



Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Électrotechnique  
Spécialité : Energie et Environnement

*Présenté par :*

*M. DAHAR Housseem Eddin et M. BEKARA Youcef*

Thème

**Modélisation et simulation du réseau du  
tramway**

Soutenu publiquement, le 28 / 09 / 2020, devant le jury composé de :

M. MERAD. L	Professeur	ESSA. Tlemcen	Président
Mme. SEBBAGH. H	MCB	ESSA. Tlemcen	Directeur de mémoire
Mme. CHEKROUN. S	MCA	UAB. Tlemcen	Co-Directeur de mémoire
M. MEGNAFI. H	MCB	ESSA. Tlemcen	Examineur1
Mme. BOUSMAHA. I	MCB	ESSA. Tlemcen	Examineur 2
M. ABDELLAOUI. Gi	MCB	ESSA. Tlemcen	Invité

Année universitaire : 2019/2020

# **Dédicace**

*Á l'intention d'Allah, mon Créateur et mon Maître, mon grand maître et messenger, Mohammed (paix et bénédictions d'Allah soient sur lui), qui nous a enseigné le but de la vie.*

*Á mes parents les plus chers, Mohamed et Chafika, á qui je ne pourrai jamais exprimer ma gratitude et mon appréciation, pour n'avoir jamais cessé de se donner d'innombrables façons, pour avoir fait de moi la personne que je suis aujourd'hui.*

*Á mes grands-parents, qui n'ont jamais cessé de prier pour moi et de m'encourager.*

*Que Dieu les garde et protège.*

*Á ma petite sœur, á mes oncles, á mes tantes, á mes cousins et cousines et á mes nombreux amis.*

*Á mes plus proches amis, Abdelkrim, Youcef, Hichem, Chakib, Rafik, Imen, Oumie, Sihem et Islem. Et bien sûr je ne peux pas ne pas mentionner mon meilleur ami, mon grand frère et mon bras droit Fayçal d'avoir été toujours á mes côtés et á m'encourager.*

*Á mon binôme Youcef, dont je suis extrêmement fier et reconnaissant, et tous mes collègues avec qui j'ai partagé les trois dernières années.*

*Vous avez travaillé dur pour moi, sans compter le prix á payer, en reconnaissance de tous les sacrifices consentis par chacun d'entre vous pour me permettre d'atteindre cette étape de ma vie. Avec toute ma tendresse.*

*Avec un grand bonheur et un grand plaisir que je vous dédie cette thèse.*

*Housseem Eddin DAHAR,*

# **Dédicace**

*Á l'intention d'Allah, mon Créateur et mon Maître, mon grand maître et messenger, Mohammed (paix et bénédictions d'Allah soient sur lui), qui nous a enseigné le but de la vie.*

*Á mes parents les plus chers, Lahcen et Nacera, qui n'ont jamais cessé de prier pour moi et de m'encourager, et á qui je ne pourrai jamais exprimer ma gratitude et mon appréciation.*

*Que Dieu les garde et protège.*

*Á mes frères, mes oncles, mes tantes, ma chère grand-mère Hakima et mes grandsparents Allah yerhamhom, et mes cousins et cousines.*

*Á mes vrais amis, Younes, Aziz, Ryad, Slimane, Yasser, Taha, Omar, Othmane ,Mohamed, Lilya et á tous mes nombreux amis qui ont toujours été lá pour moi pour m'encourager et me donner de la force.*

*Á mon binôme Housseem, dont je suis extrêmement fier et reconnaissant de travailler avec lui, et tous mes collègues avec qui j'ai partagé les trois dernières années.*

*Vous avez travaillé dur pour moi, sans compter le prix á payer, en reconnaissance de tous les sacrifices consentis par chacun d'entre vous pour me permettre d'atteindre cette étape de ma vie. Avec toute ma tendresse.*

*Ce travail est dédié pour vous.*

*Youcef BEKARA,*

# Remerciment

*La recherche, l'exécution et la compilation de ce rapport ont été pour nous une expérience très stimulante et enrichissante. Nous avons acquis une grande richesse de connaissances et une expérience précieuse grâce à notre travail de thèse. Bien que ce travail soit présenté comme le nôtre, nous n'aurions pas pu le mener à bien sans l'aide de Dieu. Ainsi, tout d'abord et avant tout, nous louons notre Dieu et Seigneur, le Tout-Puissant, qui nous a donné toute la force, le courage et la réussite tout au long de notre parcours éducatif et surtout pendant cette période difficile.*

*Merci, mon Dieu, de nous avoir permis de terminer notre voyage et de nous avoir donné la possibilité d'écrire cette thèse.*

*Outre les efforts que nous avons déployés, le succès de cette thèse dépend en grande partie des encouragements et des directives de beaucoup d'autres personnes.*

*Nous saisissons cette occasion pour exprimer notre gratitude aux personnes qui ont contribué à la réussite de cette thèse.*

*Nous voudrions exprimer notre plus profonde gratitude à nos mères, nos mentors de vie, des femmes fortes qui ont traversé beaucoup de choses et pourtant sont restées immobiles, nous encourageant toujours, nous soutenant et nous conduisant sur le chemin du succès grâce à leurs précieux conseils, leur patience, leur temps précieux et le travail acharné qu'elles ont accompli en notre faveur.*

