mais la tension doit être contrôlée en raison des variations de l'alimentation et de la charge. Le contrôle de la fréquence de l'onduleur est très simple. La commande de fréquence peut être fixe ou variable et peut être générée à partir d'un microprocesseur à l'aide d'une table de correspondance, de compteurs de matériel et de logiciels et de convertisseurs N / A. [22]

2.5.1. Harmonique généré par les onduleurs (Distorsion d'harmonique total THD)

Un harmonique est un signal parasite de fréquence multiple du fondamentale, provient essentiellement des charges non linéaires.

Le taux de distorsion, encore appelé distorsion harmonique totale est défini comme le rapport de la valeur efficace globale des harmoniques à la valeur efficace de la composante fondamentale. Il peut s'appliquer soit au courant ou à la tension.

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_1^N H_{2n+1}^2}{f_1^2}} \quad (2.3)$$

2.5.2. Techniques de commande de l'onduleur

La manière d'élaborer des signaux de commande et ces fonctions logiques dépend de la stratégie et technique de commande de l'onduleur. Il s'agit d'imposer des courants désirés dans les enroulements de la machine ou les tensions à ses bornes.

Pour cela, trois stratégies de commande sont adoptées :

- Commande symétrique
- Commande décalée
- Commande MLI sinus-triangle
- Commande MLI précalculée

Notons que chaque commande à ses avantages et inconvénients du fonctionnement, nous citons les inconvénients principales suivantes :

- Des pertes magnétiques et joules supplémentaires.
- Les perturbations mécaniques sont gênantes dans beaucoup d'applications où le couple à basse vitesse doit être contrôlé avec précision (robotique, machines-outils).

Les harmoniques du courant d'alimentation polluent le réseau d'alimentation.

Mais l'objectif d'utiliser ces commandes c'est pour :

- Obtenir dans la charge électrique des courants dont la variation est proche de la sinusoïde par le contrôle de l'évolution des rapports cycliques et grâce à une fréquence élevée de commutations des interrupteurs par rapport à la fréquence des tensions de sortie.

- Permettre un contrôle fin de l'amplitude du fondamental des tensions de sortie généralement sur la plus grande plage possible et pour une fréquence de sortie largement variable.[23]

2.6. Techniques de commandes appliquées à la commande d'onduleurs

2.6.1. Commande symétrique

Lorsque la séquence de commande de fermeture d'un interrupteur coïncide avec la commutation d'ouverture de l'interrupteur situé sur le même bras, on parle dans ce cas, d'un onduleur de type 180° , Figure 2.5.

Pour le premier bras de l'onduleur, l'interrupteur K_1 est fermé pendant une demi-période (180°), et K'_1 est fermé pendant l'autre demi de la période. Pour les deux autres bras de l'onduleur, on applique la même procédure, mais avec un décalage de $2\pi/3$ et $4\pi/3$ par rapport au premier bras.

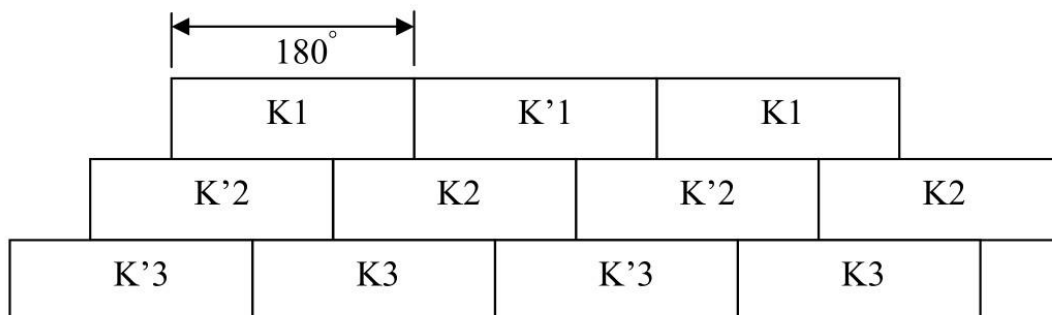


Figure 2.5 : Commande en pleine d'onde (symétrique)

En appliquant ce type de commande pour l'onduleur, on obtient un système de tensions alternatives triphasées caractérisées par l'absence des harmoniques de rangs multiples de trois.

2.6.2. Commande décalée

Dans ce cas, la Figure 2.6, la commande de fermeture d'un interrupteur ne coïncide plus avec la commande d'ouverture de l'interrupteur placé sur le même bras, on parle dans ce cas d'un onduleur de type 120°.

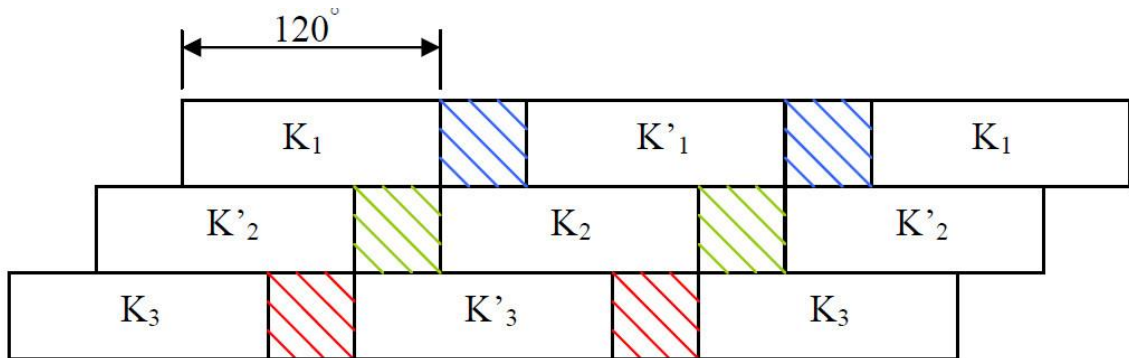


Figure 2.6 : commande décalée

Avec cette technique de commande, Chaque interrupteur fonctionne pendant 120°, telle que la séquence est K₁, K₂ puis K₃ successivement. De même pour les interrupteurs K'₁, K'₂ et K'₃ avec un décalage de 60° par rapport à K₁, K₂, K₃. [24]

2.6.3. Commande MLI sinus-triangle

Cette stratégie est héritée des techniques analogiques. Elle consiste à calculer la largeur d'une impulsion de manière à obtenir la tension de référence en moyenne sur une période de commutation. Elle repose sur la génération des signaux de commande en comparant deux ondes ; la première triangulaire d'amplitude fixe et de fréquence très élevée ; appelée porteuse ou onde de modulation. La deuxième sinusoïdale d'amplitude variable et de fréquence f qui détermine la fréquence de la tension de sortie ; appelée référence, comme la figure 2.7 présente. Les instants de commutation sont déterminés par l'intersection de ces deux signaux. Le réglage en amplitude et en fréquence de la tension de sortie de l'onduleur est défini par le coefficient de réglage en tension (représentant le rapport de l'amplitude de la tension de référence à la valeur crête de la porteuse), et l'indice de modulation (donnant le rapport des fréquences de la porteuse et de la référence). [24]

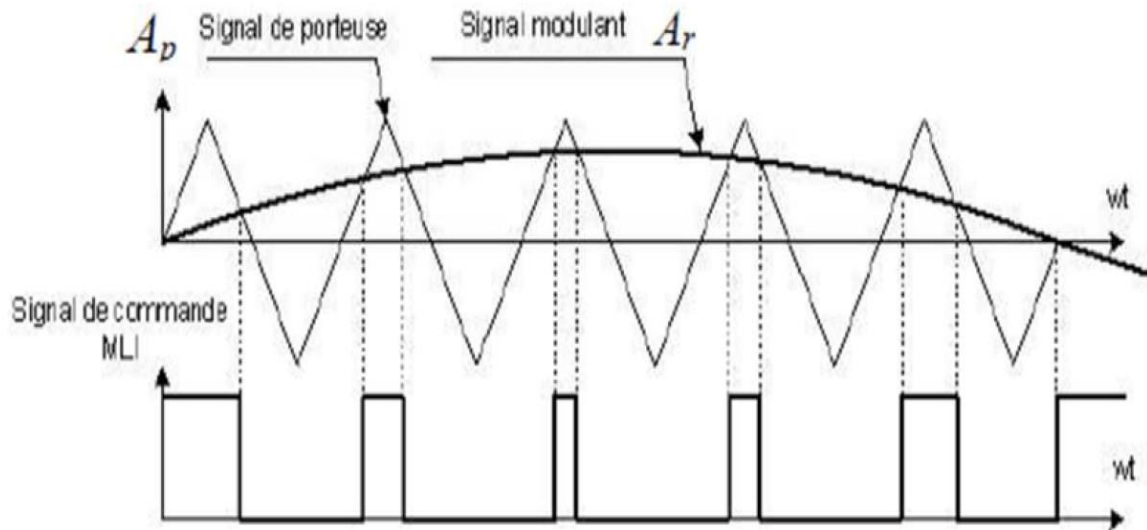


Figure 2.7 : Commande MLI sinus-triangle.[25]

2.6.4. MLI à angles pré-calculés (MLI sélective)

La technique de modulation SHE (en anglais Selective Harmonic Elimination) consiste à calculer les instants de commutation des interrupteurs de manière à répondre à certains critères portant sur le spectre fréquentiel de l'onde délivrée par l'onduleur et contrôler simultanément la tension fondamentale et les harmoniques en agissant sur la forme de l'onde, c'est-à-dire sur les angles. [26]

On dispose de $2N$ angles tel que $0 \leq \theta_k \leq \theta_{k-1} \leq \frac{\pi}{2} \quad \forall k \in N \text{ et } 0 \leq k \leq 2N$

Avec k : le nombre d'angle, θ : angle de commutation.

Les critères usuellement retenus sont :

- Élimination d'harmoniques de rangs spécifiés,
- Élimination d'harmoniques dans une bande spécifiée,
- Minimisation du taux harmonique global.

La technique de la MLI se caractérise par deux grandeurs :

- Le coefficient de réglage : qui est défini comme étant le rapport de l'amplitude de l'onde modulante à celle de l'onde porteuse. Il permet de déterminer l'amplitude du fondamental de l'onde de modulation de largeur d'impulsion :

$$r = \frac{A_r}{A_p} \quad (2.4)$$

Avec : A_r : Amplitude de la référence et A_p : Amplitude de la porteuse.

- L'indice de modulation : Il est défini comme étant le rapport de la fréquence de l'onde porteuse à celle de l'onde modulante :

$$m = \frac{f_p}{f_r} \quad (2.5)$$

Où f_p est La fréquence de la modulation, et f_r est la fréquence de la référence.

La modulation montre que plus « m » est grand, plus la neutralisation des harmoniques est efficace, d'autre part on cherche à obtenir une valeur de r la plus élevée possible. La modulation est dite synchrone si « m » est un nombre entier.

- Pour le choix de « m », on doit tenir compte des pertes supplémentaires pendant les commutations d'un état à l'autre. Ces pertes croissent lorsque la fréquence de modulation augmente.

- On ne pourra jamais fonctionner avec un rapport de réglage égal à « 1 », car il faut toujours laisser une durée suffisante aux intervalles de conduction et de blocage des interrupteurs d'un même bras. [27]

2.6.4.1. Principe de la MLI pré-calculée

Cette commande consiste à calculer au préalable les angles de commutation qui sont stockées dans une mémoire pour commander les semi-conducteurs de l'onduleur.

Cette technique de modulation, est très efficace et très importante pour la commande des onduleurs à deux niveaux afin d'améliorer beaucoup plus la qualité de leurs tensions de sortie. Elle consiste à former l'onde de sortie de l'onduleur d'une succession de créneaux de largeurs variables. Cette onde est caractérisée par le nombre de créneaux ou d'impulsions par alternance. Les angles de commutation sont déterminés de telle façon à éliminer certains harmoniques qui sont les plus gênants et donc indésirables pour le fonctionnement des charges telles que les moteurs électriques.[27]

Les harmoniques impaires multiples de trois ($2k+1, \forall k \in N$) méritent une attention particulière. On élimine souvent les harmoniques 5, 7, 11 ... [et non les harmoniques 3, 9, 15 ... La raison est que les harmoniques de rang $h=3k$ d'un système triphasé coïncident en phase et en temps. Donc pour un couplage triangle, les tensions composées $V_{12}(t)$, $V_{23}(t)$ et $V_{31}(t)$ ne contiendront pas les harmoniques impaires multiples de trois même si les tensions simples les contiennent, bien sûr, à condition que l'on soit dans un régime équilibré.

La modulation calculée est caractérisée par k angles électriques notés α_k , qui permettent :

- Soit d'annuler k harmoniques
- Soit d'annuler k-1 harmoniques et de fixer l'amplitude de la fondamentale.

Généralement, on utilise une onde qui présente une symétrie par rapport au quart de période puis, déduire les autres angles par symétrie. La figure 2.8, nous montre après décomposition en série de fourrier d'un signal MLI symétrique par rapport au quart de période et antisymétrique par rapport à la demi période l'existence d'harmoniques d'ordre impaires.

Les angles de commutations $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_c, \alpha_{c+1}$ nous permettent, en les contrôlant, d'éliminer les harmoniques et de contrôler la fondamentale. [27]

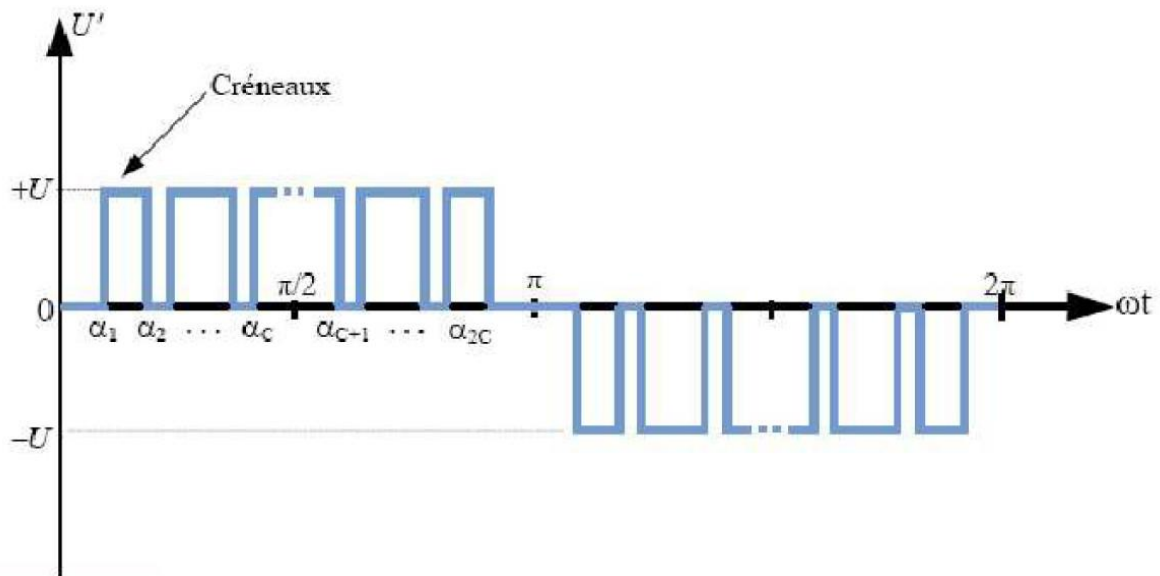


Figure 2.8 : Angles de la MLI pré-calculée.

Considérons que la forme d'onde est périodique et symétrique impair en quart d'onde, c'est-à-dire, la transformée de fourrier d'un signal alternatif périodique est donnée par :

$$U(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \sin(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \quad (3.6)$$

Les coefficients a_n et b_n sont donnés par les relations suivantes :

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(t) \cos(n\omega t) dt \quad (2.7)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(t) \sin(n\omega t) dt \quad (2.8)$$

Pour un signal périodique avec une symétrie sur le quart de période et une antisymétrie sur la demi-période, on a :

$$\begin{aligned} a_0 &= 0 \\ a_n &= 0 \\ b_n &= \frac{4}{\pi} \int_0^{2\pi} u(t) \sin(n\omega t) dt \end{aligned} \quad (2.9)$$

Si on suppose que le signal $U(t)$ a une amplitude E égal à ± 1 alors b_n sera égal à :

$$\begin{aligned}
b_n = & \int_0^{\alpha_1} (+1) \sin(nwt) dt + \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} (-1) \sin(nwt) dt \\
& + \int_{\alpha_2}^{\alpha_3} (+1) \sin(nwt) dt + \int_{\alpha_{k-1}}^{\alpha_k} (-1)^{k-1} \sin(nwt) dt \\
& + \int_{\alpha_k}^{\frac{\pi}{2}} (-1)^k \sin(nwt) dt
\end{aligned} \tag{2.10}$$

Et en utilisant l'expression suivante :

$$\int_0^{\alpha_1} (+1) \sin(nwt) dt = \frac{1}{n} (1 - \cos(n\alpha_1)) \tag{2.11}$$

$$\int_{\alpha_k}^{\frac{\pi}{2}} (-1)^k \sin(nwt) dt = \frac{1}{n} (-1)^k \cos(n\alpha_k) \tag{2.12}$$

En intégrant les autres termes de l'équation (2.10) et en substituant les équations (2.11) et (2.12), on aura :

$$b_n = \frac{4}{n\pi} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^k (-1)^k \cos(n\alpha_k) \right] \tag{2.13}$$

L'équation (2.13) contient K équations à K inconnues, le fondamental peut être contrôlé et (K-1) harmoniques peuvent être éliminés.

$$U(t) = \sum_{n=1}^k \left[\frac{4}{n\pi} \left(1 + 2 \sum_{k=1}^k (-1)^k \cos(n\alpha_k) \right) \sin(nwt) \right] \tag{2.14}$$

Sachant que la valeur efficace est donnée par :

$$U(t) = \frac{b_n}{\sqrt{2}} \tag{2.15}$$

Nous obtenons le système d'équations suivant :

$$f_1(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \dots \alpha_m) = \frac{4}{\pi} \left(1 + 2 \sum_{k=1}^k (-1)^k \cos(\alpha_k) \right) = 0 \tag{2.16}$$

$$f_2(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \dots \alpha_m) = \frac{4}{5\pi} \left(1 + 2 \sum_{k=1}^k (-1)^k \cos(5\alpha_k) \right) = 0 \tag{2.17}$$

$$f_3(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \dots \alpha_m) = \frac{4}{7\pi} \left(1 + 2 \sum_{k=1}^m (-1)^k \cos(7\alpha_k) \right) = 0 \quad (2.18)$$

$$f_4(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \dots \alpha_m) = \frac{4}{n\pi} \left(1 + 2 \sum_{k=1}^m (-1)^k \cos(n\alpha_k) \right) = 0 \quad (2.19)$$

Pour résoudre ce système d'équations, on définit d'abord le vecteur $\alpha_i = [\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \dots \alpha_k]^T$ qui sera utilisé pour les itérations dans la méthode de Newton Raphson.

Avec :

$$0 \leq \alpha_1 \leq \alpha_2 \leq \dots \leq \alpha_m \leq \frac{\pi}{2} \quad (2.20)$$

La relation possède m variables inconnues $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_c, \alpha_{c+1}$, appelées angles de commutation.

Notre but est de calculer les valeurs de ces angles qui permettent d'assigner une valeur déterminée au fondamental a1 et d'annuler les amplitudes an des (m-1) premières harmoniques.

Ces équations sont non linéaires. On utilisera la méthode de Newton-Raphson pour résoudre ce système de m équations non linéaires à m inconnues.[27]

2.6.4.2. Application de la méthode de Newton Raphson pour le calcul des angles de commutation

Rappelons les équations non linéaires à résoudre pour éliminer les harmoniques 5, 7, 11 et 13 (donc cinq angles):

Principe : On cherche la valeur α_i qui annule la fonction f. la méthode de Newton-Raphson permet de rapprocher la valeur α_i au moyen de la relation suivante :

$$\alpha_{k+1} = \alpha_k - \frac{f(\alpha_k)}{f'(\alpha_k)} \quad (2.21)$$

Le choix des conditions initiales reste toujours une tâche délicate du fait que le système est non linéaire

Pour un système triphasé, les harmoniques de rang trois ou multiple de trois disparaissent.

On calcule les K angles de façon à annuler les (K-1) premiers harmoniques impairs autre que ceux de rang trois ou multiple de trois. Si on veut éliminer seulement les quatre premiers (5, 7, 11, 13).

Le système sera constitué de quatre équations à cinq variables
On obtient donc un système de m équations non linéaires à m inconnues de la forme :

$$f(1) = -\frac{4}{\pi} [1 - 2 \cos(\alpha_1) + 2 \cos(\alpha_2) - 2 \cos(\alpha_3) + 2 \cos(\alpha_4) - 2 \cos(\alpha_5)] \quad (2.22)$$

$$f(5) = -\frac{4}{5\pi} [1 - 2 \cos(5\alpha_1) + 2 \cos(5\alpha_2) - 2 \cos(5\alpha_3) + 2 \cos(5\alpha_4) - 2 \cos(5\alpha_5)] \quad (2.23)$$

$$f(7) = -\frac{4}{7\pi} [1 - 2 \cos(7\alpha_1) + 2 \cos(7\alpha_2) - 2 \cos(7\alpha_3) + 2 \cos(7\alpha_4) - 2 \cos(7\alpha_5)] \quad (2.24)$$

$$f(11) = -\frac{4}{11\pi} [1 - 2 \cos(11\alpha_1) + 2 \cos(11\alpha_2) - 2 \cos(11\alpha_3) + 2 \cos(11\alpha_4) - 2 \cos(11\alpha_5)] \quad (2.25)$$

$$f(13) = -\frac{4}{13\pi} [1 - 2 \cos(13\alpha_1) + 2 \cos(13\alpha_2) - 2 \cos(13\alpha_3) + 2 \cos(13\alpha_4) - 2 \cos(13\alpha_5)] \quad (2.26)$$

$$f(n) = -\frac{4}{n\pi} [1 - 2 \cos(n\alpha_1) + 2 \cos(n\alpha_2) - 2 \cos(n\alpha_3) + 2 \cos(n\alpha_4) - 2 \cos(n\alpha_5)] \quad (2.27)$$

Avec $f = [f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4]^T$ et $f' = J$, avec J est la matrice Jacobéenne.

La matrice Jacobéenne s'écrit :

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_1}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_1}{\partial \theta_3} & \frac{\partial f_1}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_2}{\partial \theta_3} & \frac{\partial f_2}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial f_3}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_3}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_3}{\partial \theta_3} & \frac{\partial f_3}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial f_4}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_4}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_4}{\partial \theta_3} & \frac{\partial f_4}{\partial \theta_4} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Les valeurs initiales sont déterminées graphiquement. Notons que la convergence des solutions dépend du choix de ces valeurs initiales qui doivent être proches des solutions exactes.[27]

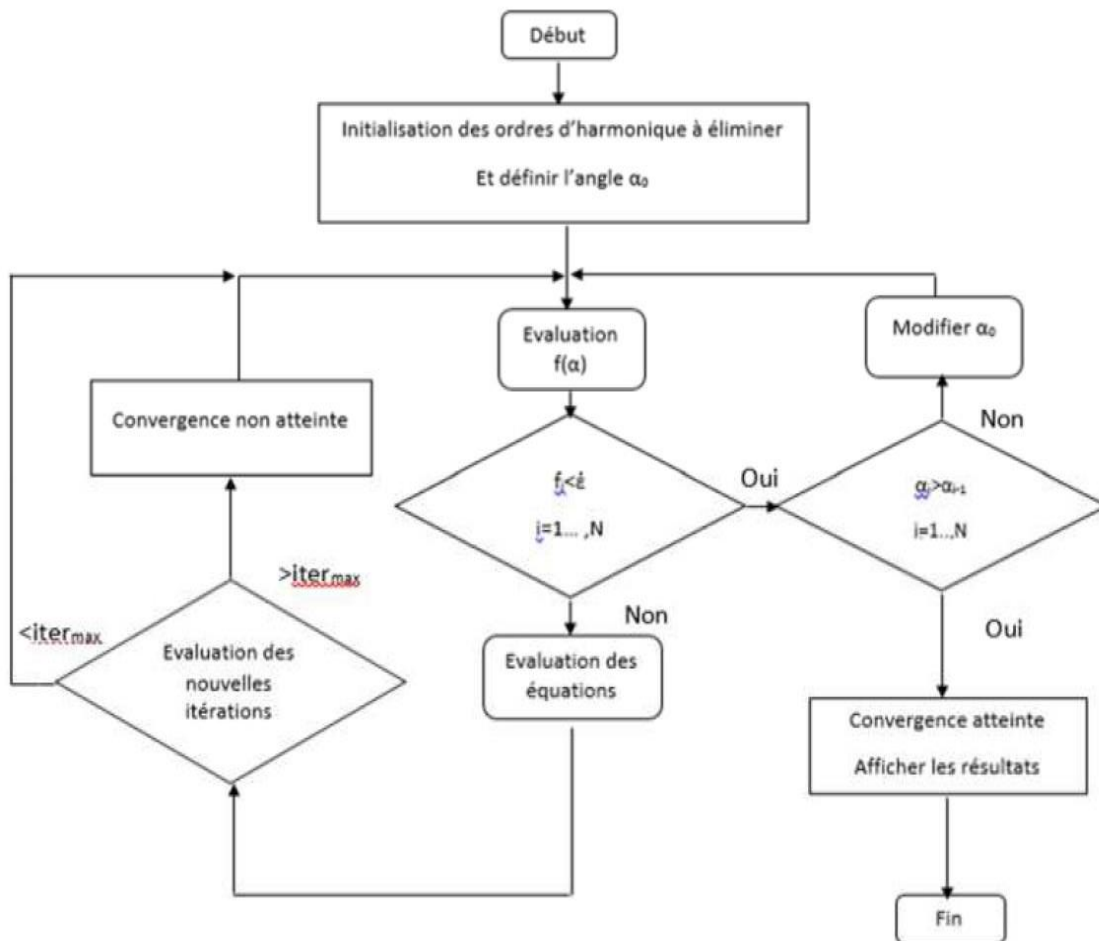


Figure 2.9 : Diagramme de résolution des équations SHE-PWM par la méthode de Newton-Raphson.[28]

2.6.4.3. Avantage de la MLI calculée

On note que la technique MLI calculée présente trois avantages suivants :

- Les instants de commande sont connus au préalable ;
- Elle permet la sélection d'harmoniques à éliminer ;
- Elle permet aussi le contrôle de l'amplitude du fondamental.