*Nous sommes profondément redevables à nos pères, qui nous ont toujours fait confiance à chaque étape, qui ne nous ont jamais abandonnés, qui ont travaillé dur pour nous et nous ont fait don de leur amour éternel.*

*Nous remercions sincèrement nos superviseurs, Mme Sihem CHEKROUN et Mme Hafidha SEBBAGH, de nous avoir donné l'occasion de travailler avec eux.*

*Nous admirons leurs conseils, leurs compétences décisionnelles, leur orientation et bien sur la confiance qu'elles nous ont accordée tout au long du processus de travail.*

*Notre gratitude va aussi aux membres du jury, M. Lotfi MERAD, M. Hichem MEGNAFI et Mme Imen BOUSMAHA d'avoir accepté d'être nos examinateur et de juger notre travail.*

*Nous tenons à exprimer nos plus sincères remerciements à M. Houari MESMECHE pour son soutien, ses conseils, et toutes les informations et tous les documents qui nous a fournis et qui nous ont bien aidés à la rédaction de cette thèse.*

*Ce voyage n'aurait pas été possible sans nos professeurs et chargés de cours, notre école, l'école supérieure de sciences appliquées et son matériel académique ; des camarades de classe avec lesquels nous avons passé 3 ans remplis de beaux souvenirs, des moments amusants remplis de rires et de joie, et dont nous avons tiré de nombreuses leçons. Merci pour vous tous et chacun d'entre vous.*

*Enfin, un merci tout particulier à tout le personnel enseignant et de recherche qui a pris le temps de discuter et d'enrichir notre travail.*

## Résumé

Depuis des années, le marché du transport urbain bénéficie principalement du mode routier. Cependant, le mode ferroviaire s'impose aujourd'hui face aux besoins croissants des tramways.

Le tramway fait partie d'une grande attention en faveur du développement durable, de l'amélioration de la qualité de vie, de l'environnement et des facilités de déplacements pour les habitants.

C'est un transport urbain devenu incontournable dans les grandes villes, il facilite les voyages, les déplacements professionnels, les courses, les enfants pour aller à l'école ou même pour une simple sortie en famille.

L'alimentation électrique par le sol (APS) est une méthode d'alimentation pour tramways se substituant, dans certaines zones de centre-ville ou de rues étroites, il est fiable et réduit l'empreinte des lignes de tramway et préserve l'esthétique des environnements urbains.

Le réseau d'alimentation du tramway est constitué de plusieurs composants, donc nous avons modélisé ce réseau d'alimentation, et simulé chaque convertisseur plus le moteur de traction sous le logiciel Matlab.

**Mots-clés :** Tramways, déplacement, alimentation électrique par le sol, réseau d'alimentation, modélisation, simulation.

## Abstract

For years, the urban transportation market has mainly benefited from road transport. However, the rail mode is now essential to meet the growing needs of tramways.

The tramway is part of a major focus on sustainable development, improving the quality of life, the environment and the ease of travel for residents.

It is an urban transport system that has become a must in large cities, making travel, business trips, shopping, school trips and even simple family outings easier for children.

Ground Power Supply is an alternative power supply method for streetcars, in certain areas of city centers or narrow streets, it is reliable and reduces the footprint of tramway lines and preserves the aesthetics of urban environments.

The tramway power supply network is made up of several components, so we have modeled this power supply network, and simulated each converter plus the traction motor under Matlab software.

**Keywords :** Tramway, travel, Ground Power Supply, The tramway power supply, modelization, simulation.

## المخلص

لسنوات عديدة، استفاد سوق النقل الحضري بشكل أساسي من وضع الطرق. ومع ذلك، فإن وضع السكك الحديدية ضروري اليوم في مواجهة الاحتياجات المتزايدة لقطارات الترامواي.

يعتبر الترامواي جزءاً مهم لصالح التنمية المستدامة وتحسين نوعية الحياة والبيئة وسهولة الحركة للمقيمين. فهو وسيلة نقل حضرية أصبحت ضرورية في المدن الكبيرة، فهي تسهل السفر ورحلات العمل والتسوق والأطفال للذهاب إلى المدرسة أو حتى لنزهة عائلية بسيطة.

مصدر الطاقة تحت الأرض هو وسيلة بديلة لتزويد الطاقة بالترامواي، في بعض مناطق وسط المدينة أو الشوارع الضيقة، يمكن الاعتماد عليه ويقلل من أثر خطوط الترامواي ويحافظ على الجماليات البيئات الحضرية.

تتكون شبكة طاقة الترامواي من عدة مكونات، لذلك قمنا بتصميم شبكة الطاقة هذه، وقمنا بمحاكاة كل محول بالإضافة إلى محرك الجر في إطار برنامج Matlab.

**الكلمات المفتاحية:** الترامواي، الحركة، مصدر الطاقة تحت الأرض، شبكة طاقة الترامواي، بتصميم شبكة الطاقة.

# *TABLE DES MATIÈRES*



# Table des matières

<b>Résumé</b>	<b>vi</b>
<b>Abstract</b>	<b>vi</b>
<b>Résumé en arabe</b>	<b>vii</b>
<b>Table des figures</b>	<b>x</b>
<b>Liste d'abreviations</b>	<b>xiii</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Réseaux d'alimentation électrique des tramways</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction . . . . .	3
1.2 Historique . . . . .	3
1.3 Composition du réseau électrique de tramway . . . . .	4
1.3.1 Poste haute tension . . . . .	4
1.3.2 Sous station de traction . . . . .	4
1.3.3 Sous-système caténaire . . . . .	6
1.4 Matériel roulant . . . . .	16
1.4.1 Les composants de la rame . . . . .	16
1.5 Conclusion . . . . .	16
<b>2 Modélisation du circuit d'alimentation du tramway</b>	<b>17</b>
2.1 Introduction . . . . .	17
2.2 Les transformateurs . . . . .	17
2.2.1 Transformateur triphasé . . . . .	18
2.2.2 Modélisation du transformateur . . . . .	19
2.3 Les redresseurs . . . . .	24
2.3.1 Les types de montages redresseurs . . . . .	24
2.3.2 Modélisation du montage redresseur parallèle double PD3 . . . . .	25
2.4 Les hacheurs . . . . .	27

2.4.1	Hacheur Série(Buck) . . . . .	28
2.4.2	Modélisation d'un hacheur série . . . . .	28
2.4.3	Hacheur parallèle (Boost) . . . . .	30
2.5	Les onduleurs . . . . .	32
2.5.1	Domaine d'application . . . . .	33
2.5.2	Onduleur de tension triphasé . . . . .	34
2.5.3	Modélisation de l'alimentation électrique d'une machine par l'onduleur . . . . .	37
2.6	Moteur asynchrone . . . . .	40
2.6.1	Constitution du moteur asynchrone . . . . .	41
2.6.2	Principe de fonctionnement du moteur asynchrone . . . . .	42
2.6.3	Modélisation du moteur asynchrone . . . . .	43
2.6.4	Modélisation dans le repère de Park . . . . .	46
2.6.5	Représentation d'état du système . . . . .	49
2.7	Conclusion . . . . .	50
<b>3</b>	<b>Simulation du circuit d'alimentation du tramway</b>	<b>51</b>
3.1	Introduction . . . . .	51
3.2	Les logiciels . . . . .	51
3.3	simulation des composants de la sous-station . . . . .	52
3.3.1	Simulation du transformateur . . . . .	53
3.3.2	Simulation du redresseur PD3 non commandé . . . . .	54
3.3.3	Simulation de l'hacheur buck . . . . .	58
3.4	Simulation du boîtier d'alimentation APS . . . . .	61
3.5	Simulation des composants du tramway . . . . .	64
3.5.1	Simulation de l'hacheur rhéostatique . . . . .	64
3.5.2	Simulation de l'onduleur triphasé à commande MLI sinus-triangle	69
3.5.3	Simulation du moteur asynchrone . . . . .	71
3.6	Conclusion . . . . .	76
	<b>Conclusion générale</b>	<b>79</b>
	<b>References</b>	<b>82</b>

# Table des figures

1.1	La position de la sous-station de traction . . . . .	5
1.2	La ligne aérienne de contact à Oran . . . . .	7
1.3	Schéma démonstratif du pantographe . . . . .	7
1.4	Fonctionnement de la commande pneumatique . . . . .	8
1.5	Pantographe à commande électrique . . . . .	9
1.6	Alimentation par le sol à Dubaï . . . . .	10
1.7	Mode de fonctionnement de l'APS. . . . .	10
1.8	Principe d'alimentation (en vue de dessus) de l'APS. . . . .	10
1.9	Réseau tramway avec deux sources différentes d'alimentation. . . . .	11
1.10	Position des boîtiers d'alimentation . . . . .	12
1.11	Schéma du boîtier d'alimentation APS . . . . .	13
1.12	Localisation de l'équipement APS embarqué sur le tramway . . . . .	14
1.13	Schéma de l'équipement embarqué de l'APS. . . . .	14
1.14	Cabines du tramway CITADIS 302 ALSTOM. . . . .	16
2.1	Le transformateur . . . . .	18
2.2	Transformateur Dyn . . . . .	19
2.3	Transformateur Ddyn . . . . .	19
2.4	Notations autour du transformateur. . . . .	20
2.5	Schéma équivalent du transformateur. . . . .	22
2.6	Schéma équivalent ramené au secondaire. . . . .	23
2.7	Redresseurs triphasés. (a) P3. (b) PD3. . . . .	25
2.8	Redresseur double alternance montage PD3 . . . . .	25
2.9	Les tensions de sortie du redresseur PD3 . . . . .	27
2.10	Convertisseur Continu(DC) hacheur . . . . .	27
2.11	Schéma d'un hacheur série. . . . .	28
2.12	La forme d'onde de tension et du courant d'un hacheur série. . . . .	30
2.13	schéma d'un hacheur parallèle. . . . .	31
2.14	La forme d'onde de tension et du courant d'un hacheur Boost. . . . .	32
2.15	Schéma de principe de l'onduleur. . . . .	33
2.16	Schéma d'une alimentation sans interruption. . . . .	34