Le principal inconvénient de la technique de Newton-Raphson appliquée à la résolution des systèmes d'équations non linéaires réside dans la difficulté du choix des valeurs initiales des angles de commutation. [27]

2.6.4.4. Intérêt de la méthode de Newton-Raphson

La méthode de Newton-Raphson permet après plusieurs itérations d'approcher les solutions des équations non linéaires pour des valeurs différentes de l'indice de modulation.

Cependant, deux valeurs assez proches peuvent aboutir à des résultats similaires à défaut d'augmenter le nombre d'angles enregistrés en mémoire, en plus, elle ne peut être utilisée « en ligne ». Pour ce faire, nous proposons de chercher à minimiser les harmoniques par algorithme génétique afin de retrouver les angles obtenus par la méthode de Newton-Raphson. [27]

2.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la théorie sur les onduleurs, sa constitution physique élémentaire, son fonctionnement et leurs principales applications.

Nous avons consacré notre étude aux onduleurs de tension et principalement ceux en pont triphasé et les différentes techniques de commandes pour onduleurs triphasés (symétrique, décalé, MLI sinus-triangle et MLI sélective) puisque notre objectif est le contrôle de l'onduleur à six bras alimentant la MAS

Pour une étude comparative des différentes commandes, on s'intéressera au chapitre suivant aux simulations des techniques étudiées.

CHAPITRE 3

Simulation des commandes de l'onduleur triphasé

Chapitre 3 : Simulation des commandes de l'onduleur triphasé

3.1. Introduction

La performance des circuits est un facteur essentiel dans la conception d'un système en génie électrique. Chaque composant contribue à la performance globale d'un système. Dans le domaine de l'électronique de puissance, nous devons être très concentrés sur l'évaluation du système. Non seulement les composants, mais aussi les capacités de jonction et le bruit affectent également les formes d'onde de sortie. La simulation de circuits devient rapidement une alternative au prototypage et est désormais considérée comme une aide optionnelle à l'apprentissage de l'électronique de puissance. La simulation est un art qui consiste à convertir une conception de circuit en un modèle logiciel, puis à le tester à l'aide de stimuli d'entrée et d'une surveillance de sortie. Il peut être utilisé pour évaluer la performance de nouveaux circuits pour l'amélioration des connaissances.[29] Les défauts de n'importe quel circuit peuvent être corrigés dès le début de la conception à l'aide d'une simulation. Les nouvelles techniques peuvent être mises à l'essai à l'aide de progiciels fondés sur la simulation, ce qui permet d'économiser du temps et de l'argent et d'éviter tout risque potentiel de court-circuit entre composants de puissance. Outre sa large utilisation en milieu universitaire, les utilisateurs industriels tirent profit de la simulation en vérifiant la performance de leurs procédés. Il est préférable pour la réalisation d'études pour la nature destructive des essais de machines électriques. La simulation est un excellent moyen de révéler la logique et/ou le timing erreurs dans un circuit avant de continuer pour le prototypage.

Le but de ce chapitre est de dessiner les schémas électroniques des convertisseurs étudiés, de les simuler pour réaliser les circuits imprimés correspondant.

3.2. Simulation sur MATLAB Simulink

Le nom MATLAB signifie MATrix LABoratory. MATLAB a été écrit à l'origine pour fournir un accès facile au logiciel Matrix développé par les projets LINPACK (paquet système linéaire) et EISPACK (paquet système Eigen).

SIMULINK est disponible avec l'installation de MATLAB et, contrairement à MATLAB, il s'agit d'un logiciel basé sur un modèle, c'est-à-dire qu'il modélise le système à l'aide de blocs de construction et de petits éléments, puis simule pour analyser le modèle. C'est si simple que la réalisation d'un système n'est qu'un jeu d'enfant. Vous placez vos blocs de construction souhaités sur la page vierge du modèle, vous fixez leurs valeurs et vous connectez la sortie à un oscilloscope pour en voir l'effet. L'idée principale derrière chaque simulation est de modéliser le système. Il peut effectuer de la modélisation

mathématique ainsi que de la modélisation basée sur des composants réels. Les recherches en cours dans le domaine de l'ingénierie ont prouvé que les résultats de SIMULINK sont très prometteurs et se rapprochent trop du système réel à condition que la modélisation soit réalisée avec précision. Le modèle une fois réalisé peut être modifié avec les valeurs réelles des composants.[30]

3.2.1. Commande symétrique d'un onduleur triphasé

Chaque interrupteur conduit durant 180° .

Cette commande se résume à commander les interrupteurs K_1 , K_3 et K_5 à la fermeture pendant une demi période ($V(s)=U$) puis de commander K_4 , K_6 et K_2 durant la deuxième demi-période ($V(s)=-U$). Le schéma est le suivant :

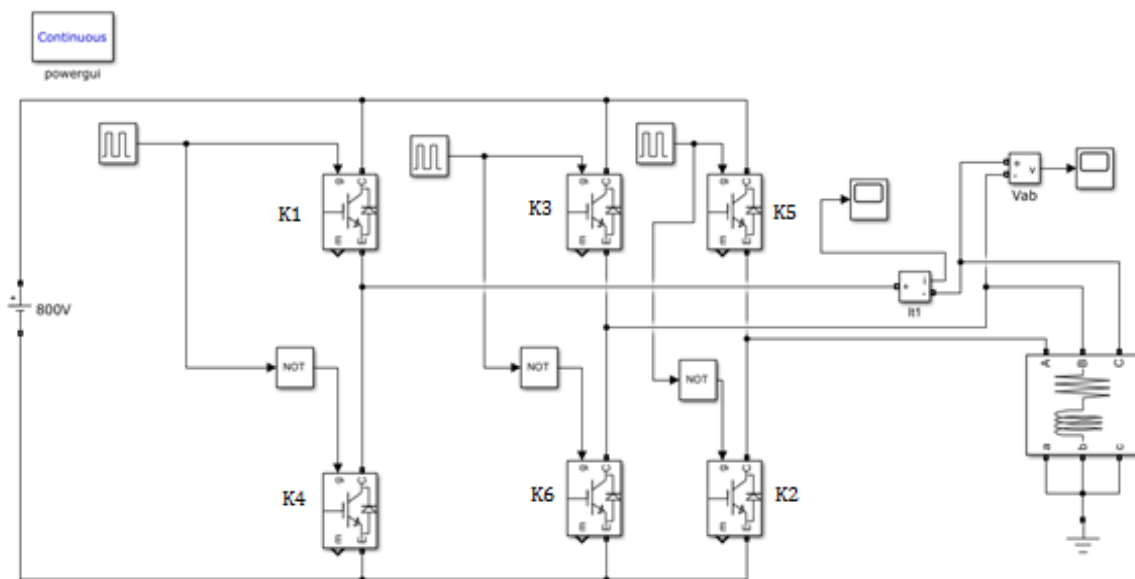


Figure 3.1 : Schéma d'un onduleur triphasé avec la commande symétrique

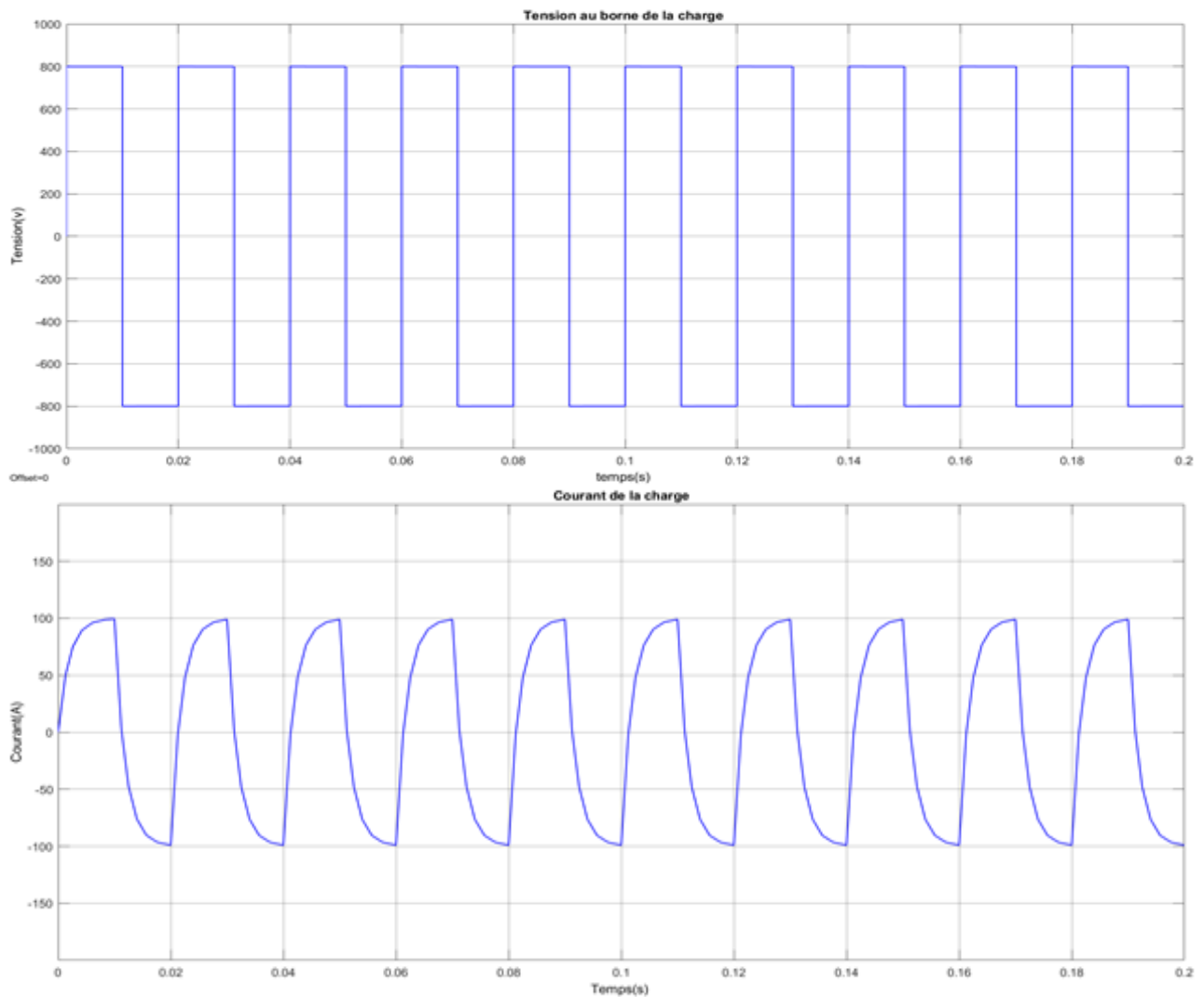


Figure 3.2 : Allure de la tension de sortie et du courant en fonction du temps

L'analyse spectrale du signal donne le taux de distorsion harmonique de la tension et du courant suivant la figure :

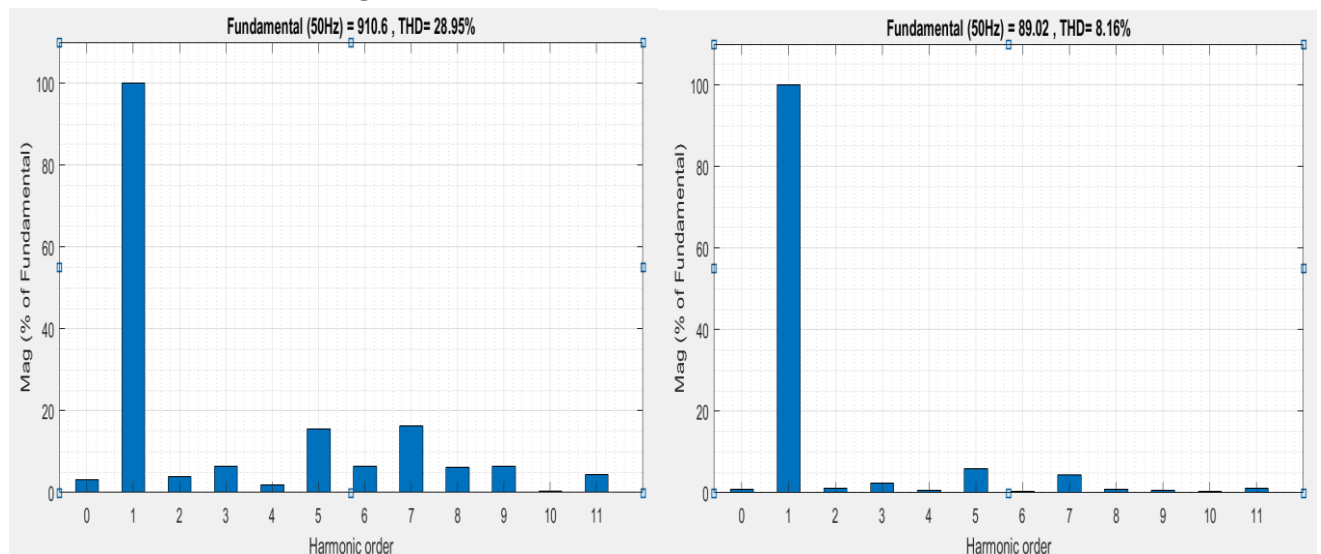


Figure 3.3 : Spectre amplitude-harmonique de la tension de sortie et du courant (charge RL)

Interprétation

La tension générée par cette stratégie à une forme quasi rectangulaire, sa décomposition en série de fourrier montre qu'elle est riche en harmoniques.

Les harmoniques de rang faible ont une amplitude très élevée ce qui influe négativement sur la distorsion du courant

Le taux de distorsion harmonique est très élevé (faible qualité d'énergie)

La représentation du spectre d'harmonique des tensions simples et composées montre la présence d'harmoniques d'ordre $2n+1$ ($n=1,2,3$).

3.2.2. Commande décalée d'un onduleur triphasé

Le but de cette commande est de fermer ou d'ouvrir les interrupteurs simultanément mais avec un certain degré de décalage (120°). Donc elle permet d'agir sur la valeur efficace et sur l'amplitude fondamentale de la tension de sortie.[24]

Le schéma de la commande décalée sur Simulink est :

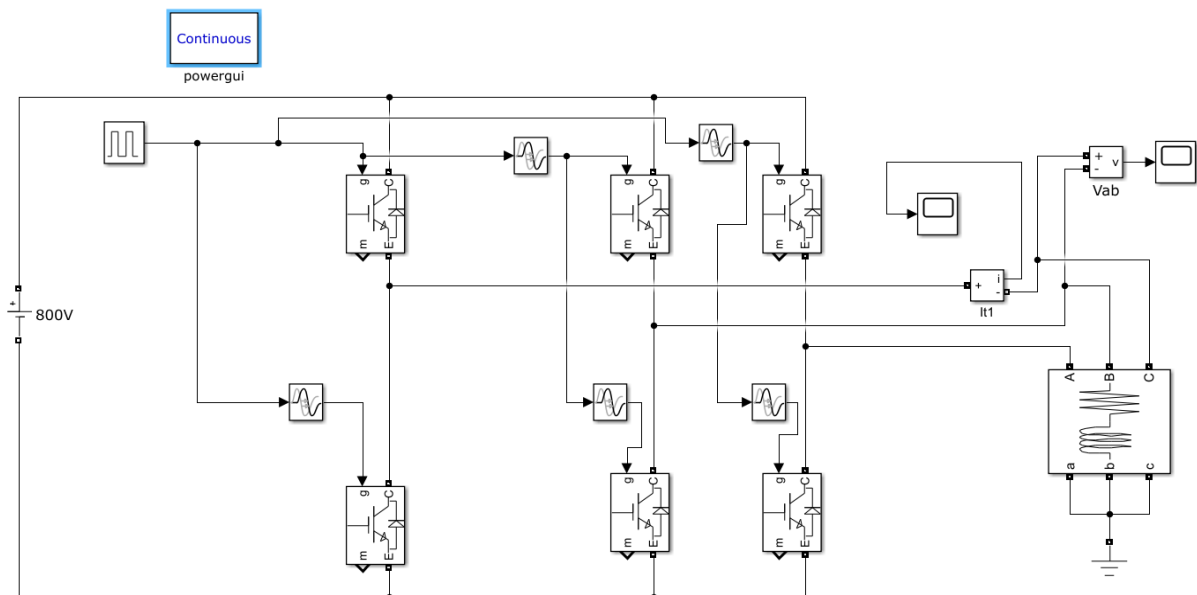


Figure 3.4 : Schéma de montage de la commande décalée avec onduleur triphasé

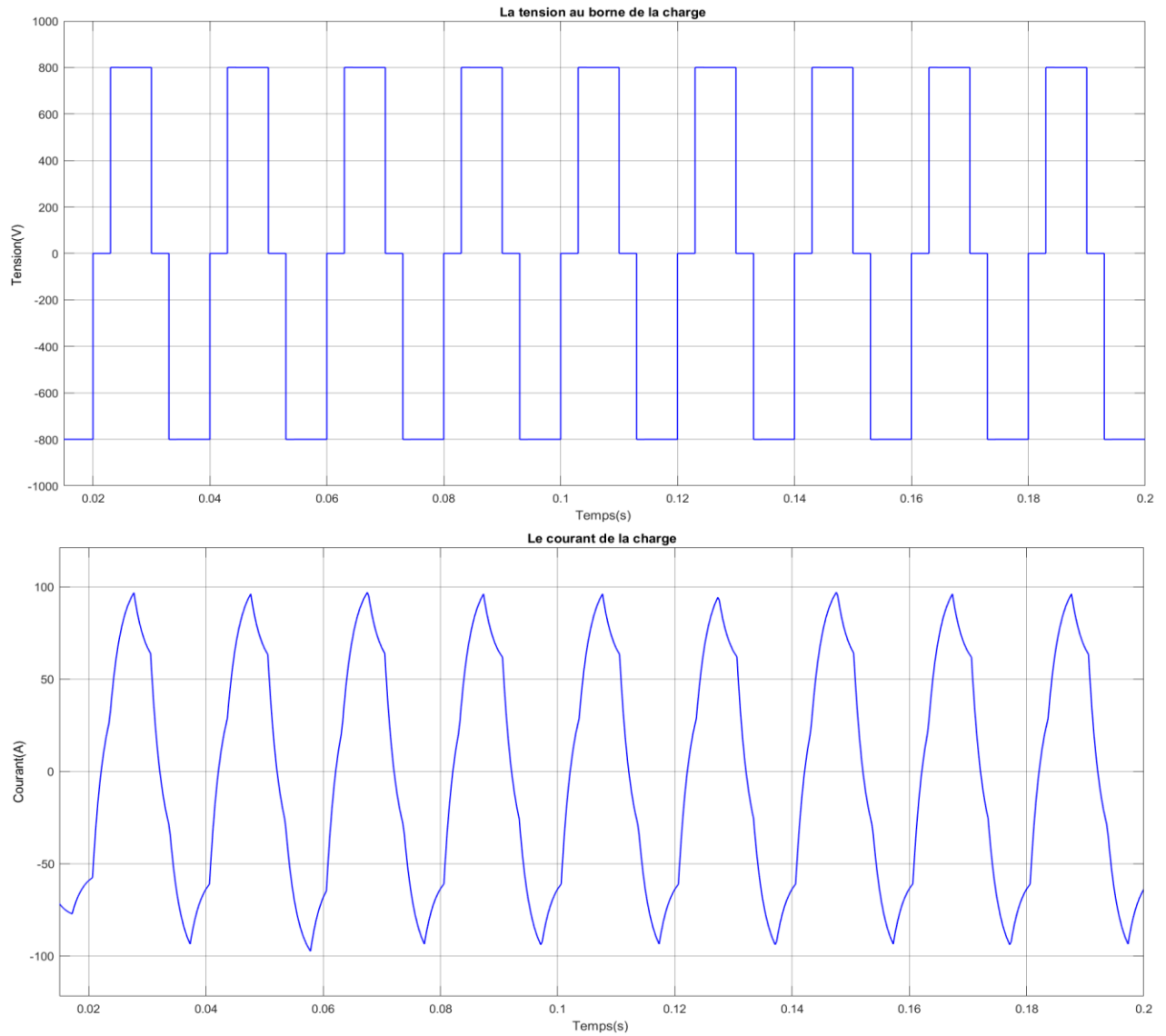


Figure 3.5 : Allure de la tension de sortie et du courant en fonction du temps

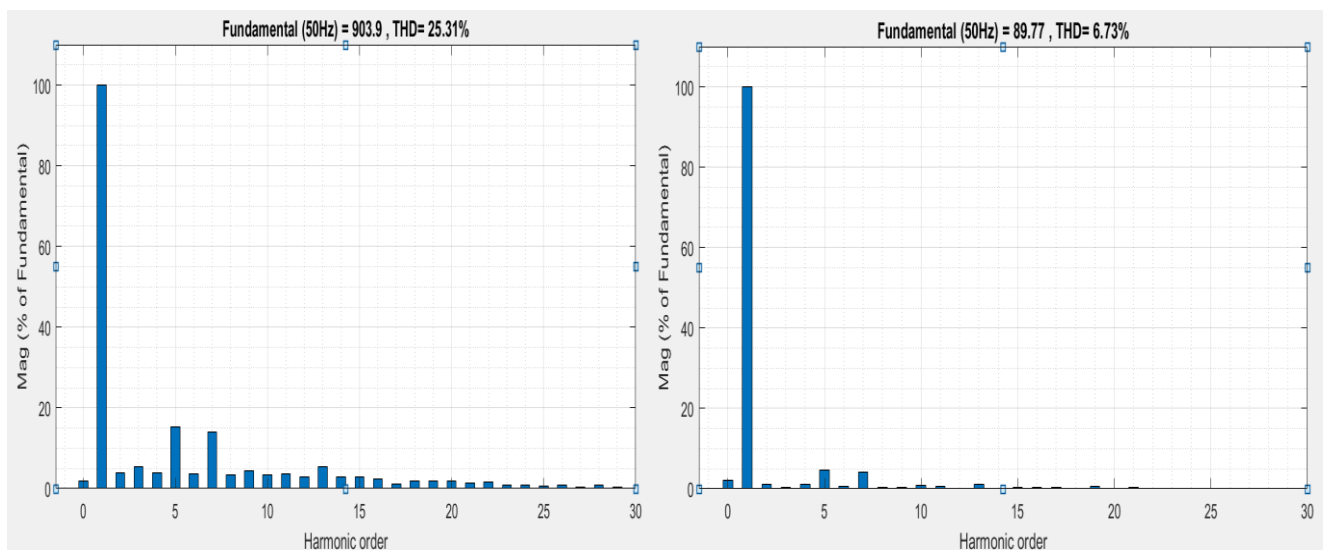


Figure 3.6 : Spectre d'harmonique de la tension de sortie et le courant (Charge RL)

Interprétation

Cette commande, plus sophistiquée dans sa conception, est une première étape vers l'obtention d'un courant sinusoïdal.

Elle est utilisée pour les charges non sensibles aux coupures brusques d'énergie. Si nous nous attachons à une analyse spectrale, nous verrions dans la commande symétrique que la tension, ainsi que le courant, sont riches en harmoniques ce qui pose des problèmes pour une utilisation avec des moteurs (pertes joules, échauffement ...).