2.17	Structure d'un onduleur triphasé en pont. . . . .	34
2.18	Séquence de conduction des interrupteurs pour la commande 120°. . . . .	35
2.19	Séquence de conduction des interrupteurs pour la commande 180°. . . . .	36
2.20	Schéma de principe de la MLI. . . . .	36
2.21	Le signal de la MLI sinus-triangle. . . . .	37
2.22	Schéma de l'onduleur de tension . . . . .	38
2.23	Représentation d'un bras d'onduleur . . . . .	38
2.24	Schéma équivalent de l'onduleur . . . . .	39
2.25	Exemple de stator d'une Machine asynchrone . . . . .	41
2.26	Symboles du moteur asynchrone . . . . .	42
2.27	Illustration schématique d'un moteur asynchrone triphasé. . . . .	43
2.28	Position angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique. . . . .	47
3.1	Modèle d'un transformateur Dy. . . . .	53
3.2	Tension primaire du transformateur. . . . .	53
3.3	Tensions du secondaire de transformateur. . . . .	54
3.4	Montage d'un redresseur triphasé parallèle double PD3. . . . .	55
3.5	Tension de sortie redressée sans filtrage. . . . .	56
3.6	Courant de sortie redressée sans filtrage. . . . .	56
3.7	Redresseur triphasé non commandé avec filtrage capacitif. . . . .	57
3.8	Tension de sortie redressée avec filtrage. . . . .	57
3.9	Courant de sortie redressé avec filtrage. . . . .	58
3.10	Montage d'un hacheur série. . . . .	59
3.11	Signal de commande de l'interrupteur. . . . .	59
3.12	Tension d'entrée de sortie de l'hacheur série. . . . .	60
3.13	Schéma du boîtier d'alimentation APS sur Proteus . . . . .	61
3.14	Commande des contacteurs Co . . . . .	62
3.15	Commande de contacteurs Co 1 et Cm 1 . . . . .	63
3.16	Commande de contacteurs Co 2 et Cm 2 . . . . .	63
3.17	La commande de l'interrupteur d'isolement IS . . . . .	64
3.18	Montage de l'hacheur rhéostatique en mode traction . . . . .	65
3.19	Signal de commande de l'interrupteur . . . . .	65
3.20	Tension d'entrée et de sortie de l'hacheur en traction . . . . .	66
3.21	Montage de l'hacheur rhéostatique en mode freinage . . . . .	67
3.22	Signal de commande de l'interrupteur . . . . .	67
3.23	Tension et courant de sortie de l'hacheur en mode freinage . . . . .	68
3.24	Montage d'un onduleur triphasé commandé en MLI . . . . .	69
3.25	Les tensions de sortie de l'onduleur . . . . .	70
3.26	Les courants de sorties de l'onduleur . . . . .	71

---

3.27 Schéma bloc de simulation de l'association onduleur-MAS . . . . .	72
3.28 Les tensions à la sortie de l'onduleur . . . . .	72
3.29 équations de la machine au stator . . . . .	73
3.30 équations de la machine au rotor . . . . .	73
3.31 équation mécanique . . . . .	74
3.32 La transformé de PARK . . . . .	74
3.33 Allure du couple . . . . .	75
3.34 Allure de la vitesse . . . . .	75

# Liste d'abréviations

**AC** : Alternative Courant.

**DC** : Direct Courant.

**LAC** : Ligne Aérienne de Contact.

**APS** : Alimentation Par le Sol.

**HTA** : Haute Tension de niveau A.

**BTA** : Basse Tension de niveau A.

**BTB** : Basse Tension de niveau B.

**SST** : Sous Station de Traction.

**CEM** : Compatibilité Electromagnétique.

**ASI** : Alimentations Sans Interruption.

**IGBT** : Insulated Gate Bipolar Transistor.

**GTO** : Gate Turn Off.

**MOSFET** : Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor.

**PHT** : Poste Haute Tension.

**CVS** : ConVertisseur Statique.

**TRT** : TRansformateur de Traction.

**PD** : Parallèle double.

**PDq** : montage Parallèle Double.

**Sq** : montage Série.

**MLI** : Modulation de Largeur d'Impulsions.

**MAS** : Machine Asynchrone.

# Introduction générale

Les transports en commun représentent une solution pour limiter la consommation énergétique et les dépenses liées aux transports. 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, et tout particulièrement les tramways, le mode de transport collectif urbain le plus répandu dans le monde. C'est un moyen de transport écologique qui offre une alternative intéressante notamment pour désengorger les centres-villes.

L'architecture d'un réseau de transport collectif urbain est influencée par de nombreux facteurs d'ordre politique, historique, économique, géographique ou technique. Dans tous les cas de figure, la recherche de la fiabilité et de la disponibilité d'un réseau de transport collectif nécessite de cerner et de maîtriser son fonctionnement à tout instant.

Le tramway ou bien le tram tout court est un moyen de transport en commun urbain ou interurbain à roues en acier circule sur des voies ferrées équipées de rails plats, et qui roule dans les rues, au même niveau que les autobus et les voitures. Le tramway a été conçu pour remplacer les bus et diminuer la pollution par les gaz d'échappement.

Les tramways sont alimentés par un réseau électrique continu, ils captent leur énergie au travers d'une ligne aérienne électrique ou bien un câble tous-terrains raccordés au réseau de distribution. La distribution s'effectue en courant continu sous 750 V. Ce mode d'alimentation introduit des contraintes qui impacteront sur le fonctionnement du réseau des tramways.

Les réseaux d'alimentation électrique procurent des connexions physiques entre les producteurs d'énergie électrique et les consommateurs, et ils sont dimensionnés et protégés afin de permettre aux systèmes de fonctionner en régime normal comme en régime dégradé. La structure de ces réseaux intègre de nombreux convertisseurs statiques (redresseurs, onduleurs, hacheurs) et de nombreux composants passifs (transformateurs, lignes de transmission, filtres).

Dans notre projet on a réparti le travail en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, on va donner un aperçu général sur le tramway, ainsi que la présentation de l'infrastructure de l'alimentation du tramway et ses principaux

types.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation des différents convertisseurs et composants qui constituent le réseau d'alimentation tel que les transformateurs, les redresseurs, les onduleurs, les hacheurs et les moteurs.

Dans le troisième chapitre, on va réaliser la simulation de chaque composant de ce circuit d'alimentation sous le logiciel MATLAB-SIMULINK, en essayant d'avoir le meilleur fonctionnement et donner une interprétation des résultats.

Enfin, nous terminons ce mémoire par une synthèse qui résume tout le travail réalisé dans ce projet et les améliorations qui peuvent être envisagées.



# Réseaux d'alimentation électrique des tramways

## 1.1 Introduction

Le tramway, plus fréquemment appelé « tram », est une forme de transport public urbain ou interurbain à roues en métal se baladant sur des voies ferrées pourvues de rails plats et qui est installé en site propre ou encastré grâce à des rails à gorge dans la voirie routière. Actuellement, il est souvent à traction électrique alimenté par une caténaire.

Les nouvelles technologies telles que l'APS (alimentation par le sol) et celles qui sont encore en développement, comme les "systèmes à induction", sont très compatibles avec les centres villes. En effet, ces systèmes ne sont pas équipés de dispositifs caténaires et de leurs accessoires. Pour cette raison, la présence croissante de lignes de tramway dans les centres historiques des villes s'explique d'elle-même.

Dans ce chapitre, on va présenter l'infrastructure d'alimentation du tramway et les principaux types d'alimentation

## 1.2 Historique

Les premiers tramways se sont montrés aux USA durant le début du 19<sup>ème</sup> siècle, ils sont alors tractés par des animaux, globalement des canassons. Vu que le prix d'utilisation était inabordable en raison de la traction animale, la traction mécanique a été conçue dans les plus brefs délais : à vapeur dès 1873, à air comprimé (système Mékarski) et à eau surchauffée (système France) dès 1878, ensuite les tramways électriques depuis 1881. [1]

En Algérie, le premier tramway d'Alger a été mis en service en 2011, le tramway

de Constantine en 2013 , le tramway d'Oran en 2013, le Tramway de Sidi Bel Abbés en 2017, le Tramway d'Ouargla, mise en service en mars 2018 et le tramway de Sétif le 8 Mai 2018. Il y a plusieurs projets en cour de construction comme le tramway de Batna et Annaba dont les travaux ont été lancés en 2015 et le tramway de Mostaganem qui est prévu pour 2021. [2]

## 1.3 Composition du réseau électrique de tramway

### 1.3.1 Poste haute tension

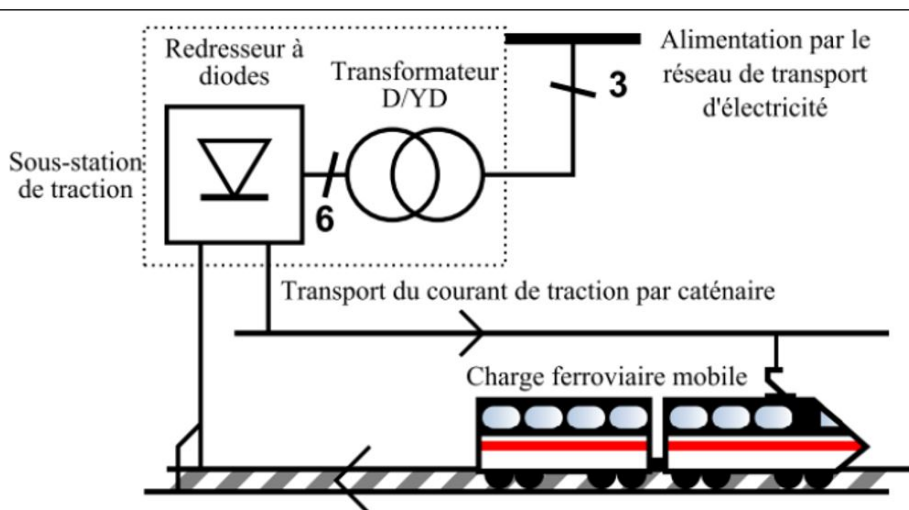
C'est un poste contenant un transformateur HTB/HTA qui réduit la tension d'arrivée de  $60\text{ kV}$  en  $30\text{ kV}$  pour que cette dernière soit redressée.

Il est composé des équipements suivants :

- Disjoncteurs HT  $60\text{ kV}$ .
- Transformateurs de puissance  $60\text{-}30\text{ kV}$ .
- Sectionneurs HT  $60\text{ kV}$  et  $30\text{ kV}$ .
- Sectionneurs MALT (mise à la terre) HT  $60\text{ kV}$ .
- Parafoudres HT  $60\text{ kV}$  et  $30\text{ kV}$ .
- Les tableaux HT  $30\text{ kV}$ .
- Tableaux basses tensions pour les auxiliaires.
- Les alimentations secourues.
- Armoire contrôle commande.
- Armoire arrêt d'urgence.