La commande décalée permet d'éliminer une partie de ces harmoniques selon l'angle de décalage et améliore donc la qualité de signal.

Pour atténuer les harmoniques contenues dans ces ondes, et surtout les harmoniques qui sont proches de la fondamentale, on peut placer en sortie de l'onduleur un filtre ou changer carrément la commande des interrupteurs

Dans une alimentation statique alternative, le filtre est un élément d'un poids et d'un prix élevés. Ainsi donc, pour diminuer le poids et le prix du filtre, on préfère dans certains cas faire appel à des techniques d'onduleurs plus sophistiquées. Les deux techniques sont la modulation de largeur d'impulsion MLI générée par la composition de signaux sinus triangle et MLI programmée.

3.2.3. Commande MLI sinus-triangle

Les tensions obtenues aux bornes du récepteur pour les onduleurs triphasés conventionnels présentent plusieurs harmoniques. Il est donc nécessaire de chercher à se rapprocher d'une forme d'onde sinusoïdale. Pour cela on fait appel à la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI).[27]

Dans ce cas, la tension et la fréquence de sortie sont contrôlées par l'onduleur en utilisant la technique MLI.

Cette méthode consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie, et à former chaque alternance de la tension de sortie d'une succession de créneaux de largeurs convenables. On présente l'allure de courant, de tension et leur spectre d'harmoniques pour différents coefficients de modulation.

Le schéma de la technique MLI sur Simulink est le suivant :

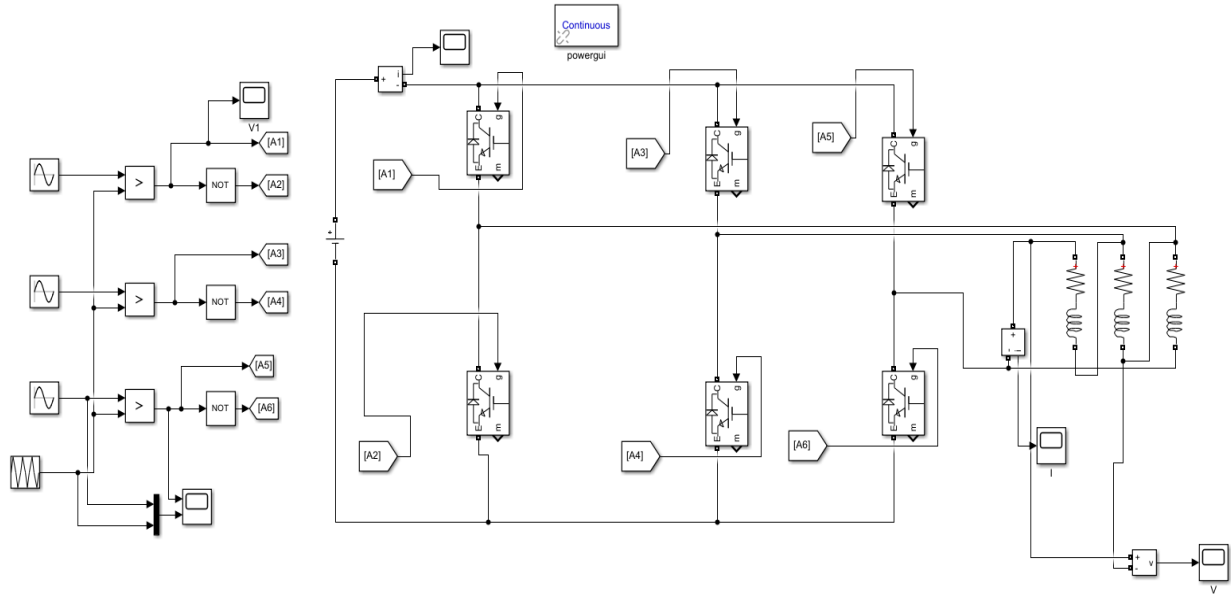


Figure 3.7 : Schéma de montage de la MLI sinus-triangle avec onduleur triphasé

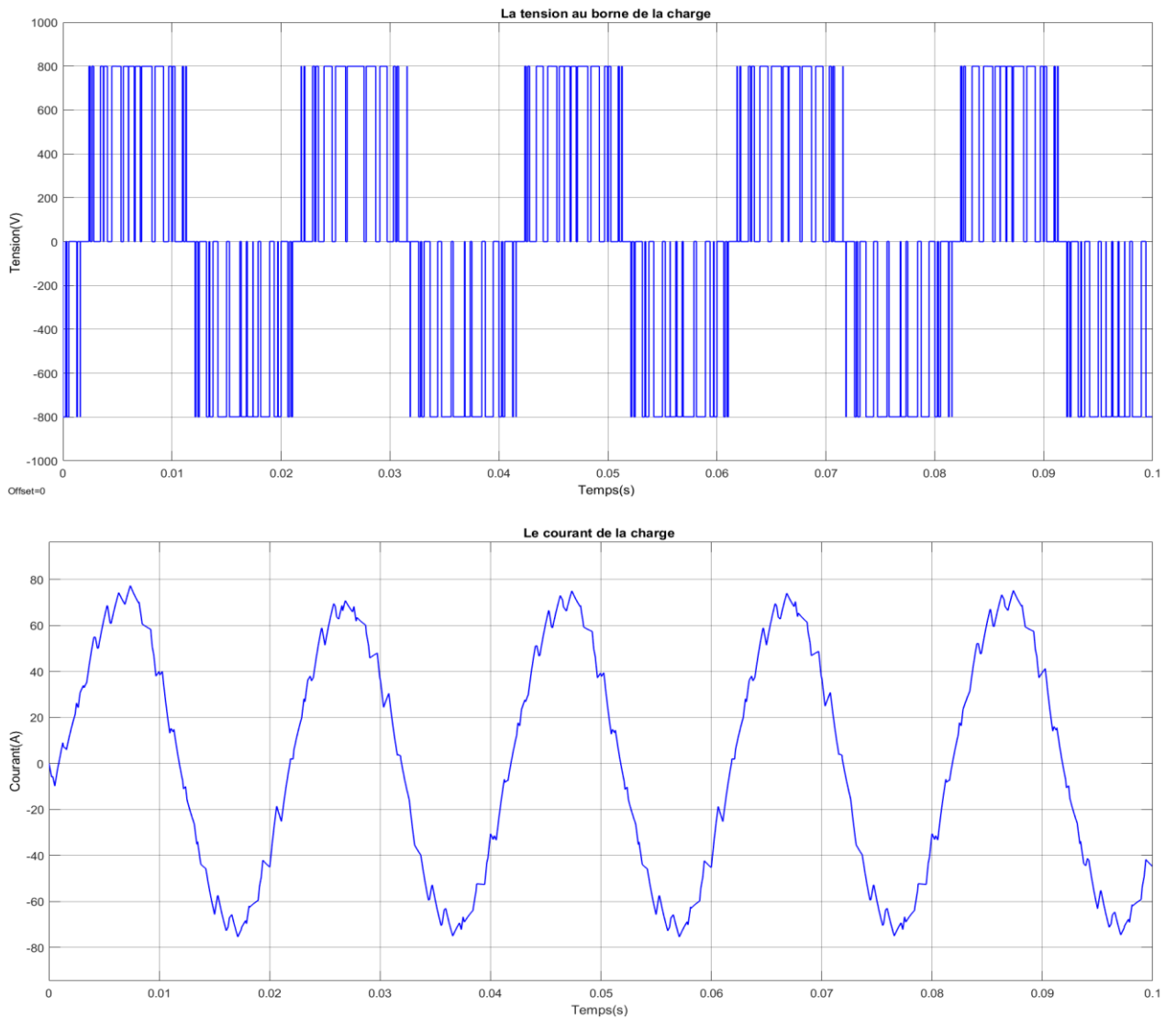


Figure 3.8 : Allure de tension de sortie et du courant en fonction du temps (M=0.7)

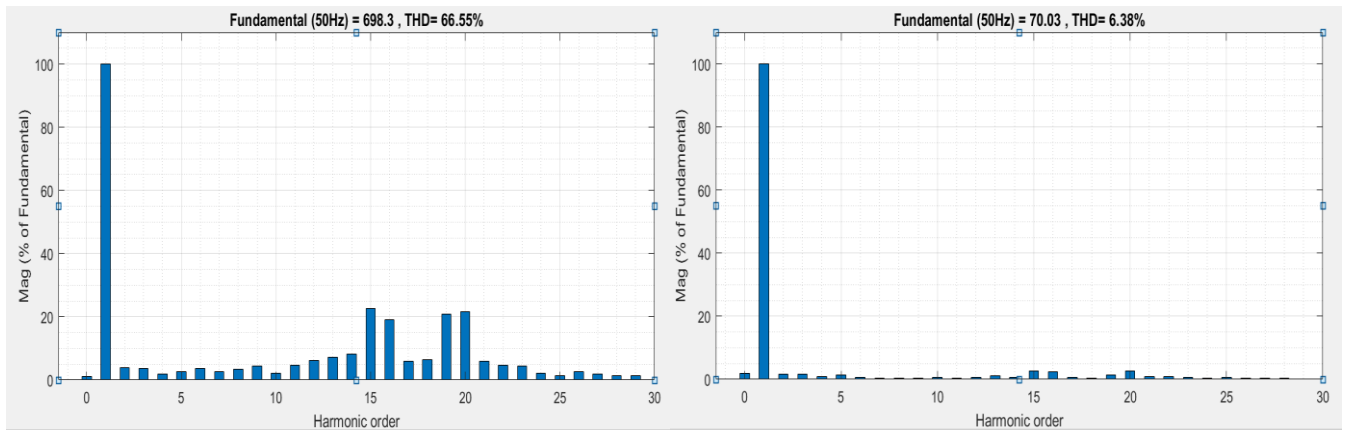


Figure 3.9 : Spectre d'harmonique de la tension de sortie et du courant (charge RL) M=0.7

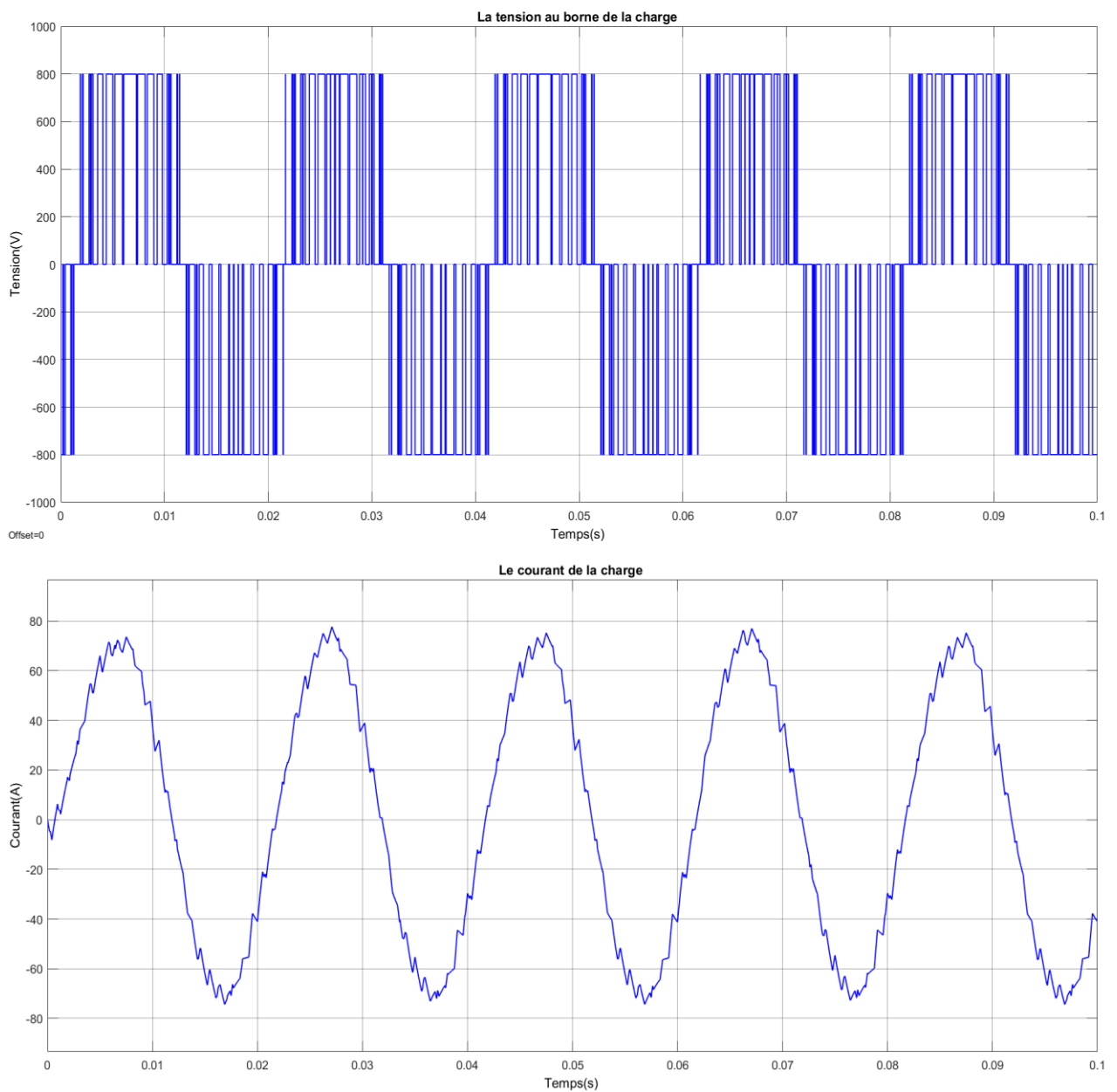


Figure 3.10 : Allure de la tension de sortie et du courant en fonction du temps (M=0.9)

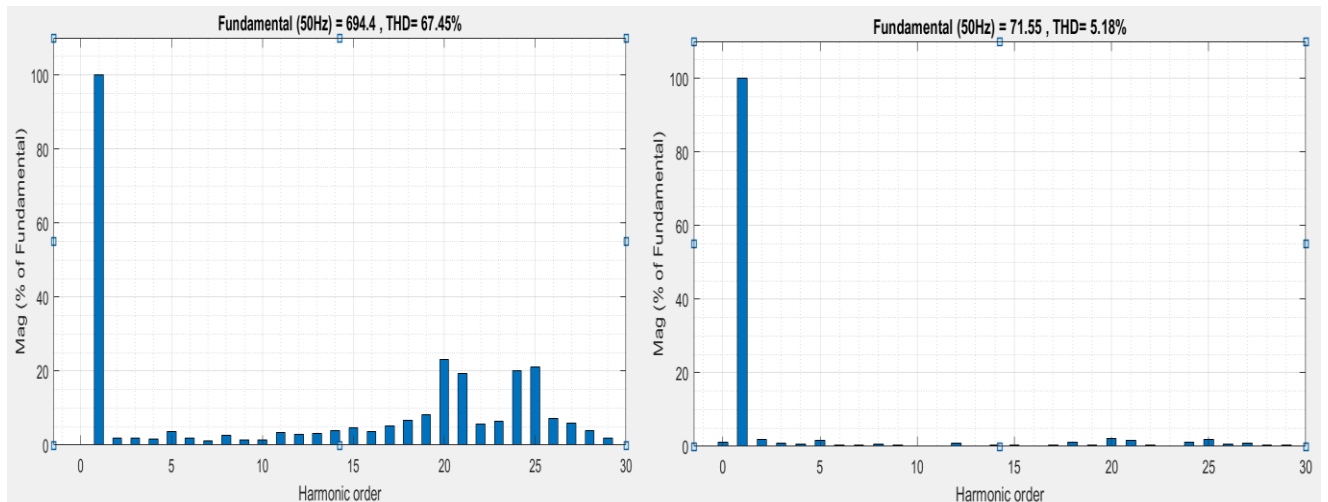


Figure 3.11 : Spectre d'harmonique de la tension du courant (charge RL) $M=0.9$

Interprétation

Pour un faible indice de modulation, les harmoniques proches de la fondamentale, 3^{ème} et 5^{ème}, sont faibles tandis que les harmoniques de rang élevé prennent une amplitude importante.

Si on augmente la fréquence d'échantillonnage, les harmoniques seront repoussées vers la haute fréquence avec l'apparition d'harmoniques proches de la fondamentale avec une faible amplitude.

L'augmentation de la fréquence de commutation améliore le THD de courant et de la tension.

Pour l'indice de modulation $M=0.9$ c'est-à-dire à $f_p=4500\text{Hz}$ la distorsion du signal du (courant-tension) diminue ce qui donne un signal proche de la sinusoïde.

On peut conclure que la technique MLI permet de :

- Repousser vers des fréquences élevées les harmoniques d'ordres inférieurs de la tension de sortie, ce que facilite le filtrage au niveau de la charge (Moteur) ;
- Elle permet de faire varier la valeur fondamentale de la tension désirée ;
- Une bonne neutralisation de l'onde de sortie ;
- Une diminution significative de THD du courant ;
- Un courant pratiquement sinusoïdal ;
- Un bon contrôle de la phase du fondamental de la tension de sortie par rapport à une référence établie par la commande ;
- Un contrôle de la valeur efficace du fondamental de la tension (phase-neutre) qui reste constante lorsque la valeur efficace du courant varie ;
- Cependant, cette technique est imparfaite. Le contenu d'harmonique généré par une onde MLI (harmonique d'ordre bas) entraîne des pertes dans le réseau (pertes fer dans le transformateur, pertes Joule dans la ligne et le convertisseur) et dans la charge (pertes Joules, fer et par courants de Foucault) ;
- Elles génèrent dans les machines tournantes des oscillations du couple, des bruits acoustiques. Elles injectent du bruit sur la commande et introduisent des non linéarités qui

peuvent déstabiliser le système. Il faut, donc, minimiser ces harmoniques. D'où la nécessité d'avoir une technique plus performante.

3.2.4. Commande MLI pré-calculée

La technique de modulation MLI pré-calculée permet d'obtenir les angles de commutation de façon préalable et convenable, tenant compte du nombre des harmoniques de faible ordre que l'on désire éliminer.[27]

La méthode utilisée pour calculer ces angles de commutation c'est la méthode de Newton-Raphson.

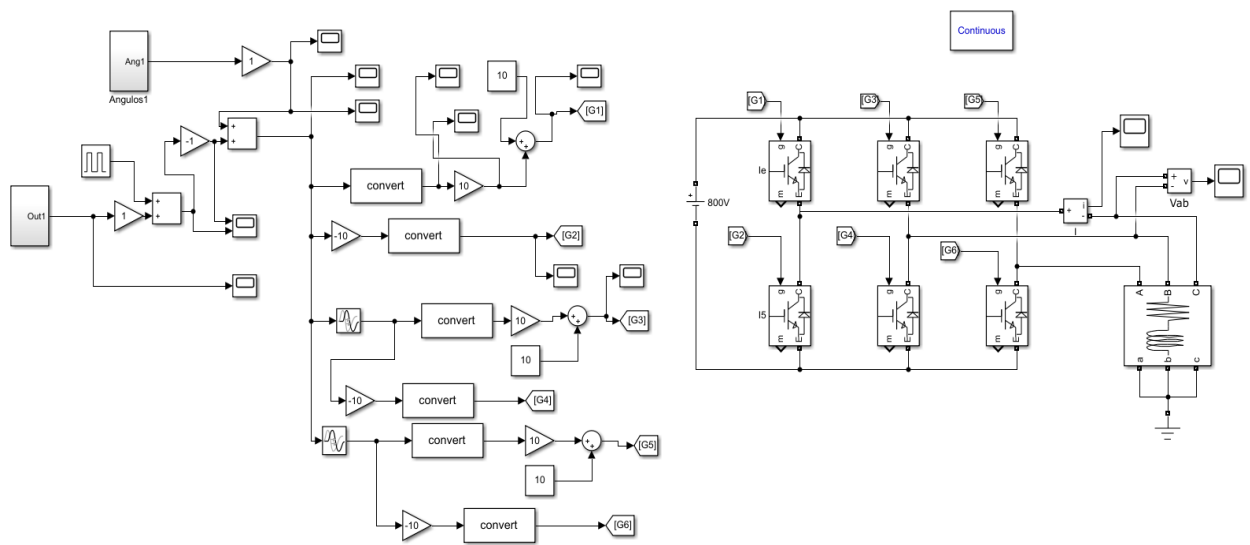


Figure 3.12 : Schéma de montage de la commande MLI pré-calculée

A. Pour 5 angles

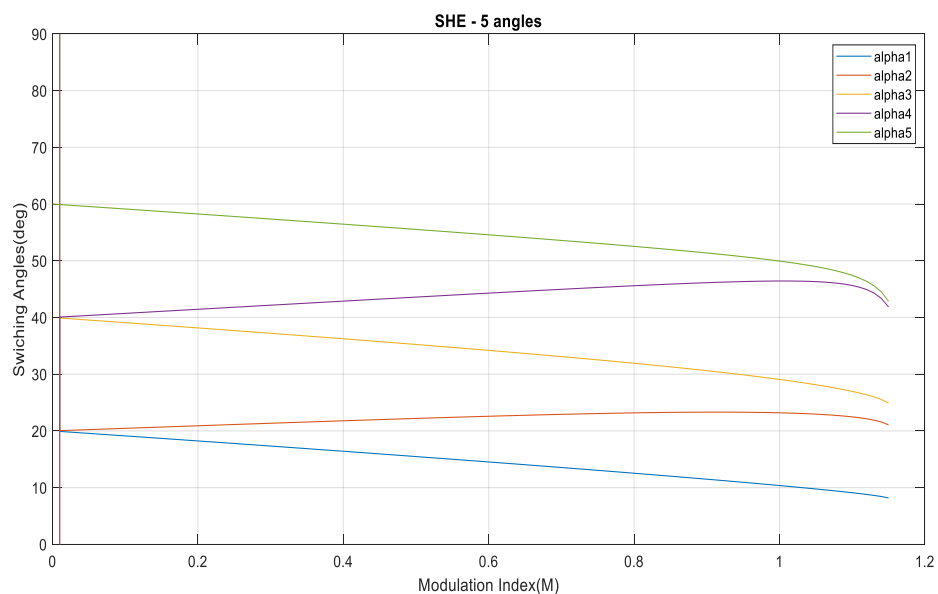


Figure 3.13 : Angles de commutation calculés en fonction de l'indice de modulation M (5 angles)

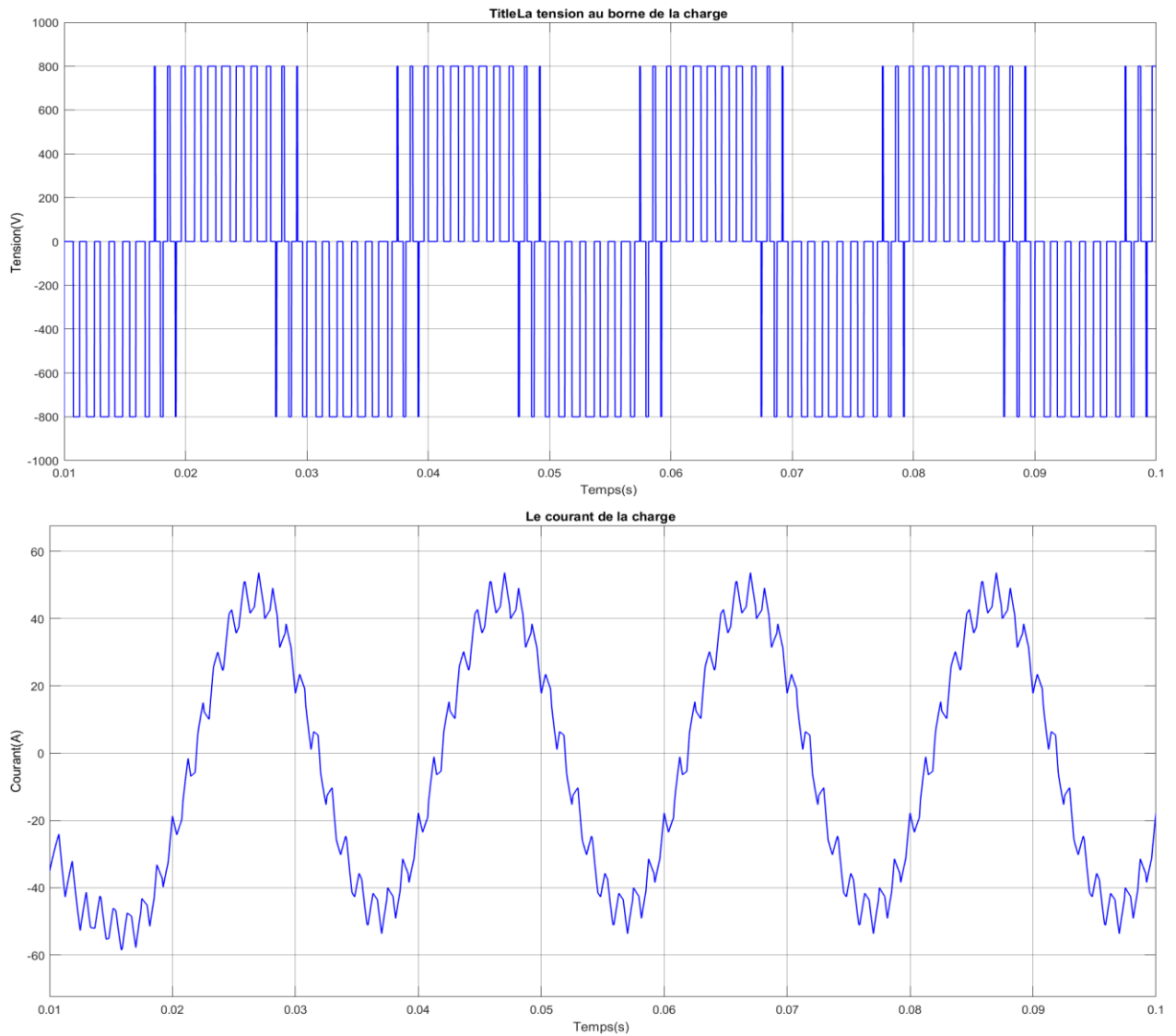


Figure 3.14 : Allure de tension de sortie et du courant en fonction du temps M=0.7