### 1.3.2 Sous station de traction

Une sous-station de traction est la liaison entre le réseau HTA local ( $30\text{ kV}$ ) et le réseau continu à  $750\text{ V DC}$ . Elle est usuellement raccordée à un réseau électrique alternatif à haute tension. Son rôle est de diminuer cette tension pour qu'elle puisse être utilisée par les moteurs et parfois de varier la fréquence de la tension ou de la convertir en tension continue (figure 1.1).



**FIGURE 1.1:** La position de la sous-station de traction

En fonction des demandes de l'exploitant, on répartie les sous-stations le long des lignes. Ces demandes sont exigées par les performances souhaitées pour la gestion de son exploitation, et les contraintes d'implantation dans la ville. En effet, les endroits susceptibles d'accueillir les sous-stations dans une ville sont assez limités. La distance entre les sous-stations est un facteur à mettre en adéquation avec le système utilisé pour le transport et la distribution du courant continu. Les tensions de lignes minimales acceptables en fonctionnement normal et dégradé sont primordiales. Par exemple, la tension minimale habituellement acceptable est de 500 V DC. [3] En général une sous-station mono groupe redresseur de 900 kW, débite 1200 A sous 750 V DC.

Pour déterminer la distance entre deux sous-stations on doit calculer les chutes de tension en ligne par rapport aux caractéristiques de la ligne et du trafic assuré.

On peut isoler une sous-station sans que le programme d'exploitation n'en souffre pendant les opérations de maintenance en effectue une redondance entre les sources d'alimentation.

Une sous-station contient les éléments suivants :

#### a- Tableau haute tension

Il est constitué de :

- Une case d'arrivée HT, propriétés du distributeur d'électricité.
- Une case de comptage.
- Une case de protection du transformateur de puissance.

### b- Transformateurs

Les transformateurs qu'on peut trouver dans une sous-station sont :

- Un transformateur principal de traction : sert à abaisser la tension d'entrée et fait passer toute la puissance électrique utilisée par le tram pour les fonctions traction, il est de puissance  $1000 \text{ kVA}$  sous  $30 \text{ kV}/2 \times 585 \text{ V}$ .
- Un transformateur des auxiliaires : de puissance  $100 \text{ kVA}$  sous  $30 \text{ kV}/410 \text{ V}$  pour l'alimentation des chargeurs de batterie et l'ASI (Alimentation Sans Interruption). [4]
- Un transformateur général moteur diesel : de puissance  $1000 \text{ kVA}$  sous  $30 \text{ kV}/410 \text{ V}$  pour l'alimentation des équipements dans les stations. [4]

### c- Groupe redresseur

Un redresseur, également appelé convertisseur AC / DC, est un convertisseur destiné à alimenter une charge continue à partir d'une source alternative.

En général, le groupe est d'une puissance de  $900 \text{ kW}$ . Son rôle est d'alimenter les tramways avec une tension continue de  $750 \text{ V}$ . Le redresseur est à base de diodes.

### d- Disjoncteur

Un dispositif de commutation mécanique capable de produire, de transporter et de couper un courant dans des conditions normales de circuit ainsi que dans des conditions anormales spécifiées de circuit telles qu'un court-circuit.

## 1.3.3 Sous-système caténaire

C'est l'ensemble des câbles permettant de dispatcher le courant fournit par les sous-stations et le canaliser jusqu'au moteur du tramway.

Le système caténaire est divisé en deux sous-systèmes :

### 1. La ligne aérienne de contact (LAC) :

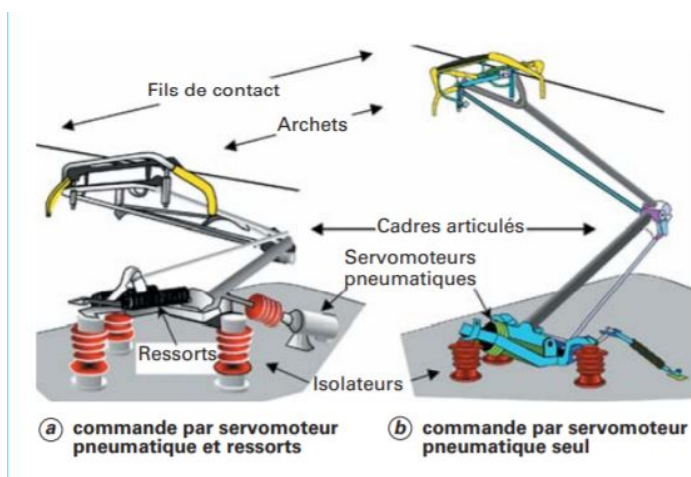
La LAC est le sous-système qui contient l'ensemble des câbles de contact, les câbles d'alimentation, les supports et les ancrages, et les équipements de protection comme les isolateurs, les parafoudre ...etc, qui permet l'acheminement de l'électricité aux rames du matériel roulant.

La figure(1.2) représente un exemple de tramway d'Oran avec une ligne aérienne.



**FIGURE 1.2:** La ligne aérienne de contact à Oran

Les véhicules à moteur circulant sur des voies alimentées par des lignes aériennes "caténaies" sont équipés d'un dispositif de prise de courant appelé "pantographe", ses fonctions sont de nature électrique et mécanique.



**FIGURE 1.3:** Schéma démonstratif du pantographe

- **Fonctions électriques :**

Cette fonction est assurée par l'archet qui comporte une ou deux palettes où sont fixés les barres de frottement en contact avec la ligne aérienne, le courant passe à travers le cadre du pantographe et des shunts (Un dispositif à très faible impédance par rapport à la charge, qui permet au courant de circuler d'un point du circuit à un autre avec très peu d'énergie) pour empêcher le courant de traverser par les roulements à billes de l'articulation du cadre du pantographe.

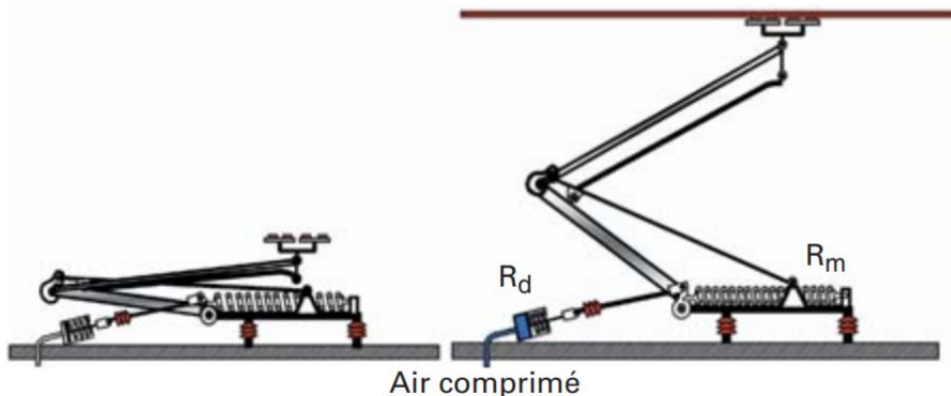
- **Fonctions mécaniques :**

Selon les conditions de mouvement du pantographe et le vent, le contact peut être perturbé, provoquant un "détachement" temporaire de l'archet, donc le contact a été soudainement interrompu, formant un arc entre l'archet et la ligne de contact.

Ces fonctions sont assurées par :

Un cadre articulé qui porte l'archet, fixé sur la toiture par des isolateurs, et un mécanisme de commande pneumatique avec ressorts.

La montée est obtenue en permettant à l'air comprimé de pénétrer dans le servomoteur jusqu'au contact de l'archet avec la caténaire. Le ressort maintient une pression constante quelle que soit la hauteur de la ligne de contact. Pour l'abaissement, la chambre du servomoteur est mise à l'atmosphère.



**FIGURE 1.4:** Fonctionnement de la commande pneumatique

Dans le cas d'un pantographe électrique, les mouvements de montée et de descente sont assurés par un moteur électrique annexe.

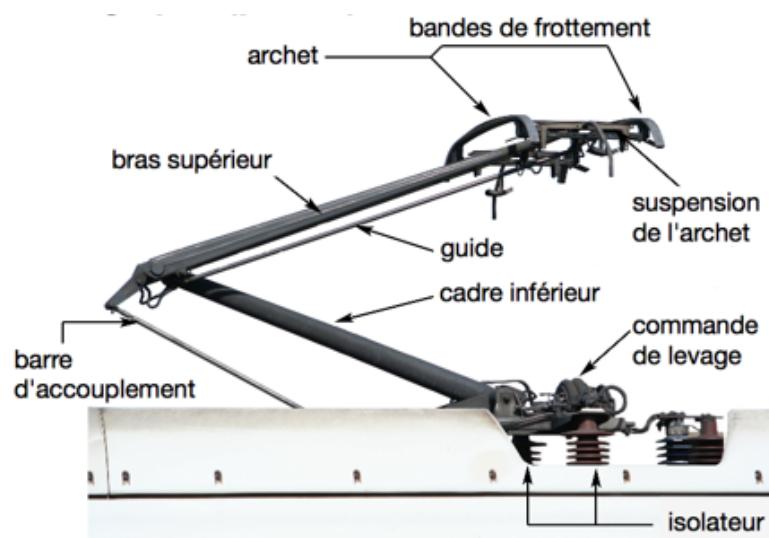


FIGURE 1.5: Pantographe à commande électrique

## 2. Alimentation par le sol (APS) :

Initialement introduite à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, cette technologie a été abandonnée pour des raisons de sécurité, mais le développement technologique a amélioré cette technologie et elle est devenue concurrentielle par rapport au LAC. [1]

Le principe de cette méthode est d'implanter un troisième rail segmenté en tronçons au milieu des deux autres et utiliser un conducteur (frotteur) sous le tramway.

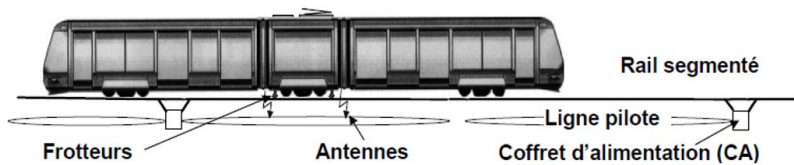
Chaque rame est équipée de deux frotteurs de prise de courant qui captent le courant depuis le segment dans le rail du milieu lorsque celui-ci est sous tension. Les segments sont alimentés uniquement quand ils sont entièrement recouverts par le tram et implanté par un flotteur. Hors présence de la rame, les segments sont mis hors tension et reliés au potentiel 0 V pour éviter tous les risques d'électrocution pour les autres usagers (piétons, cycles, motocycles). La figure(1.5) représente un exemple de tramway avec alimentation par le sol qui est celui de Dubaï.