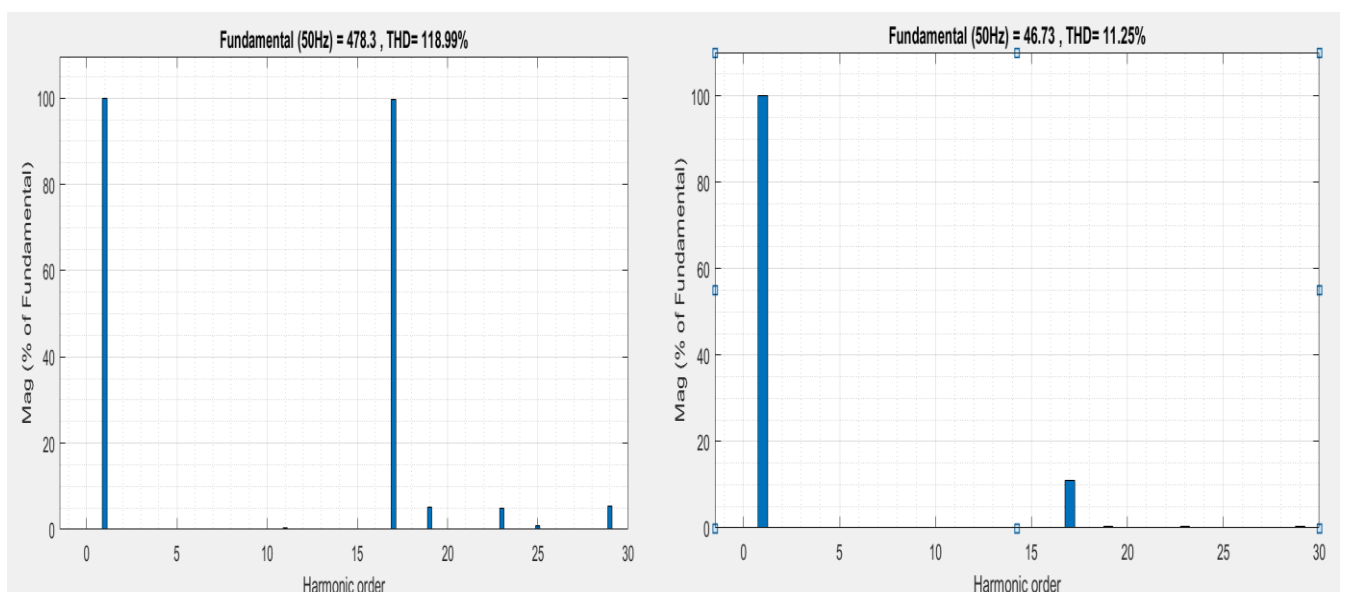


Figure 3.15 : Spectre d'harmonique de la tension de sortie et le courant (charge RL) M=0.7

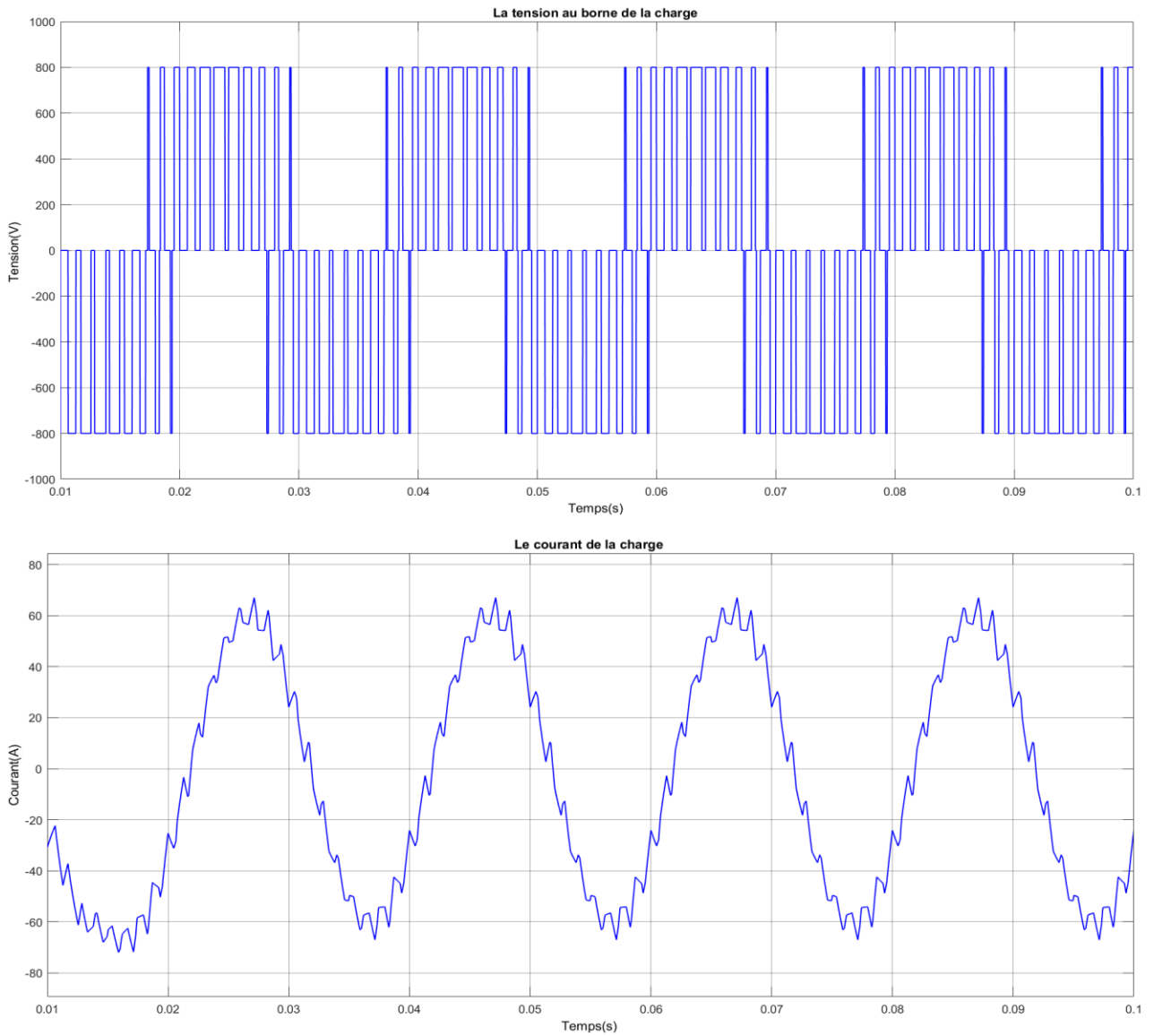


Figure 3.16 : Allure de la tension de sortie et du courant en fonction du temps M=0.9

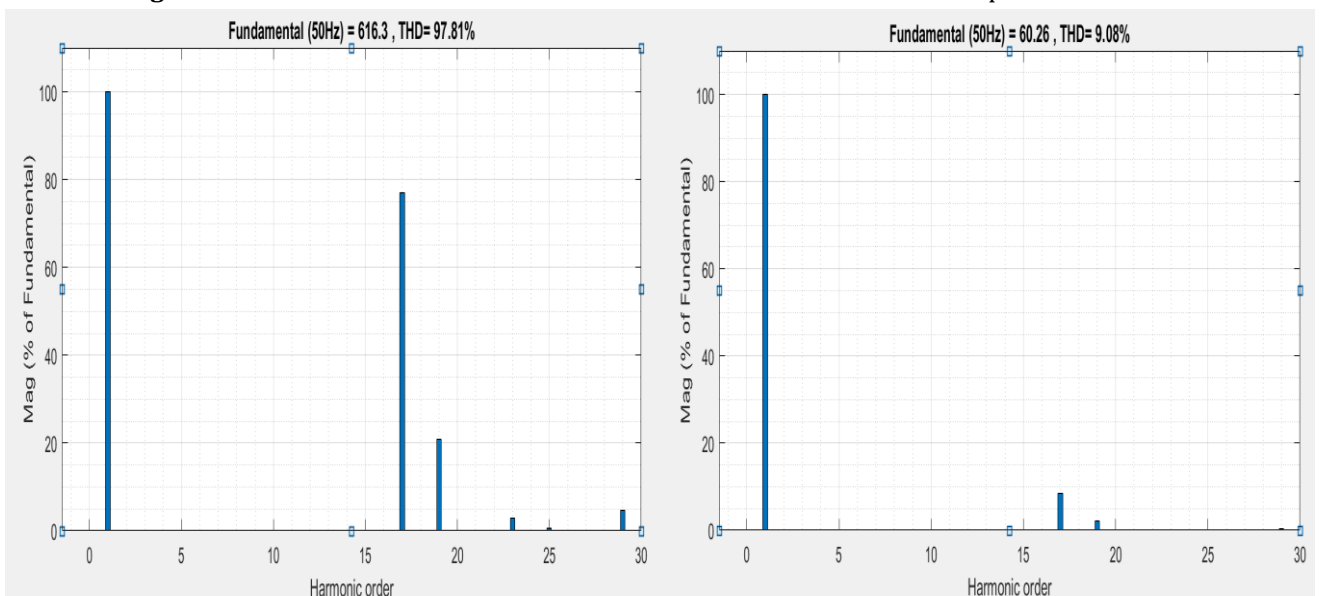


Figure 3.17 : Spectre d'harmonique de la tension de sortie et le courant (charge RL) M=0.9

Interprétation

Le spectre d'harmonique-amplitude montre l'élimination des harmoniques d'ordre faible (5, 7, 11,) avec l'apparition de la 13ème harmonique avec une amplitude élevée et un THD de tension important.

La fréquence de commutation de la MLI-SHE est faible par rapport à MLI sinus-triangle ce qui réduit les pertes par commutation des semi-conducteurs

Le filtrage de la tension minimise le THD de la tension et du courant de façon significative avec une amplitude précise du fondamental

Pour l'indice de modulation élevé cette technique donne un meilleur résultat

B. Pour 7 angles

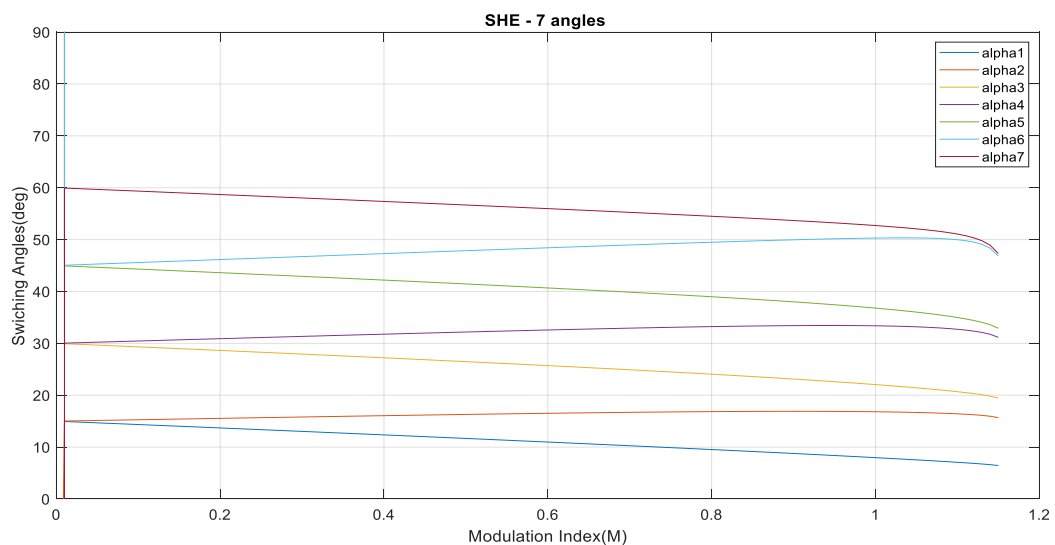


Figure 3.19 : Angles de commutation calculés en fonction de l'indice de modulation M (7 angles)

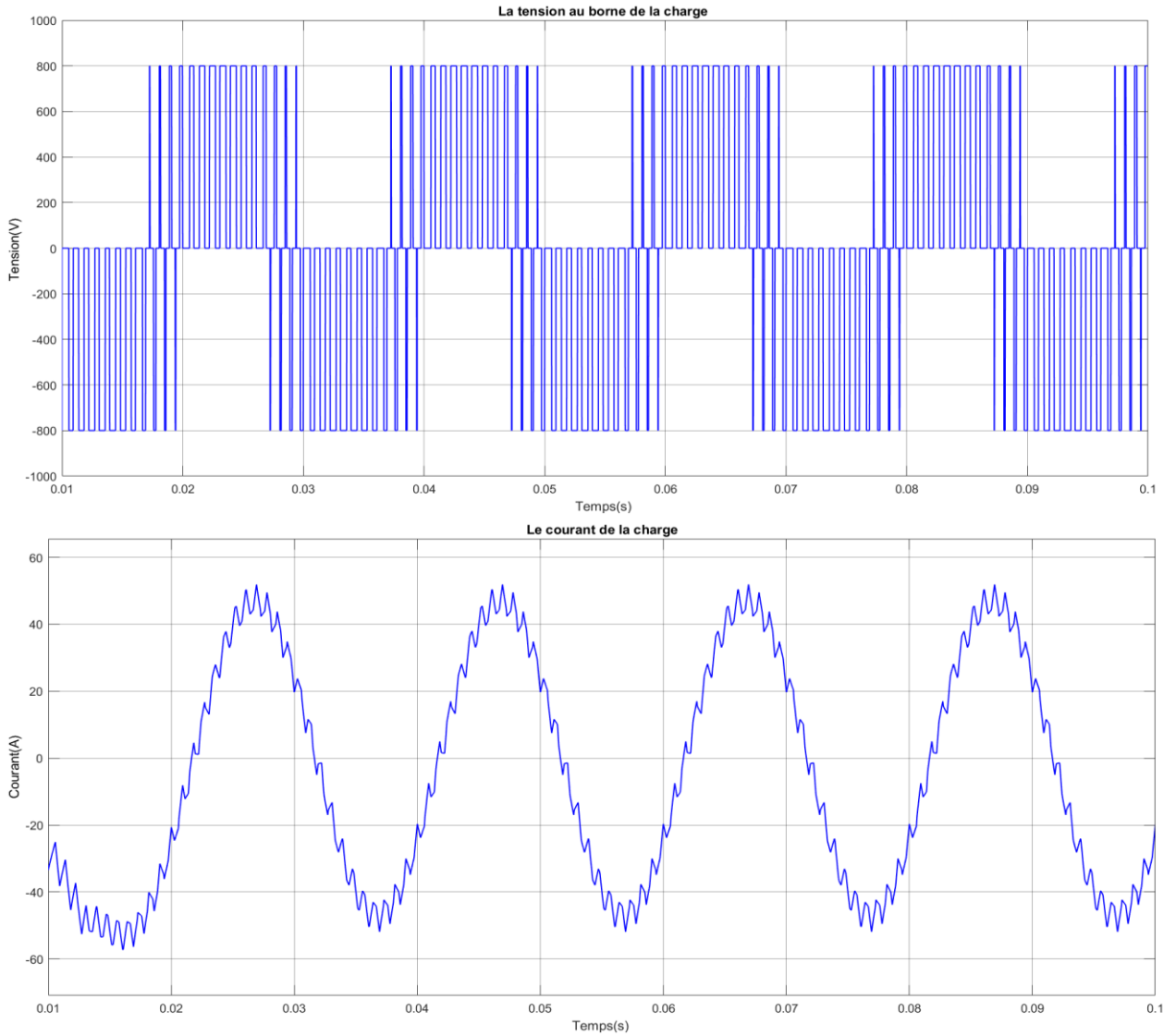


Figure 3.20 : Allure de la tension de sortie et du courant en fonction du temps M=0.7

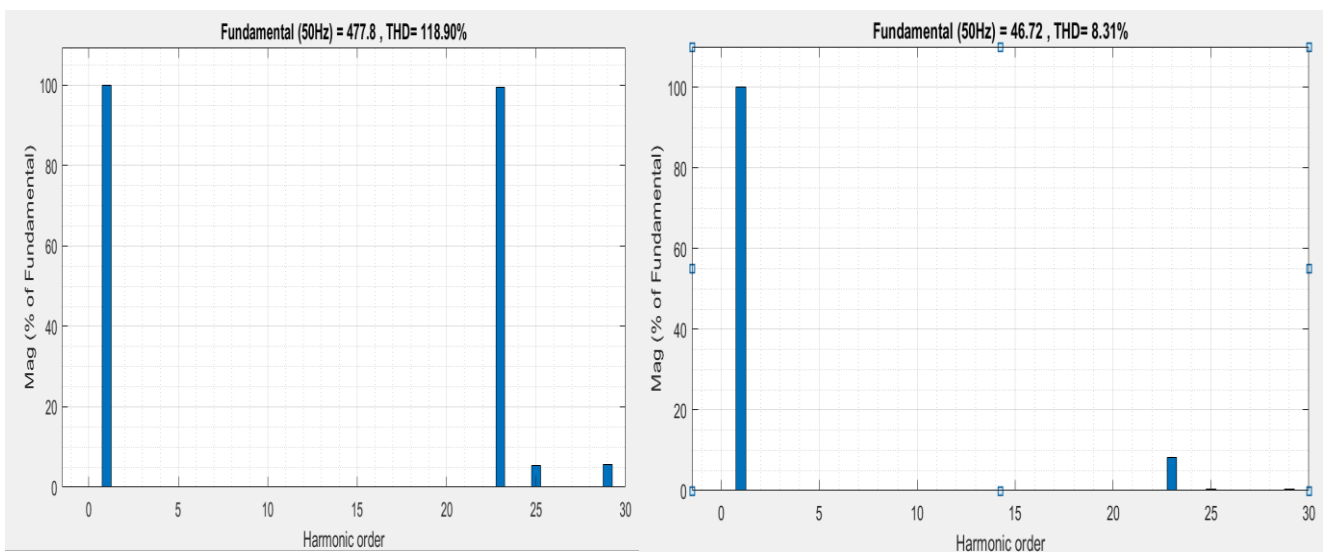


Figure 3.21 : Spectre d'harmonique de la tension de sortie et du courant (charge RL) M=0.7

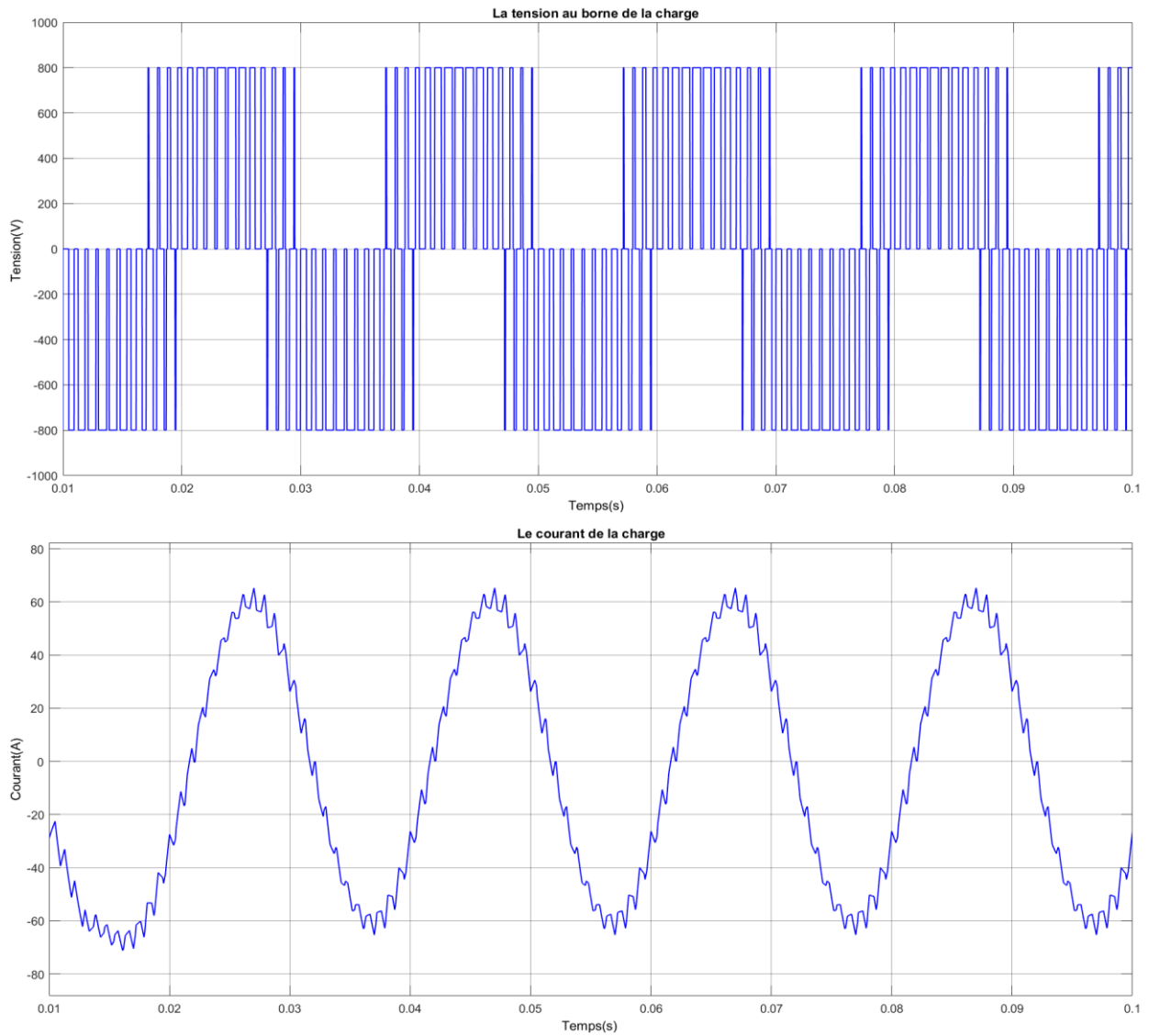


Figure 3.22 : Allure de la tension de sortie et du courant en fonction du temps $M=0.9$

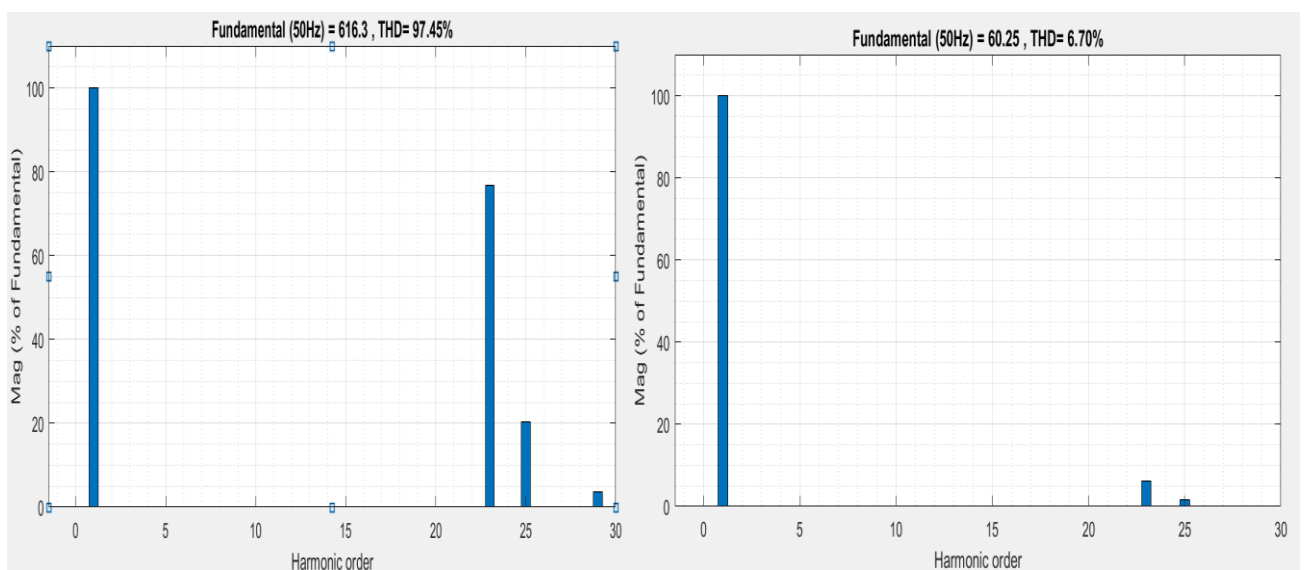


Figure 3.23 : Spectre d'harmonique de la tension de sortie et du courant (charge RL) $M=0.9$

Interprétation

Le spectre d'harmonique de la tension montre l'absence des rangs faibles jusqu'au rang 23 avec une fréquence de commutation faible 350Hz. La commande SHE-PWM (7 angles) par la méthode de Newton-Raphson élimine (5, 7, 11, 13, 17) èmes harmoniques avec un THD élevé de la tension.

C. Pour 11 angles

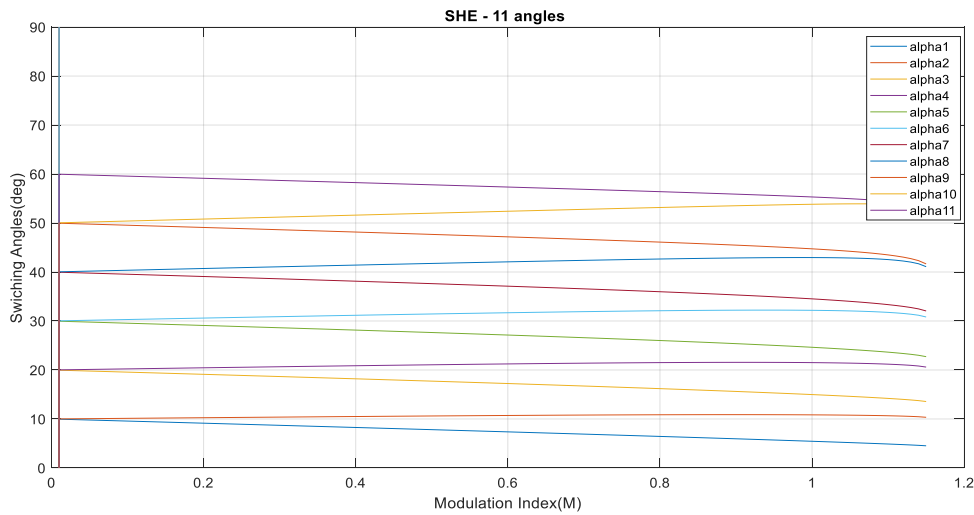


Figure 3.24 : Angles de commutation calculés en fonction de l'indice de modulation M (11 angles)

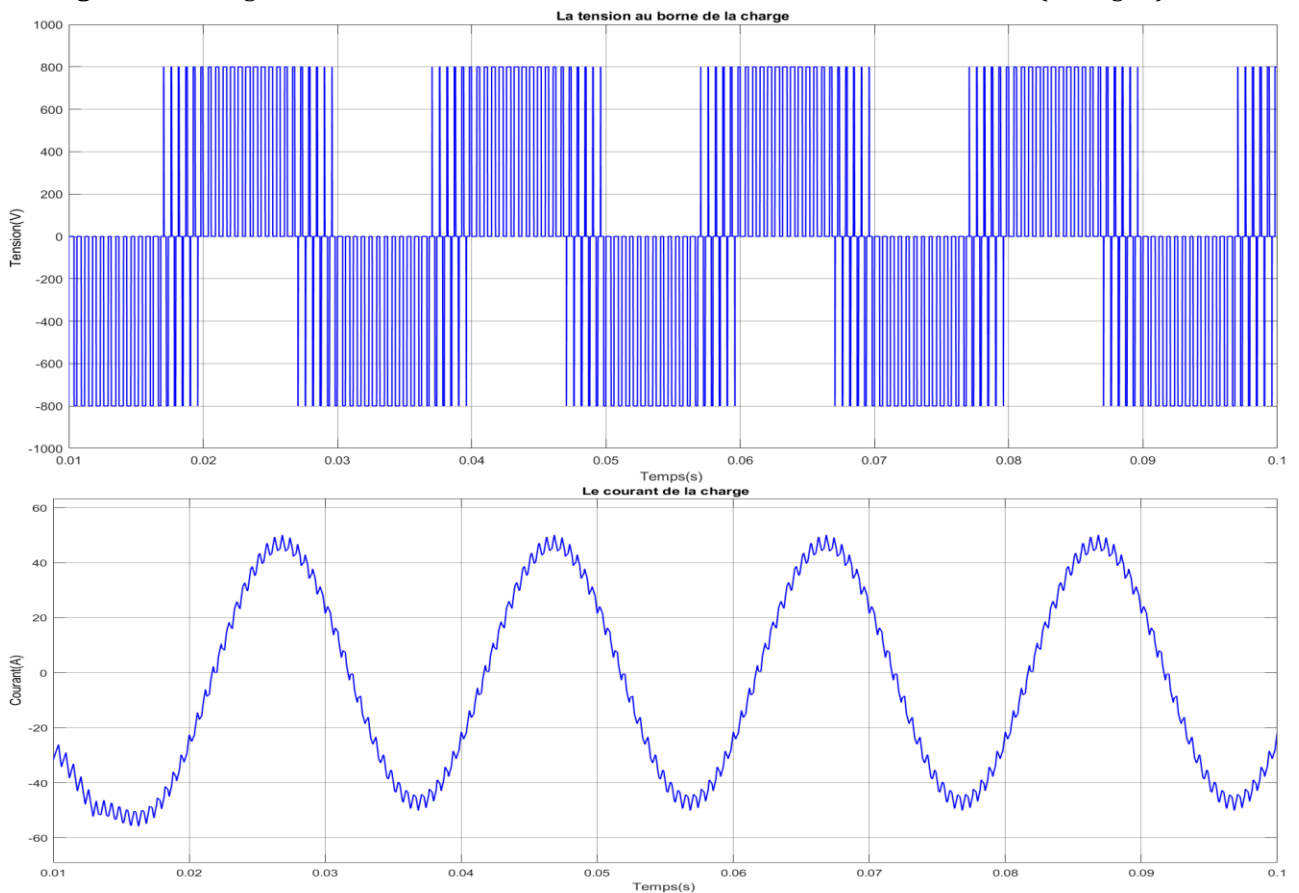


Figure 3.25 : Allure de la tension de sortie et du courant en fonction du temps M=0.7

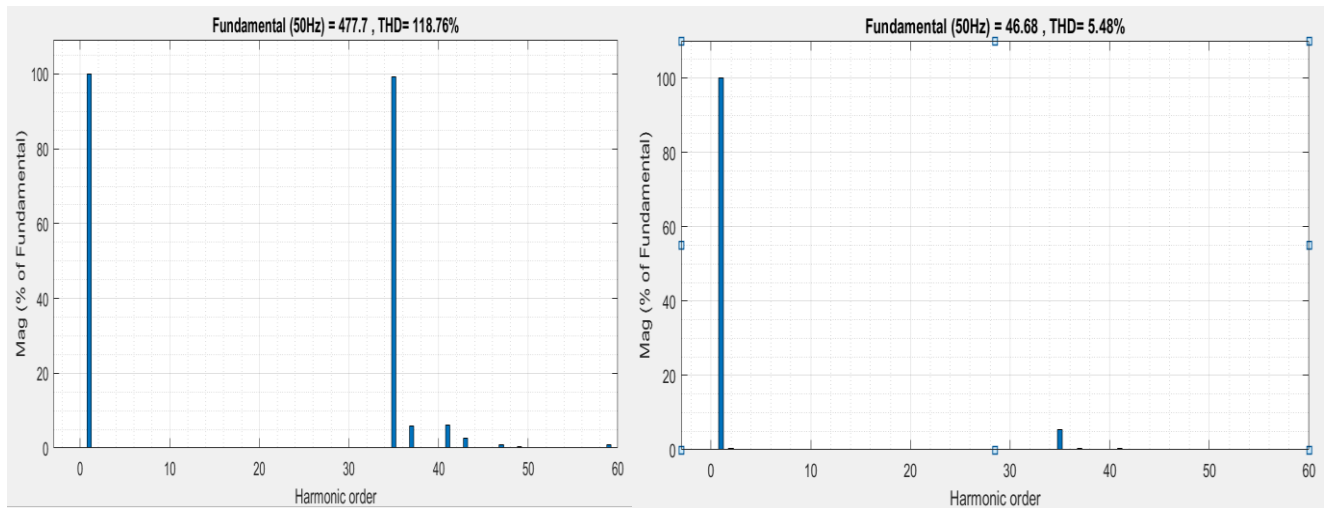


Figure 3.26 : Spectre d'harmonique de la tension de sortie et du courant (charge RL) M=0.7

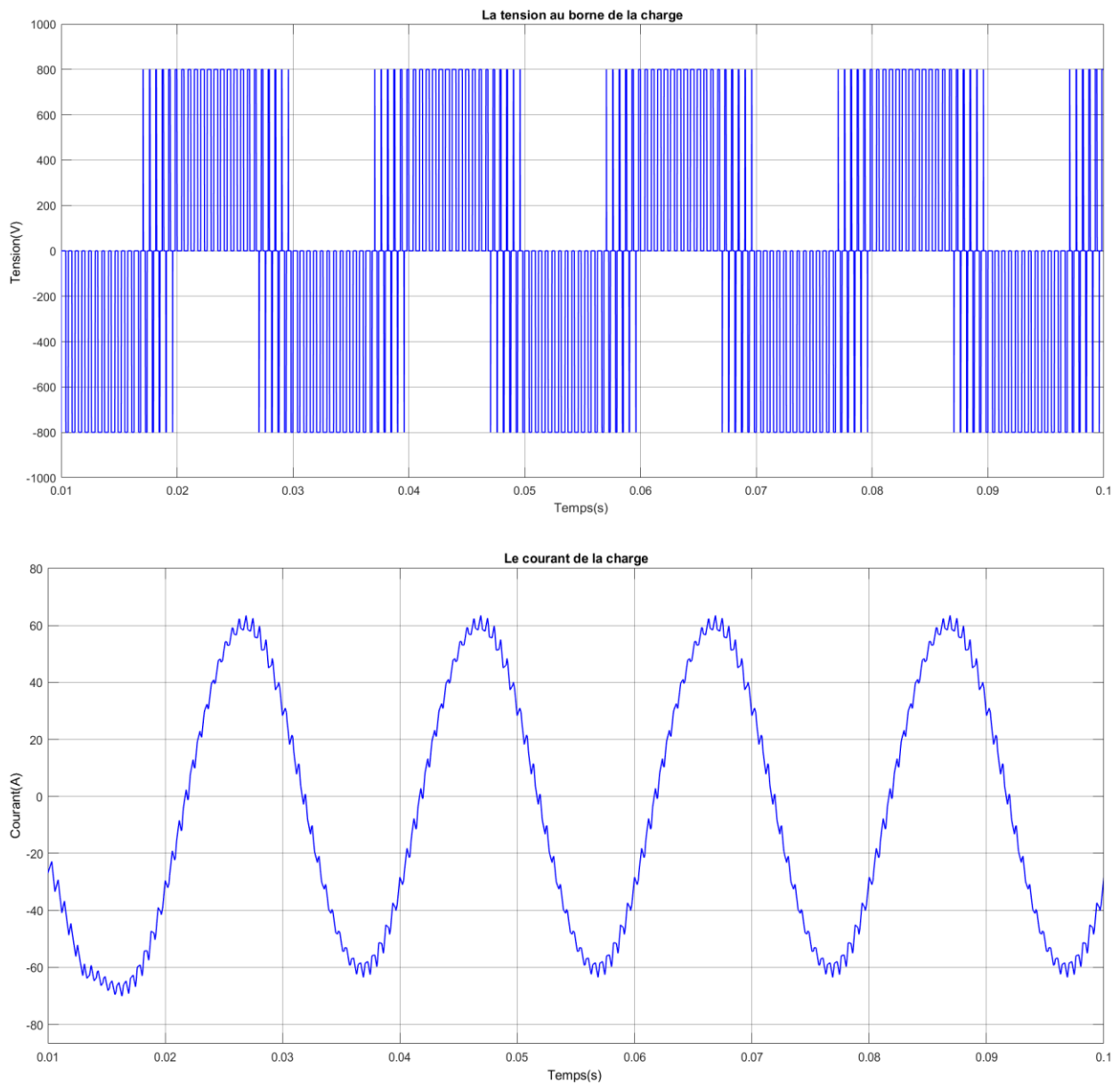


Figure 3.27 : Allure de la tension de sortie et du courant en fonction du temps M=0.9

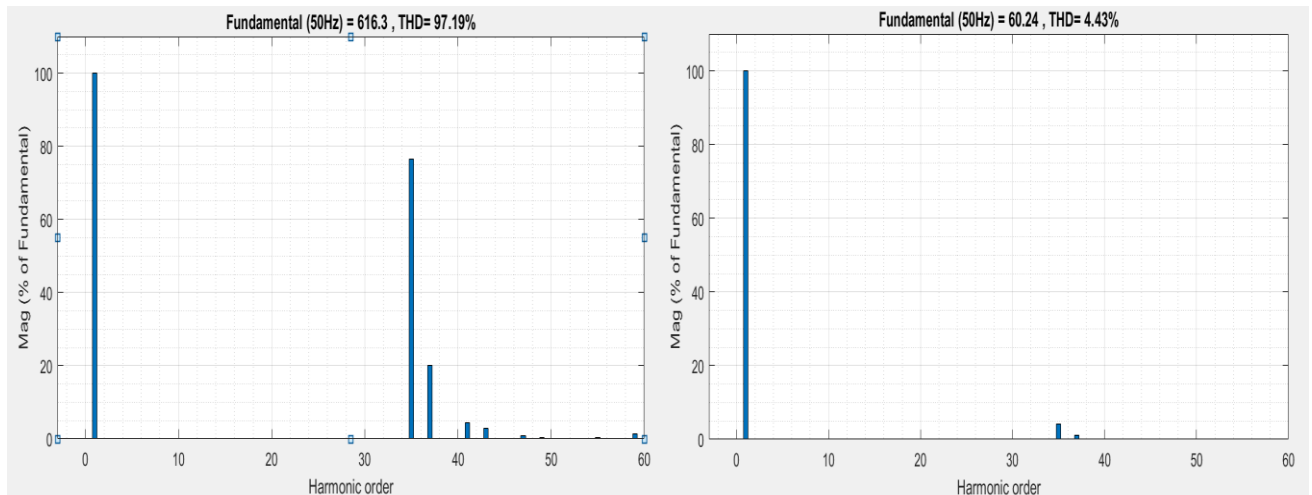


Figure 3.28 : Spectre d'harmonique de la tension de sortie et du courant (charge RL) $M=0.9$

Interprétation

En utilisant 11 angles de commutation la MLI pré-calculée élimine jusqu'à la 33èmes harmonique, ce qui rend le signal quasi-sinusoïdal et minimise la distorsion du courant

Le taux de distorsion harmonique de tension pour 11 angles est très élevé pour les faibles indices de modulation.

La technique SHE est une technologie PWM qui permet d'abaisser la fréquence de commutation de l'appareil de puissance, d'éliminer l'harmonique d'ordre bas, et d'augmenter leur tension.

Les critères usuellement retenus sont :

- Elimination d'harmoniques de rang spécifié par sélection
- Elimination d'harmoniques dans une bande de fréquence spécifiée,
- Minimisation d'un critère d'harmoniques global.
- La minimisation de la distorsion harmonique et les pertes ;
- Elle permet aussi le contrôle de l'amplitude du fondamental.[27]

L'augmentation du nombre d'angles de commutation ne réduit pas forcément la distorsion harmonique totale THD, c'est-à-dire que le THD varie d'une manière arbitraire en fonction du nombre d'angles de commutation.

D'une manière générale, la distorsion harmonique totale de la tension de sortie de l'onduleur, est inversement proportionnelle au taux de modulation (que ce soit pour la tension simple ou pour la tension composée) ;

La commande MLI pré calculée présente un inconvénient coté THD de la tension (élevé) plus les angles de commutation sont élevés contrairement au THD du courant.

Le principal inconvénient de la technique de Newton-Raphson appliquée à la résolution des systèmes d'équations non linéaires réside dans la difficulté du choix des valeurs initiales des angles de commutation.

La méthode de Newton-Raphson permet après plusieurs itérations d'approcher les solutions des équations non linéaires pour des valeurs différentes de l'indice de modulation et le temps de calcul important.

3.3. Simulation sur ISIS Proteus

Isis Proteus est un logiciel de développement et de simulation d'application via un environnement graphique simple et interactif.

Le lancement de PROTEUS donne un environnement classique de type Windows, constitué d'une fenêtre principale, et d'un ensemble de barres d'outils. Outre le menu classique permettant la gestion des fichiers, de l'affichage, et des options des projets, la fenêtre principale comprend une Zone de travail destinée au développement des circuits à simuler et à tester. Une Bibliothèque d'objets affiche la liste des objets (circuits électriques, électroniques...) utilisés dans l'application en cours. Les différentes Touches magnétoscope constitues des raccourcis permettant le lancement de la simulation, ainsi que la mise en pause, l'exécution pas a pas, et l'arrêt de la simulation.[31]

Le logiciel ISIS de Proteus est principalement connue pour éditer des schémas électriques. Par ailleurs, le logiciel permet également de simuler ces schémas ce qui permet de déceler certaines erreurs dès l'étape de conception. Indirectement, les circuits électriques conçus grâce à ce logiciel peuvent être utilisé dans des documentations car le logiciel permet de contrôler la majorité de l'aspect graphique des circuits.

On a effectué la simulation sur ISIS Proteus afin de vérifier le schéma final avant d'essai sur la plaque d'essai, et avant d'imprimé le circuit de l'onduleur triphasé simulés sur la plaque finale.

3.3.1. Onduleur triphasé sur ISIS Proteus

Le schéma de l'onduleur triphasé avec l'Arduino, les drivers IR2110, les mosfet IRF840 et les restes des composants électroniques est présenté sur la figure suivante :

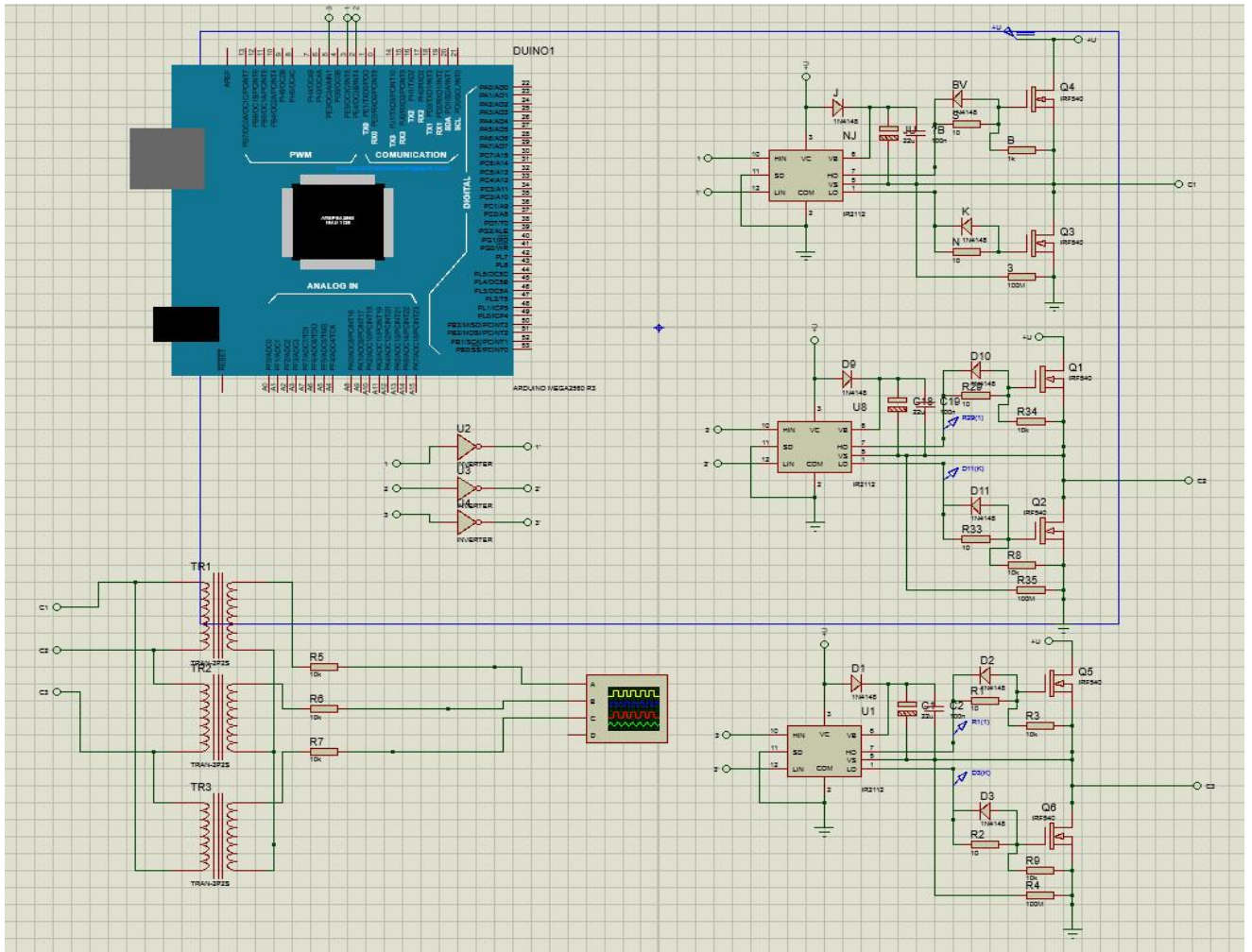


Figure 3.29 : Schéma de l'onduleur sur ISIS Proteus

La forme de tension de sortie obtenue par cette simulation est illustrée dans la figure 3.30 :

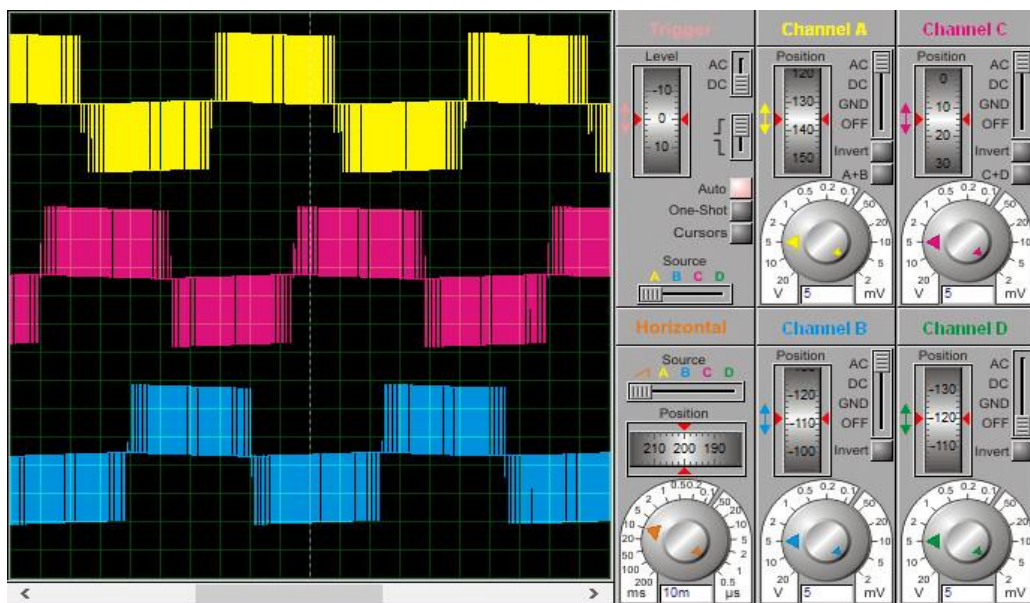


Figure 3.30 : Tension de sortie d'un onduleur commandé par MLI sinus-triangle sur ISIS

3.4. Conclusion

Dans ce chapitre, on a simulé plusieurs types de commande. La commande plein onde délivre une tension comportant des harmoniques qui sont proches de la fondamentale avec une amplitude importante qui se traduit par une mauvaise qualité d'énergie, c'est pour cette raison qu'on est passé à la commande MLI sinus triangle. Avec cette technique, on a constaté que les harmoniques seront repoussées vers la haute fréquence, mais plus on augmente la fréquence de commutation plus la valeur efficace de la tension de sortie diminue. Les contraintes de cette technique sont les composantes utilisées qui limitent leur exploitation au maximum.

On est passé à une technique plus avancée et précise qui est la commande MLI programmée. Avec cette commande, on peut éliminer toutes les harmoniques proches de la fondamentale. On obtient alors une bonne qualité d'énergie à la sortie de l'onduleur et les résultats simulés sont très applicables dans la pratique.

CHAPITRE 4

Essais et réalisations

Chapitre 4 : Essais et réalisations

4.1. Introduction

Les circuits imprimés (PCB) sont des plaques minces qui sont généralement faites de fibre de verre, de matériaux laminés ou d'époxy composites utilisés comme base physique pour supporter les puces et les composants électroniques. Ces cartes sont imprimées ou gravées avec des voies conductrices pour former des circuits qui alimenteront des appareils électroniques ou des gadgets. Ils supportent différents composants électroniques tels que les circuits intégrés, les résistances et les transistors, qui sont interconnectés dans les pistes de cuivre. Ces composants sont mis en place en perçant des trous dans la carte et en les soudant dans le circuit imprimé.[29]

Notre circuit imprimé de convertisseur (onduleur ; l'élément le plus important) équipant le train électro-diesel est réalisé en plusieurs étapes : il est monté sur une plaque d'essai, afin de pouvoir tester le circuit et assurer leur fonctionnement.

Ensuite, on a schématisé le circuit sur le logiciel EAGLE, et on passe à l'étape d'impression du circuit sur une plaque en époxy, dans laquelle les composants sont implantés.







4.2. Réalisation des circuits sur plaque d'essai




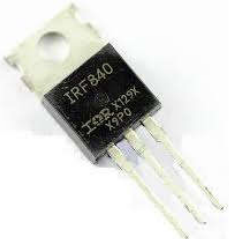


Il est fortement recommandé de procéder à quelques expériences sur plaque de connexions sans soudure. C'est facile, rapide, et très pédagogique ! On peut de la sorte tester différentes valeurs pour tel ou tel composant, mesurer la variation de tel ou tel paramètre, l'erreur est vite réparée. Il n'en va pas de même, bien entendu, si les composants ont été soudés.




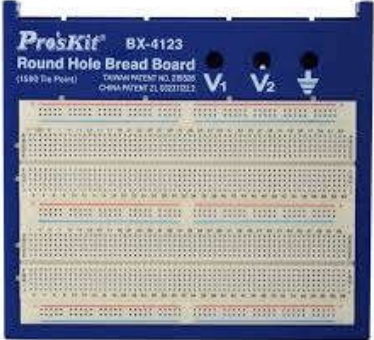
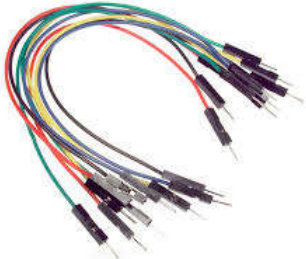
On réalise toujours un prototype avant de lancer la fabrication. N'hésitons donc pas à acquérir un boîtier de connexions sans soudure qui nous servira de manière systématique ! Si cette méthode peut paraître un peu fastidieuse à première vue, elle permet de progresser rapidement, sur des bases solides. Il sera toujours temps par la suite de brancher le fer à souder, avec les meilleures chances de réussite.[15]

4.2.1. Composants utilisés

Tableau 4.1 : Liste des composants utilisés pour l'onduleur

Nombre des composants	Le nom de composants	La visualisation du composant
02	Bornier à 2 vis	
01	Bornier à 3 vis	
10	Diode 1N4007	
06	Résistance (100 Ω/4W)	
03	Condensateur (22uF/100v)	
04	Condensateur (10uF/50v)	

03	Condensateur (100nF)	
03	Driver IR2110	
01	Inverseur NOT (HEF4069UB)	
06	Mosfet IRF840	
01	Régulateur LM7812	
01	Régulateur LM7805	

01	Potentiomètre (10 k Ω)	
01	Arduino Méga 2560	
01	Interrupteur	
01	Plaque d'essai	
06	Cable Jumper male-male	

4.2.2. Plaque d'essai

Le Breadboard, ou bien également appelé plaque d'essai, facilite grandement les expériences avec des composants électroniques. Les composants peuvent être branchés simplement, sans devoir les souder. Les circuits peuvent être branchés directement sur le Breadboard. La réalisation d'un montage complet demandant beaucoup d'efforts, le Breadboard constitue une alternative simple et rapide.

L'astuce du Breadboard est que certains des trous sont reliés et conducteurs. Ces liaisons sont représentées par des lignes à droite du dessin de la plaque d'essai de montage. Dans l'alimentation extérieure, celles-ci parcourent deux lignes parallèles (+ et -) verticales vers le bas, tandis qu'au milieu de la plaque, 5 trous sont réunis, formant une colonne horizontale.

Il existe en outre des "straps" ou "cavaliers" (jump wire) flexibles, munis de contacts à leurs extrémités, permettant de relier aisément deux connexions. Ces straps sont disponibles en plusieurs couleurs, qui facilitent le repérage. [32]

Réalisation d'onduleur triphasé

Pour transformer la tension continue survoltée par l'hacheur en tension alternative de fréquence et tension variable on utilise l'onduleur triphasé, et le circuit de test est montré sur la figure 4.1 :

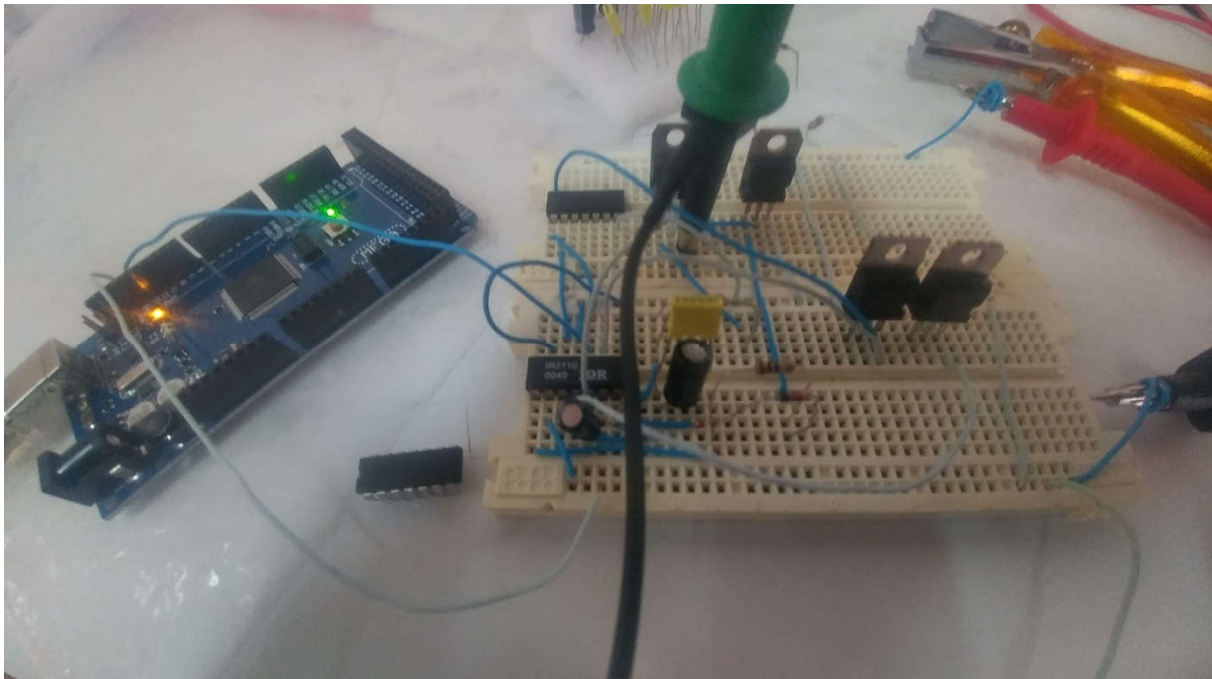


Figure 4.1 : Essai d'une phase d'un onduleur sur plaque d'essai

4.2.3. Résultats d'essai

L'oscilloscope est un appareil qui représente un signal électrique sous la forme d'une trace visible sur un écran : le plus souvent, il montre la variation de la tension du signal étudié en fonction du temps. Grâce au "scope", on peut ainsi observer de visu l'allure d'un signal électrique de l'onduleur et son évolution dans le temps.

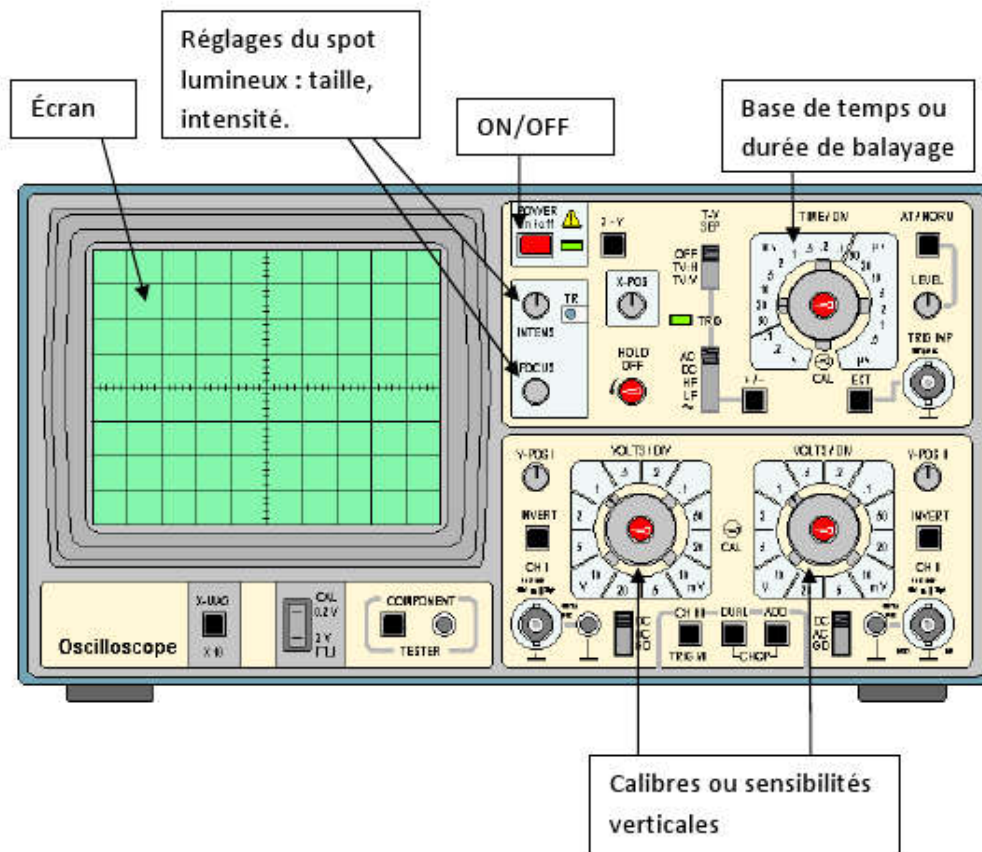


Figure 4.2 : Description de l'oscilloscope

Après l'essai fait sur la plaque d'essai on a visualisé les résultats suivants sur l'oscilloscope.

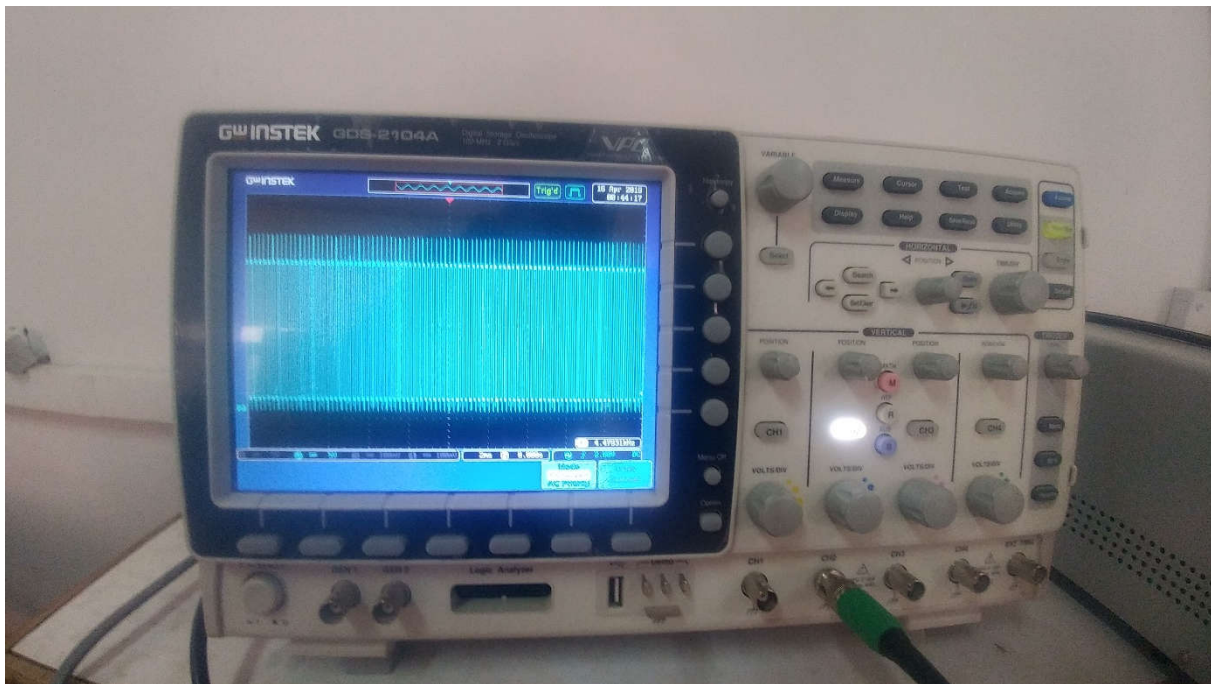


Figure 4.3 : résultat d'essai d'une phase d'un onduleur sur la plaque d'essai

4.3. Réalisation du circuit imprimé

Un circuit imprimé ou PCB est un support, en général une plaque, permettant de maintenir et de relier électriquement un ensemble de composants électroniques entre eux, dans le but de réaliser un circuit électronique complexe. On le désigne aussi par le terme carte électronique. Il est constitué d'un assemblage d'une ou plusieurs fines couches de cuivre séparées par un matériau isolant. Les couches de cuivre sont gravées par un procédé chimique pour obtenir un ensemble de pistes, terminées par des pastilles.

Le circuit imprimé est souvent recouvert d'une couche de vernis coloré qui protège les pistes de l'oxydation et d'éventuels courts-circuits. Une plaque d'essai est une plaque de bakélite ou de verre époxy recouverte, sur une face, de bandes cuivrées percées qui sera prête pour l'implantation des composants électroniques. La fabrication du circuit principal permet d'abord de passer par des étapes et faire des opérations pour le circuit imprimé. [15]

4.3.1. Tracé du circuit avec logiciel EAGLE

Le tracé du circuit c'est le traitement qui consiste à supprimer le cuivre là où il n'y a pas de liaison à assurer et à le laisser là où on doit relier les composants. Le cuivre est supprimé par attaque chimique, généralement au perchlorure de fer.

L'action de supprimer le cuivre par attaque chimique s'appelle la gravure. Toute la difficulté réside dans le fait qu'il faut protéger le cuivre là où il doit rester. On peut utiliser un feutre spécial avec une encre résistante mais il faut alors tracer le dessin des pistes à la main, ce qui ne peut pas convenir pour les circuits imprimés compliqués. [33]

Eagle (Easily Applicable Graphical Layout Editor) est un logiciel de conception assistée par ordinateur de circuits imprimés. Il comprend un éditeur de schémas, un

logiciel de routage de circuit imprimé avec une fonction d'autoroutage, et un éditeur de bibliothèques. Le logiciel est fourni avec une série de bibliothèques de composants de base.

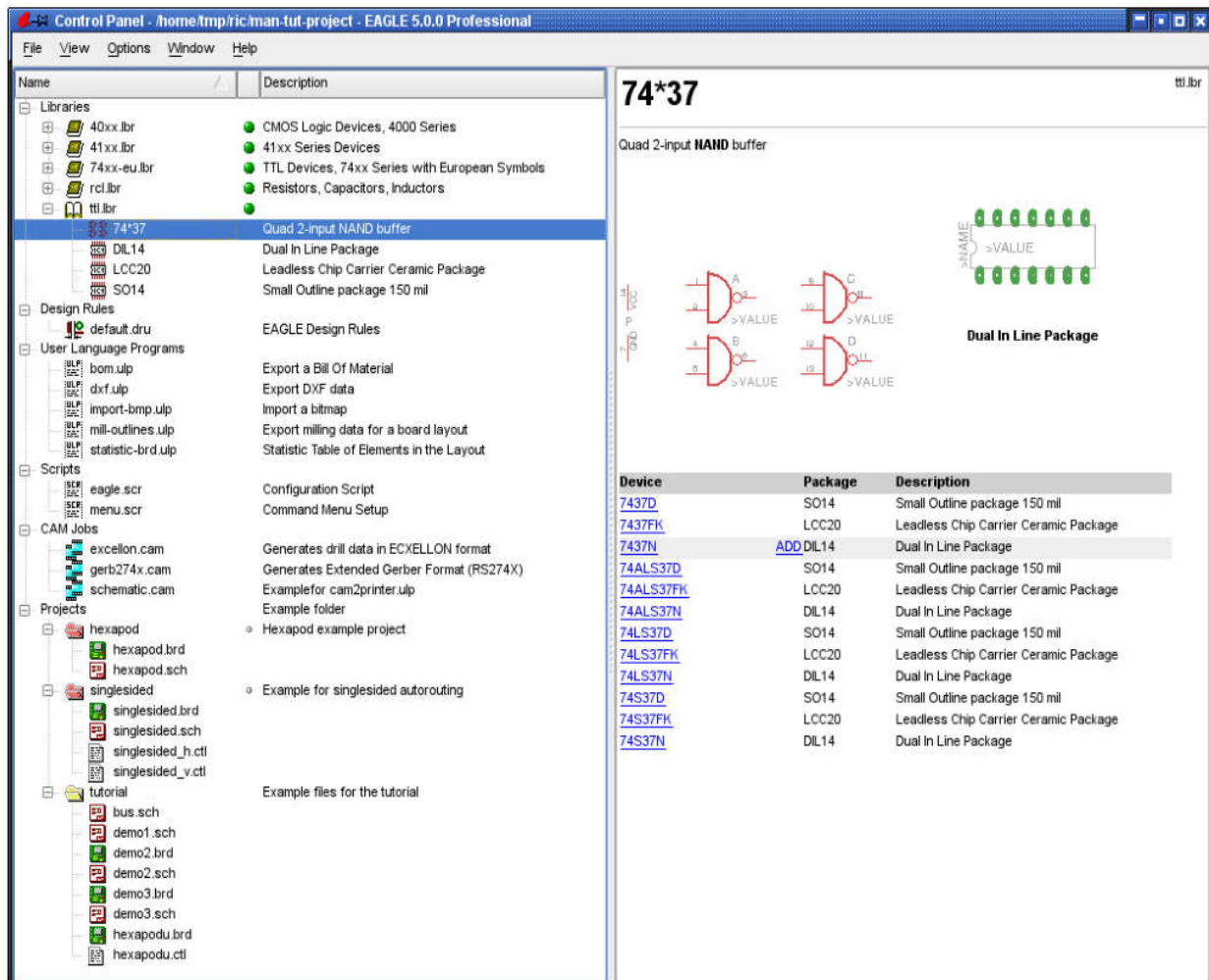


Figure 4.4 : l'interface du logiciel autodesk EAGLE

Des règles de conception spéciales peuvent être spécifiées dans EAGLE pour régir la conception de la carte. Ceux-ci peuvent être sauvegardés sous forme d'ensembles de données dans des fichiers spéciaux (*.dru).

Le jeu de paramètres qui doit régir le projet en cours est spécifié dans la branche Règles de conception de l'arborescence. Si aucune donnée n'a été fournie pour le design Rules (commande DRC), EAGLE fournira lui-même les paramètres. Le marquage à droite de l'entrée de fichier spécifie le jeu de paramètres par défaut pour le projet en cours. La mise en page sera vérifiée par la DRC en conformité avec ces critères. [34]

Les étapes de conception d'une carte électronique sont résumées sur la figure 4.5 :

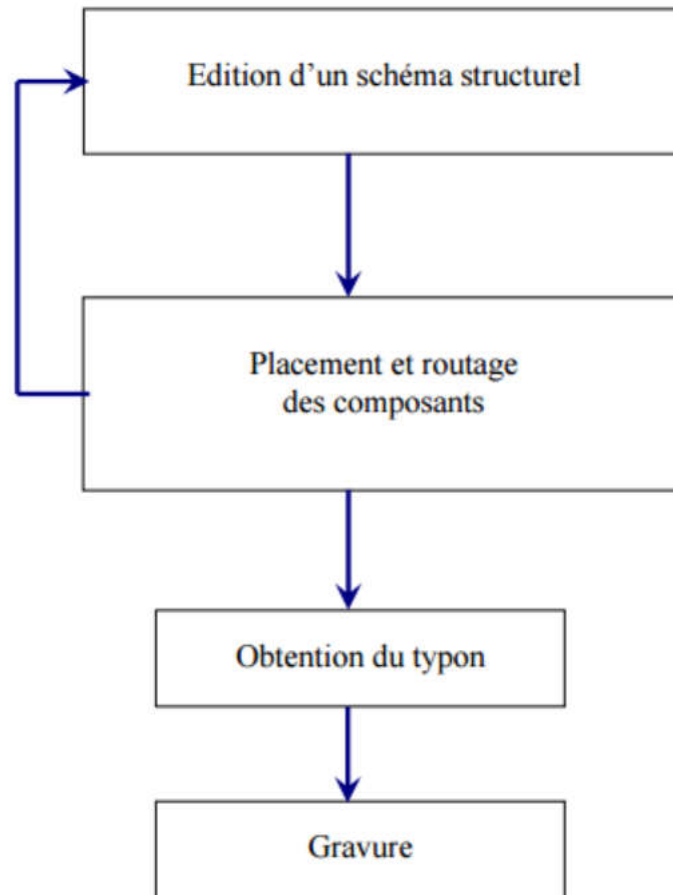


Figure 4.5 : Les étapes de conception d'une carte électronique

Ce schéma résume l'ensemble des étapes de conception d'une carte électronique :

- Elaboration du schématique
- Elaboration du typon avec chevelu pour une cohérence totale entre schéma et typon
- Routage automatique possible.

Avant de créer le typon pour le circuit, il faut bien maintenir le schéma structurel de l'onduleur triphasé.

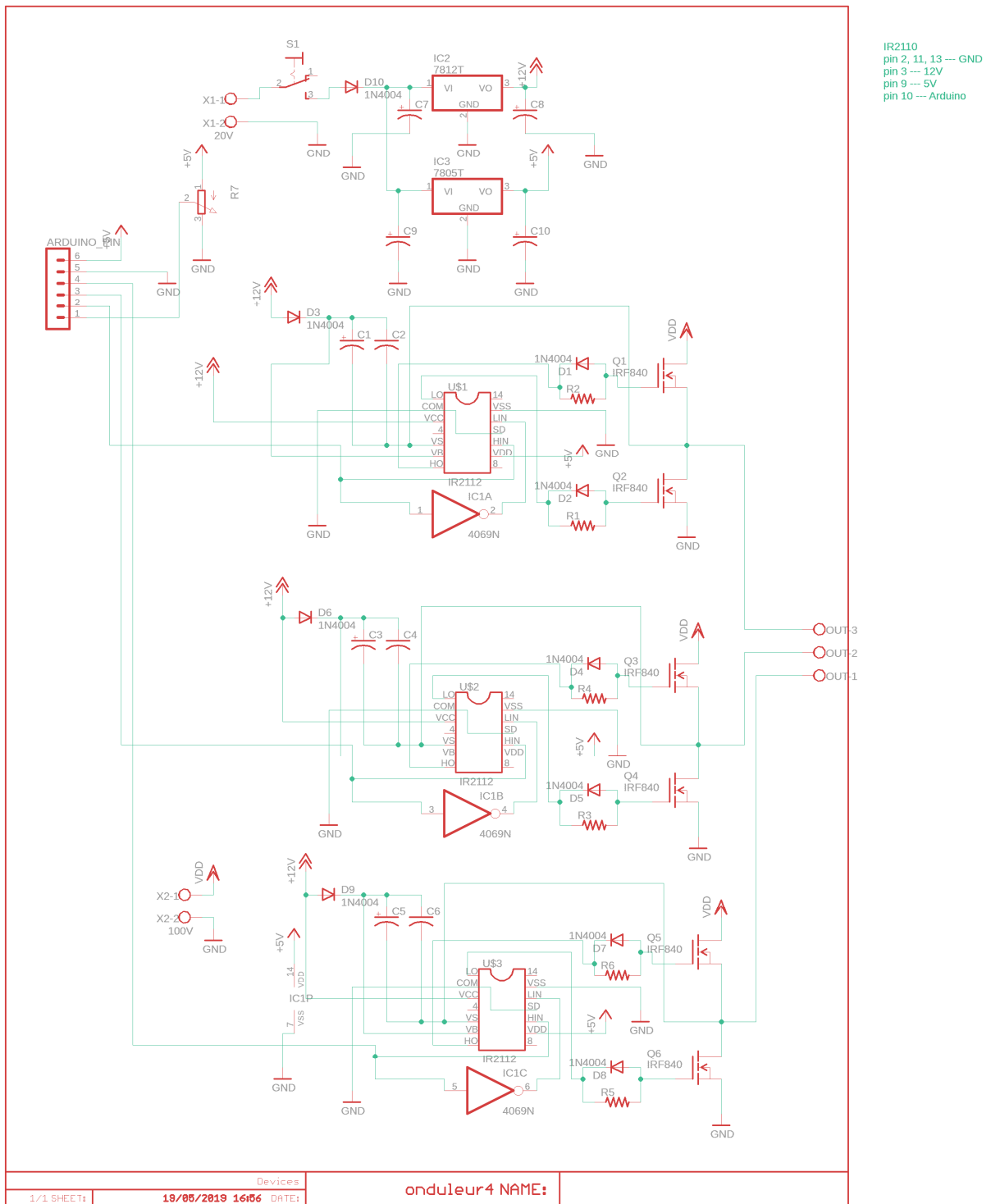


Figure 4.6 : Schéma structurel d'un onduleur triphasé

Ça y est, le schéma est saisi, il ne reste plus qu'à dessiner le circuit imprimé. Pour passer du schéma au circuit imprimé, utilisons le bouton Switch To Board. La première étape consiste à disposer les composants sur la carte. Il est crucial d'éviter au maximum les croisements de pistes. Ensuite, il faut tracer les pistes, soit manuellement soit par autoroute. Et après, faire un plan de masse qui sert à faire face principalement aux

perturbations électromagnétiques par rayonnement. Il atténue les perturbations rayonnées à assez haute fréquence quelques Mhz.

Voici à quoi ressemblerait le circuit de convertisseur avant l'impression sur un papier photo et graver sur la plaque du cuivre :

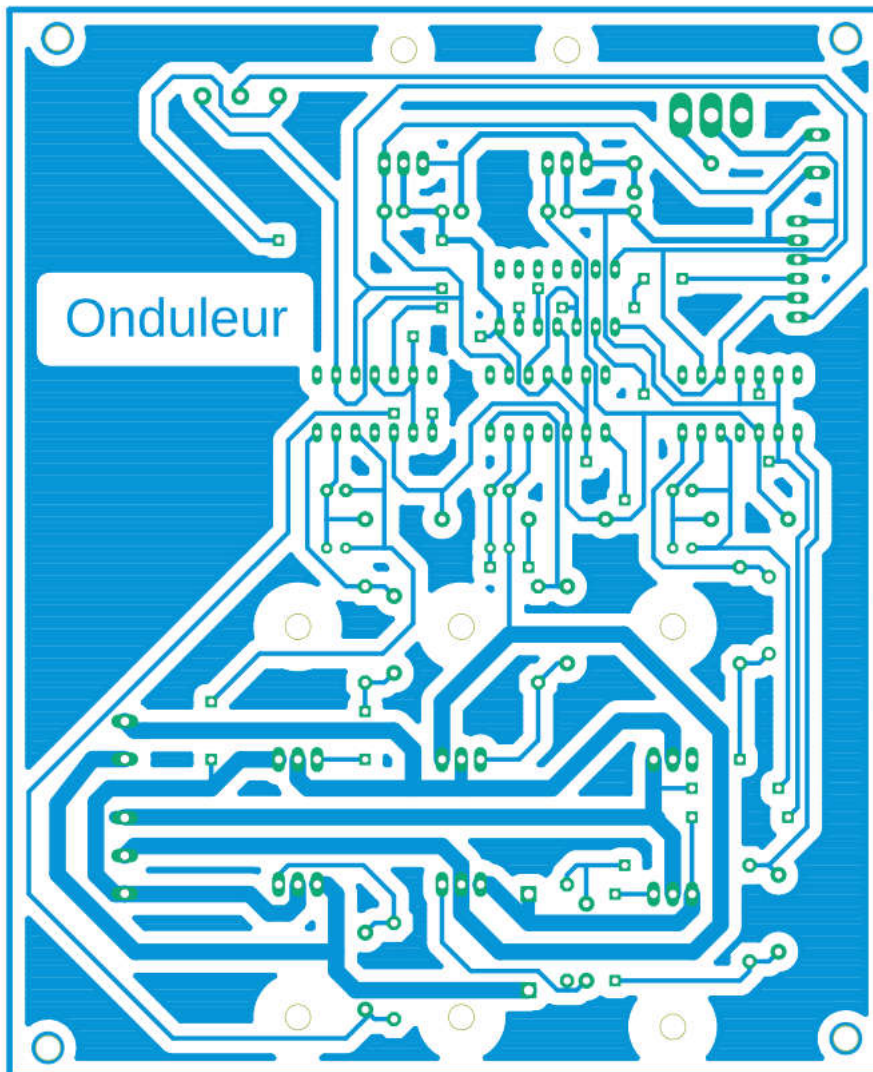


Figure 4.7 : Schéma typon d'onduleur avant l'impression

4.3.2. Transfert du circuit sur la plaque de cuivre

Avant de pouvoir imprimer le schéma sur plaque de cuivre, on utilise le schéma pour tracer un rectangle de la taille voulue sur notre plaque de cuivre. Nous pouvons tracer ce rectangle à l'aide d'un marqueur indélébile. Nous découpons ensuite notre plaque de cuivre suivant ces lignes à l'aide d'une cisaille, la plaque résultante aura les dimensions du futur circuit imprimé.

Pour « transférer » le tracé du typon sur la plaque du circuit imprimé, on utilise des plaques de cuivre photosensibles. Les plaques photosensibles sont recouvertes d'une couche protectrice photosensible dure et très adhérente, de couleur bleue-violet et d'une épaisseur de 2,5 microns. Cette couche protectrice protégera le cuivre lors de la gravure.

La couche protectrice est photosensible, ce qui signifie qu'elle est détruite au contact des rayons ultra-violet. Pour protéger le cuivre seulement aux endroits contenant des pistes, on va exposer la plaque photosensible aux rayons ultraviolets, après l'avoir recouverte avec le typon : ainsi, la couche protectrice photosensible sera brûlée et éliminée par les rayons ultra-violet à l'extérieur des pistes (là où le typon est transparent) et demeurera intacte sur les pistes (là où le typon est opaque).

➤ **Mode Opérateur**

Voici, en 7 étapes, le mode opératoire à suivre pour fabriquer un circuit imprimé en utilisant un typon :

1. Coupe

On découpe la plaque époxy avec une cisaille aux dimensions de la future carte de circuit imprimé.

2. Préparation

On met le typon dans l'insoleuse, en vérifiant soigneusement son sens. Pour que l'insolation puisse être effectuée, la colle opaque qui protège la couche photosensible des rayons ultraviolets de la lumière ambiante doit être enlevée. Une fois l'adhésif enlevé, on place la plaque présensibilisée dans l'insoleuse, avec le typon côté cuivre.

3. Insolation

On ferme le capot protecteur de l'insoleuse et réglez la minuterie sur 2 min 30 sec. Les ultra-violet émis par les tubes de l'insoleuse vont détruire la couche photosensible aux endroits non protégés par le tracé du typon. Lorsque la minuterie s'arrête, on ouvre le capot protecteur de l'insoleuse et sort la plaque présensibilisée. Nous devrions être en mesure d'observer le tracé des pistes imprimé sur la résine.

4. Révélation

Nous trempons la plaque présensibilisée dans le bain révélateur en suivant bien les consignes de sécurité. Si le révélateur est récent ou très actif, l'opération risque d'être très courte ! il faut observer bien l'action du produit qui désagrège la couche photosensible brûlée par les ultra-violet, ne laissant que le tracé des futures pistes sur la couche de cuivre.

5. Rinçage

On rince abondamment la plaque présensibilisée dans l'eau. Le révélateur est encore actif si nous ne l'enlevons pas totalement.

6. Gravure

Lorsqu'on grave le schéma typon sur la plaque présensibilisée par le fer à repasser en suivant bien les consignes de sécurité, le perchlorure de fer décompose le cuivre qui

n'est pas protégé par la couche photosensible : le cuivre sera donc éliminé sur toute la plaque sauf sur les pistes tracées sur le typon.

7. Nettoyage

Nous avons nettoyé le circuit imprimé à l'aide d'un chiffon imbibé d'alcool jusqu'à faire disparaître la couche photosensible encore présente sur les pistes, et devenue maintenant inutile.

➤ Implantation des composants et soudure

1. Perçage

Maintenant que notre circuit est imprimé sur la plaque d'époxy, nous allons devoir le percer pour pouvoir y insérer les composants afin de les souder. Pour le perçage nous utilisons un perforateur avec des mèches de 0,8 ou 1 mm suivant le diamètre des fils de sortie des composants.

Avant de commencer à souder les composants sur le circuit imprimé, on doit tester la continuité des différentes pistes, à la recherche d'éventuelles micro-coupures. Une micro-coupure est une coupure microscopique dans la piste de cuivre, qui ne se voit pas à l'œil nu, pas qui empêche tout de même le passage du courant. Pour tester la continuité des pistes, on utilisera un ohmmètre.

2. Soudure

Avant de souder un composant à longues pattes, il faudra lui plier les pattes afin qu'elles rentrent perpendiculairement et parfaitement dans les deux trous prévus du circuit imprimé. Pour le pliage des pattes des composants, on utilise une pince plate à bec fin. Les bornes de chaque composant doivent être accessibles aux pointes de touche d'un contrôleur et la valeur inscrite sur certains d'entre eux devra être lisible, en respectant le sens de lecture : de gauche à droite pour les composants horizontaux, et de bas en haut pour les composants verticaux.

Pour réaliser des soudures sur circuit imprimé on utilise un fer à souder d'une puissance comprise entre 25 et 40 watts. La panne, extrémité chauffante, doit être maintenue propre par un nettoyage fréquent sur une éponge mouillée. La soudure est constituée d'un mélange d'étain et de plomb. On adoptera un mélange à 60% d'étain.

On met la panne du fer contre les parties à souder et les chauffer ensemble pendant 2 à 3 secondes puis déposer l'étain sur les parties métalliques à unir, laisser fondre la soudure pour constituer un cône.

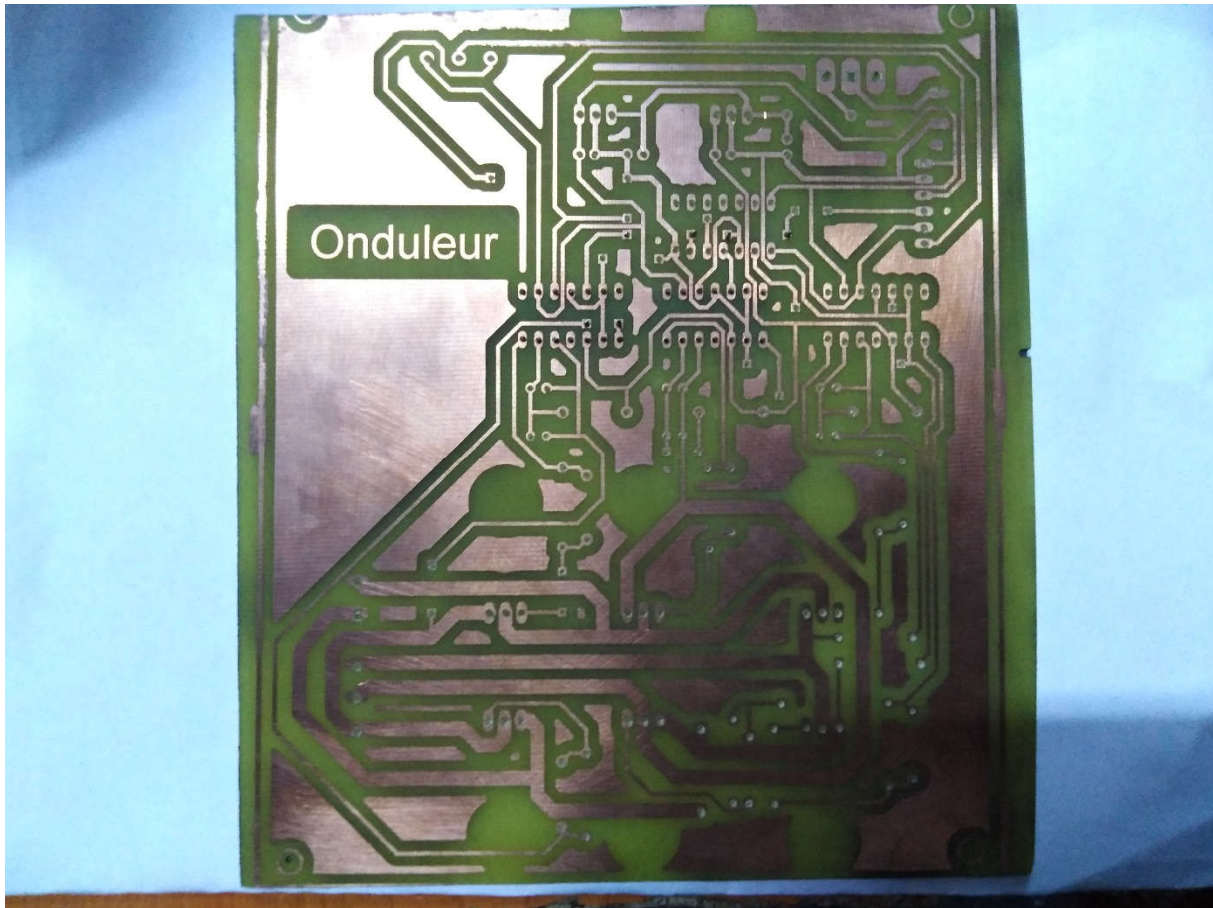


Figure 4.8 : Circuit imprimé de l'onduleur (face de soudure)

4.4. Résultats des circuits imprimés

Dans cette partie, on présente le circuit imprimé de l'onduleur triphasé avec les résultats obtenus après le test

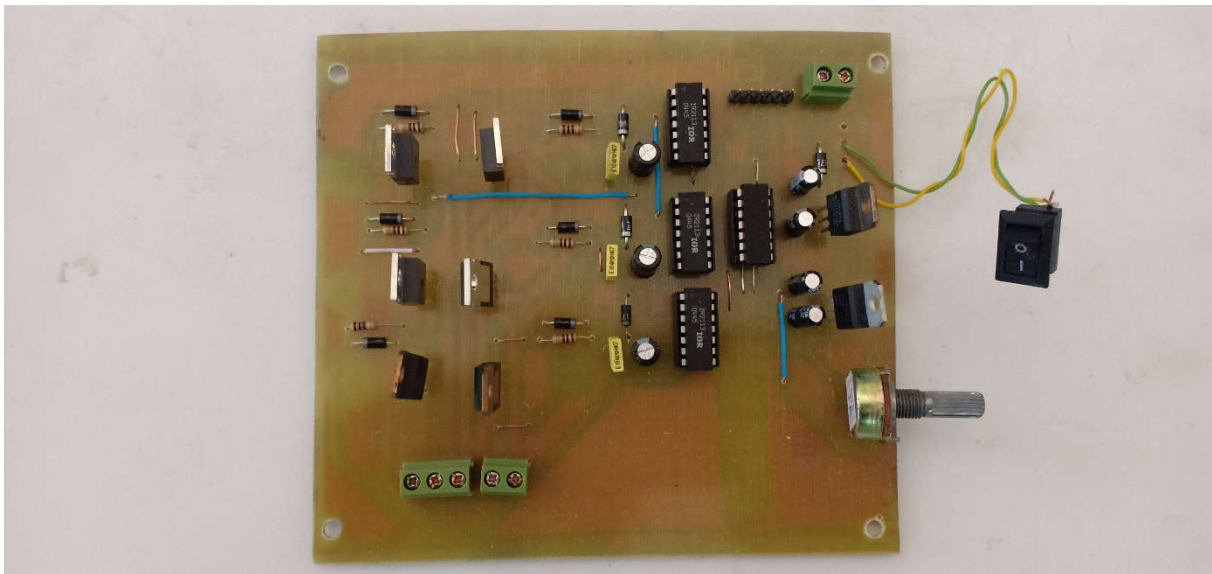


Figure 4.9 : circuit imprimé de l'onduleur (face des composants)

4.4.1. Essai de la commande MLI sinus-triangle

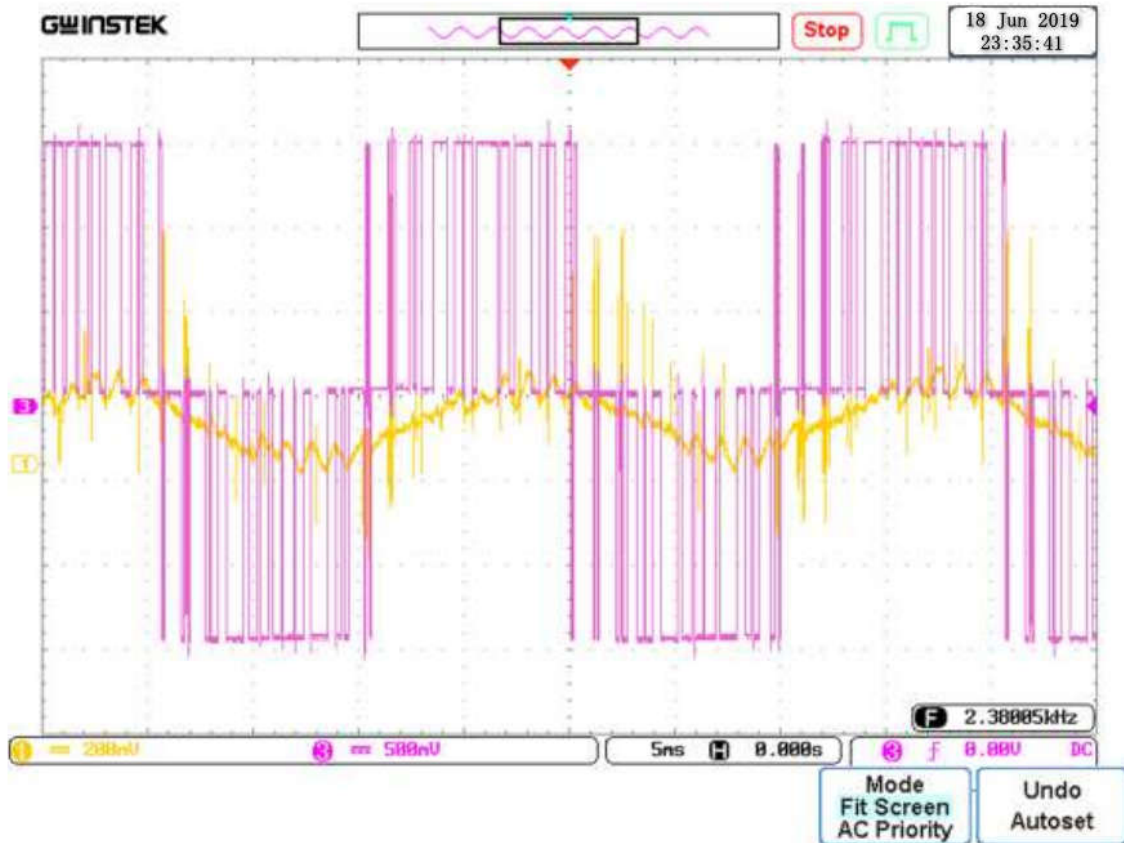


Figure 4.10 : Allure de la tension et du courant M=0.7

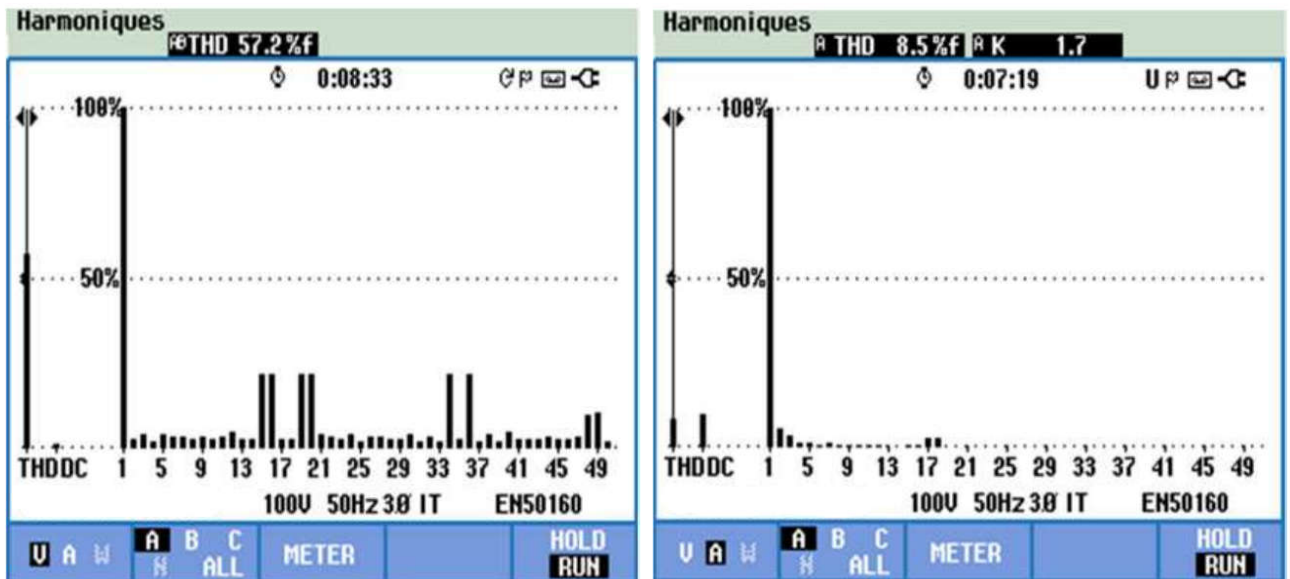


Figure 4.11 : Spectre de la tension et du courant M=0.7

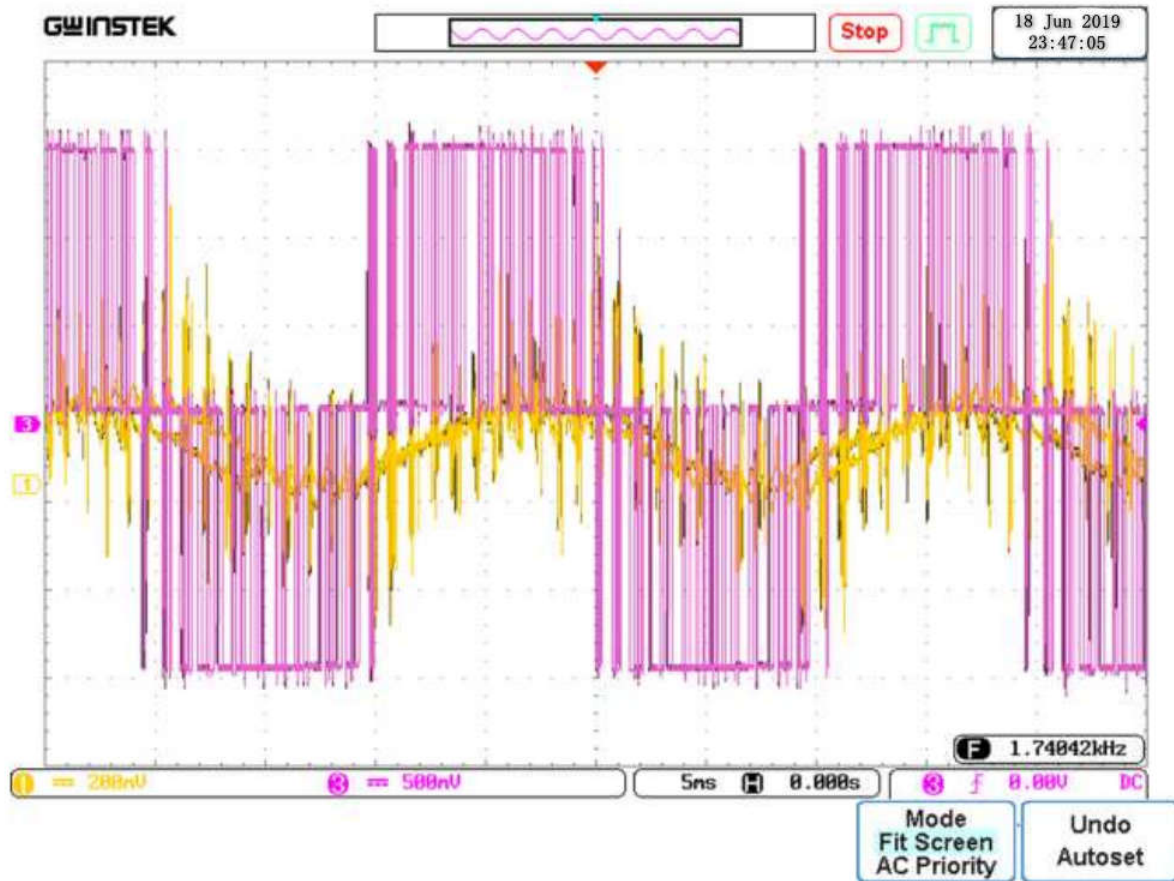


Figure 4.12 : Allure de la tension et du courant M=0.9

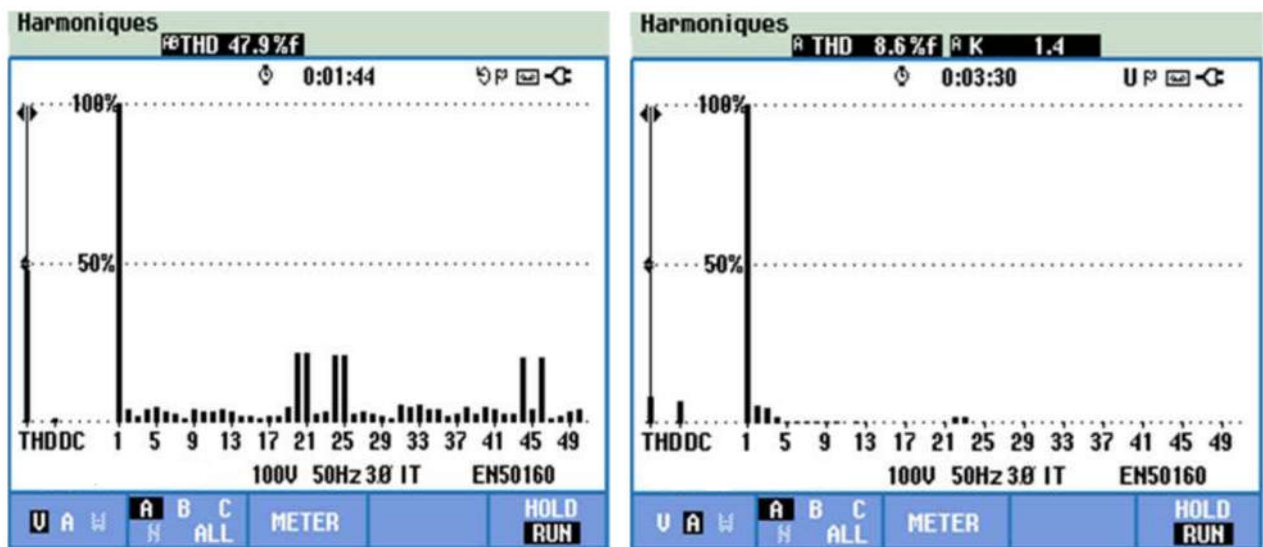


Figure 4.13 : Spectre de la tension et du courant M=0.9

Interprétation

On remarque bien que plus la fréquence de MLI augmente et plus les harmoniques sont repoussées vers les fréquences d'ordre supérieur. Mais plus on augmente la fréquence de commutation plus la valeur efficace de la tension de sortie diminue à cause aux pertes dues aux commutations.

Plus les commutations augmentent plus le signal se rapproche de la sinusoïdale. Cela se traduit par la diminution du THD.

Et, on remarque que ces résultats sont similaires avec les résultats trouvés par simulation.

4.4.2. Essai de la commande MLI pré-calculée (7 angles)

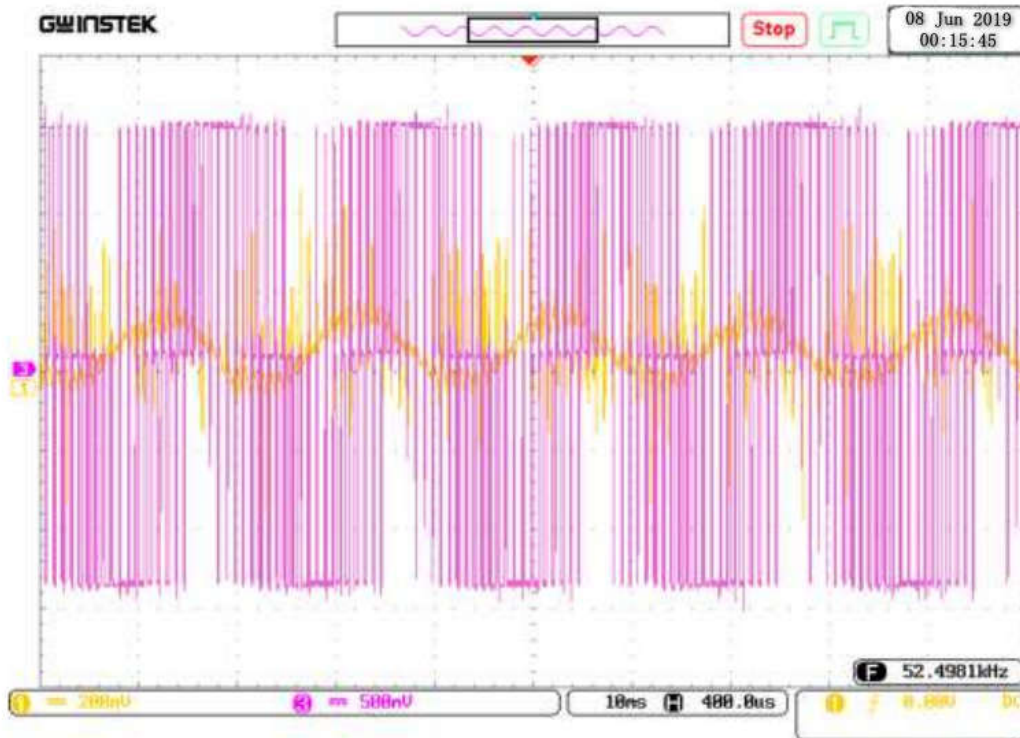


Figure 4.14 : Allure de la tension et du courant M=0.7

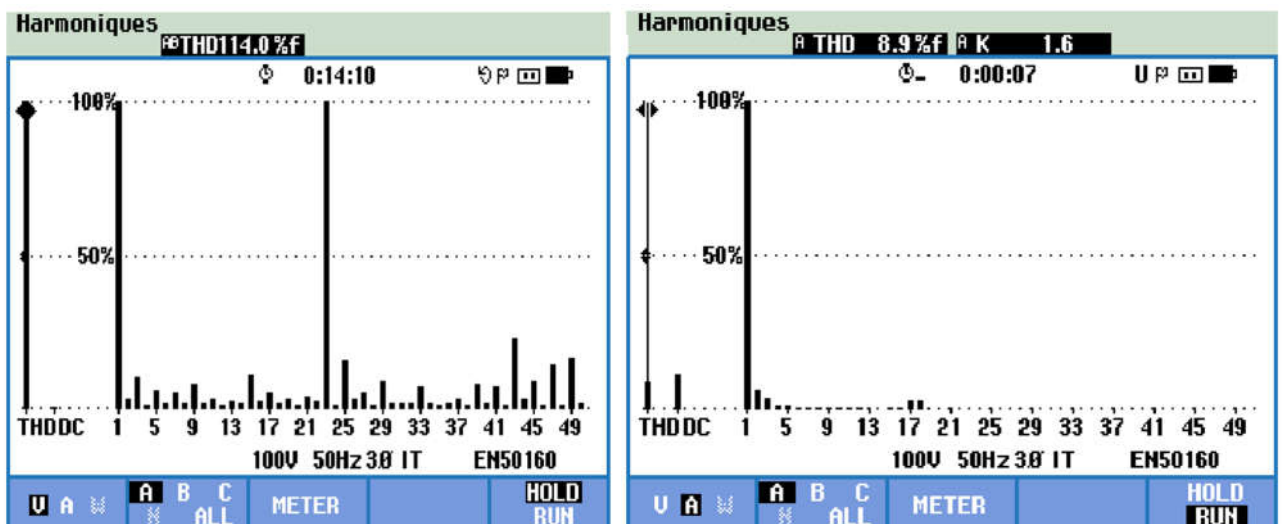
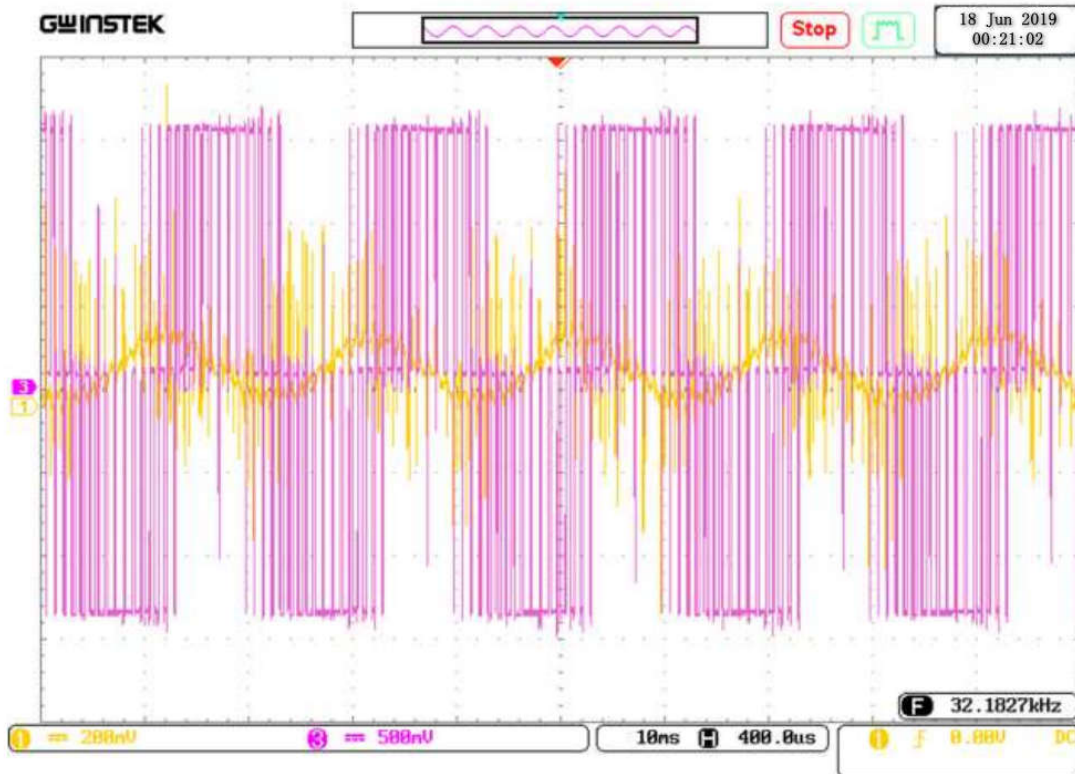
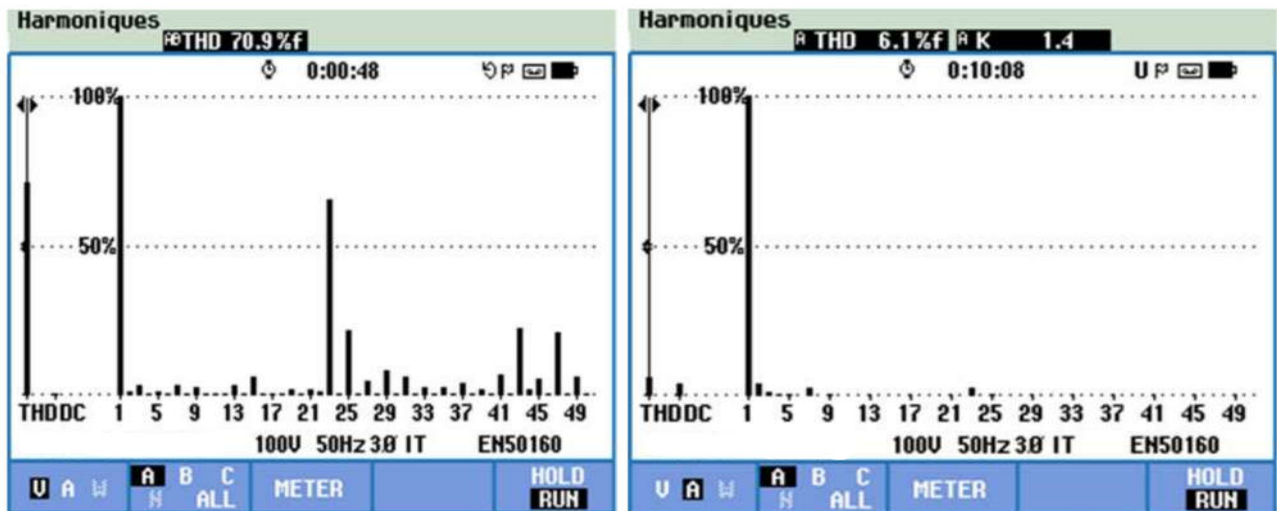


Figure 4.15 : Spectre de la tension et du courant M=0.7

Figure 4.16 : Allure de la tension et du courant $M=0.9$ Figure 4.17 : Spectre de la tension et du courant $M=0.9$

Interprétation

On remarque que l'évolution de la qualité de signal augmente en fonction de l'indice de modulation, et le THD du courant a considérablement diminué.

Cette technique a l'avantage de réduire la fréquence de commutation et diminuer par suite les pertes par commutation dans les composants semi-conducteurs

Enfin cette commande reste la meilleure par rapport la MLI sinus-triangle.

4.5. Conclusion

Après l'étape de test de l'onduleur sur plaque d'essais dans ce chapitre on s'est intéressé à la réalisation pratique de ce convertisseur sur la plaque du cuivre.

Avant cette réalisation, on fait l'appelle à logiciel EAGLE pour schématiser le circuit qu'on va l'imprimer sur le papier et le graver sur la plaque du cuivre.

Différentes étapes à suivre pour faire le circuit imprimé a été discuter sur ce chapitre.

Et enfin, après la réalisation de circuit imprimé, nous l'avons testé avec les commandes simulées dans le chapitre précédent, et nous avons trouvé de bons résultats coïncidant avec les résultats obtenus auparavant.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le train électro-diesel a connu plusieurs étapes d'évolution ces derniers temps. Il constitue le meilleur moyen de transport de marchandises et de voyageurs. On est passé de la locomotive à vapeur aux trains à grande vitesse. Actuellement certaines locomotives atteignent des vitesses approchant les milles kilomètres à l'heure. Les technologies du rail évoluent d'une manière extraordinaire. La maîtrise des systèmes d'alimentation et de commande devient alors impérative. Notre contribution concerne les convertisseurs statiques (CVS) de train électro-diesel dont la fonction est la génération d'une tension variable servant d'alimentation des équipements de climatisation et d'éclairage embarqués sur le train, et d'une fréquence variable pour assurer la variation de vitesse de la machine asynchrone.

L'onduleur qui est l'élément principale de variation du vitesse d'un train électro-diesel, a le rôle de convertir la tension survoltée par l'hacheur boost en tension alternative.

Les commandes utilisées pour assurer l'amorçage des interrupteurs de l'onduleur sont implantées sur une carte Arduino Méga.

Le montage de convertisseur proposé a fait d'abord l'objet de simulation de fonctionnement sur logiciels ISI-Proteus et Matlab. Les résultats de simulation sont concordants avec les objectifs fixés.

Après expérimentation sur plaques d'essais, le circuit imprimé d'onduleur a été développé sous logiciel EAGLE.

La réalisation de circuits imprimé, le perçage, l'insertion des composants, la soudure des composants est une étape importante avant l'essai des convertisseurs.

Les résultats de mesures et d'essais de ce convertisseur répondaient largement aux résultats attendus.

Nous proposons encore du travail en perspective pour atteindre les objectifs que nous nous sommes fixés, en envisageant de faire une nouvelle structure d'onduleur multiniveaux.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Bibliographie

- [1] K. Ben Amor, "Les transports ferroviaires au Maghreb," 2014.
- [2] B. Lazare, "L'invention du train," 2011. [Online]. Available: <https://www.histoire-pour-tous.fr/inventions/284-invention-du-train.html>.
- [3] "Présentation de la SNTF ; historique du réseau ferroviaire algérien." [Online]. Available: www.sntf.dz.
- [4] T. Ferroviaire, *Traction électrique*, 3rd ed. SNCF.
- [5] A. Arab and M. R. Fakih, "Etude du système d'alimentation du tram de Sidi Bel Abbes," Mémoire de Master, Université Djillali Liabes Sidi Bel Abbes, 2015.
- [6] S. Konrad and D. Rainer, "The new generation of Alstom's CORADIA trademark Lint and its diesel traction system," *RTR. Rail Technol. Rev.*, vol. 52, no. 4, 2012.
- [7] G. Coradia, "Des trains régionaux pour tous les besoins des opérateurs." [Online]. Available: <https://www.alstom.com/>. [Accessed: 03-Mar-2019].
- [8] A. Nissrine, "Etude de développement d'un concept de locomotive hybride à chaîne de traction électrique autonome propre et durable," Thèse de Doctorat, Université de technologie de Belfort-Montbéliard, 2009.
- [9] M. Spiriyagin, C. Cole, Y. Q. Sun, M. McClanachan, V. Spiriyagin, and T. McSweeney, *Design and Simulation of Rail Vehicles*. Rockhampton, Australia: CRC Press, 2014.
- [10] S. Frey, *Railway Electrification Systems & Engineering*, 1st ed. Delhi, India: White Word Publications, 2012.
- [11] International Electrotechnical Commission, *Electric Traction Overhead Contact Lines in Railway Applications-Fixed Installations*. Geneva, Switzerland: IEC, 2013.
- [12] T. H. Tayler, "600 / 750V DC Electric and Electro-Diesel Locomotives of the Southern Railway and its Successors," *Taylor&Francis*, 2014.
- [13] G. Abad, *Power Electronics and Electric Drives for Traction Applications*, 1st ed. UK: WILEY, 2017.
- [14] M. Deruyne, "Les chaînes de traction à IGBT de forte puissance," *Revue Générale des Chemins de Fer*, 2015.
- [15] Z. Leila and A. A. Allam, "Etude et réalisation des convertisseurs équipant le train électro-diesel," Mémoire de Master, Djillali Liabes de Sidi Bel-Abbes, 2018.
- [16] F. Gruson, "Modulation naturelle généralisée des convertisseurs matriciels pour la variation de vitesse," *Ecole Centrale de Lille*, 2010.
- [17] S. Saou, "Etude et réalisation d'un onduleur solaire sinusoïdal," Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'hidi - Oum El Bouaghi, 2016.
- [18] B. M. Wilamowski and J. David Irwin, *The Industrial Electronics Handbook ; POWER ELECTRONICS AND MOTOR DRIVES*, 2nd ed. CRC Press, 2017.
- [19] V. Didier, "Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques," Mémoire de Master, Villeurbanne (France), 2017.
- [20] S. Bechekir and D. Amia, "Etude, simulation et réalisation d'un onduleur à commande MLI pour système photovoltaïque," Mémoire de Master, Université Djilali Liabes de Sidi Bel Abbes, 2015.
- [21] T. Wildi, *Electrotechnique*, 3rd ed. Louvain-la-Neuve (Belgique): De Boeck, 1999.
- [22] A. Emadi, *Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives*. US: CRC Press, 2005.
- [23] M. Chergui, "Nouvelle technique de commande et optimisation d'un système de pompage photovoltaïque," Thèse de Doctorat, Université des sciences et de technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2013.

- [24] A. Boukaroura, "Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche Bond-Graph," Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2009.
- [25] N. Adjimi and B. Wahiba, "Modélisation et commande d'un onduleur MLI," Mémoire de Master, Universitaire Larbi Ben M'hidi Oum El-Bouaghi, 2009.
- [26] Y. Sahali and M. Fellah, "Technique de Modulation à Sélection d'Harmoniques à Eliminer (SHE PWM) pour la Commande des Onduleurs de Tension Trois Niveaux Monophasés et Triphasés," in *Conférence : CISTEMA*, 2003.
- [27] N. Attou, "Simulation et réalisation d'un onduleur triphasé pour pompage solaire," Mémoire de Master, Université Djillali Liabes Sidi Bel Abbes, 2018.
- [28] A. Dade, "Amélioration de la qualité de l'énergie électrique de l'aérogare de Cotonou par l'utilisation d'un onduleur MLI," Thèse de Docorat, Ouagadougou Burkina Faso, 2013.
- [29] M. Wagner, "THE IMPORTANCE OF PRINTED CIRCUIT BOARDS," 2015. [Online]. Available: <http://hardhero.com/the-importance-of-printed-circuit-boards/>.
- [30] A. S. Hadeed, *Simulation of Power Electronics Circuits using SIMULINK*, 1st ed. Saarbruchen, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013.
- [31] M. Lakhdari, "POLYCOPIE DES TRAVAUX PRATIQUES: Introduction à la simulation et routage des circuits avec le logiciel PROTEUS V7 et V8," Université des sciences de la technology d'Oran.
- [32] OPITEC, "17 essais élémentaires électroniques avec plaque d'essai de montage (Breadboard)." [Online]. Available: <http://nbg-web01.opitec.com/img/118/381/118381bf.pdf>.
- [33] A. Malvino and D. Bates, *Principes d'électronique, cours et exercices corrigés*, 8th ed. DUNOD, 2016.
- [34] *EAGLE Manual Version 5*, 7th ed. CadSoft Computer, 2010.

Résumé

Depuis des décennies, le marché des transports bénéficie principalement du mode routier. Cependant, le mode ferroviaire s'impose aujourd'hui face aux besoins croissants de transports de marchandises dans le monde. La concurrence aux autres moyens de transport propose une alternative intéressante au niveau du coût de l'énergie notamment.

Notre contribution réside dans le développement d'un convertisseur statique performant et de nouvelle génération pour les locomotives électro-diesel.

Le convertisseur a été développé est : Onduleur triphasé. La réalisation de ce convertisseur avec les commandes des interrupteurs convenables a nécessité des simulations sur Matlab-Simulink et Isis Proteus. Avant d'imprimer le circuit sur la plaque de cuivre, le circuit a été testé pour vérifier les résultats obtenus.

Abstract

For decades, the transport market has mainly benefited from road transport. However, rail transport is nowadays a must in view of the growing need for freight transport in the world. Competition with "all-road" offers an interesting alternative, particularly in terms of energy costs.

Our contribution lies in the development of a high-performance, next-generation static converter for electro-diesel locomotives.

The converter has been developed is: Three phase inverter. The realization of this converter with the appropriate switch controls required simulations on Matlab-Simulink and Isis Proteus. Before printing the circuit on the copper plate, the circuit was tested to verify the results obtained.

ملخص

على مدى عقود ، استفاد سوق النقل بشكل أساسي من النقل البري. ومع ذلك ، فإن النقل بالسكك الحديدية في الوقت الحاضر أمر لا بد منه في ضوء الحاجة المتزايدة لنقل البضائع في العالم. بالمنافسة مع وسائل النقل الأخرى عبر كل الطرق يتزايد الاهتمام خاصة فيما يتعلق بتكاليف الطاقة .

تتمثل مساهمتنا في تطوير محول ثابت عالي الأداء من الجيل التالي لقاطرات الديزل الكهربائية.

المحول الذي تم دراسته خلال هذا البحث هو : العاكس الكهربائي .

يتطلب تحقيق هذا المحول عمليات محاكاة على البرنامجين Matlab-Simulink و Isis Proteus. ولكن قبل طباعة

هذا المحول على اللوحة النحاسية ، تم اختباره أولاً على لوحة الاختبار للتحقق من النتائج التي تم الحصول عليها سابقاً.