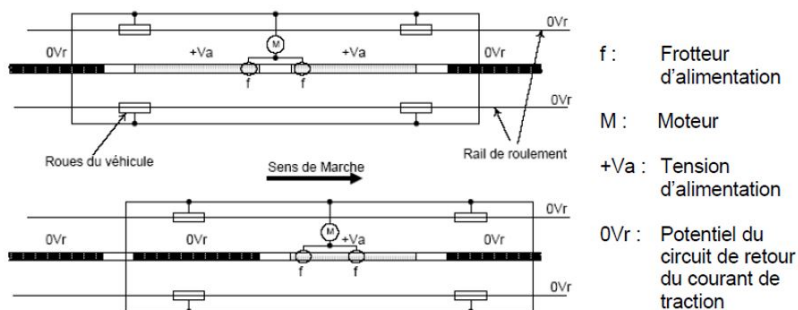
**FIGURE 1.6:** Alimentation par le sol à Dubaï

Chaque segment est séparé d'un autre par une zone électriquement isolée utilisée pour assurer le retour du courant.

A l'approche d'une rame, celle-ci émet un signal radio par l'intermédiaire d'antennes reliées aux frotteurs autorisant ou non l'alimentation du segment par le coffret d'alimentation (CA) par l'intermédiaire de la ligne pilote. [5]



**FIGURE 1.7:** Mode de fonctionnement de l'APS.

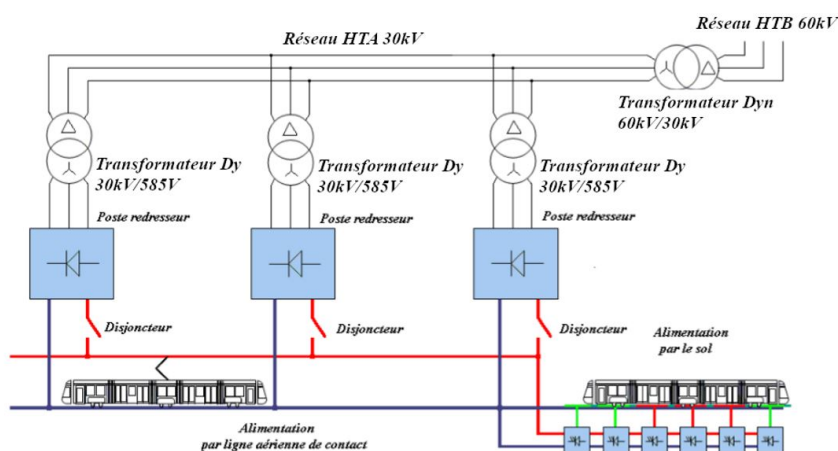


**FIGURE 1.8:** Principe d'alimentation (en vue de dessus) de l'APS.

Dans certains cas, on peut avoir les deux technologies dans une même ligne par exemple le tramway est alimenté par les lignes aérienne de contact (LAC)



dans un tronçon et après il sera alimenté par le sol dans un autre tronçon à cause des conditions architecturales.



**FIGURE 1.9:** Réseau tramway avec deux sources différentes d'alimentation.

**A- Boîtiers d'alimentation APS :** Les boîtiers d'alimentation APS sont installés à l'intérieur des regards APS qui se trouvent sur le long de la voie du tramway. Ces boîtiers sont disposés et connectés aux câbles d'alimentation de la sous station (+VA= 750 V) qui passent à travers une canalisation APS, reliant chaque regard APS.

Chaque boîtier d'alimentation peut fournir de l'énergie à deux (02) segments APS. [6] La conception du boîtier est à sécurité intégrée : Toute panne ou défaut n'a pas d'impact sur le niveau de sécurité du système APS qui reste sécurisé à tout moment en raison de l'absence d'énergie. De plus, les équipements en attente sont sécurisés et seuls les circuits actifs peuvent fournir une tension aux segments. [6]



**FIGURE 1.10:** Position des boîtiers d'alimentation

Chaque boîtier d'alimentation est composé des éléments suivants :

- Une enveloppe étanche à la poussière et à l'eau IP 68 (immersion dans l'eau pendant au moins 2 heures à 1m de profondeur) pour protéger les équipements électroniques et électriques de la poussière et des liquides et protéger l'environnement extérieur contre les risques électriques.
- Un contacteur de puissance (Co) par segment : utilisé pour connecter le segment APS au +VA
- Un contacteur (Cm) par segment : utilisé pour connecter le segment APS au 0 Vr.
- Un IGBT par segment et sa résistance de protection associée au Cm : utilisé pour surveiller la connexion du segment APS au 0 Vr par la mesure du courant.
- Un appareil de mesure du courant : utilisé pour protéger le (Co) contre l'ouverture en charge.
- Une unité électronique : utilisée pour gérer :
  - \* La détection en toute sécurité de la présence d'un tramway.
  - \* La commande du contacteur de puissance (Co).
  - \* Le contrôle IGBT et Cm pour la connexion à 0 Vr.

- \* Le contrôle de sécurité du retour à 0 Vr pour le segment lorsqu'il n'y a pas de tramway.
- Un interrupteur d'isolement (IS) : utilisé pour mettre le boîtier d'alimentation à l'état "hors service".
- Une unité de communication.

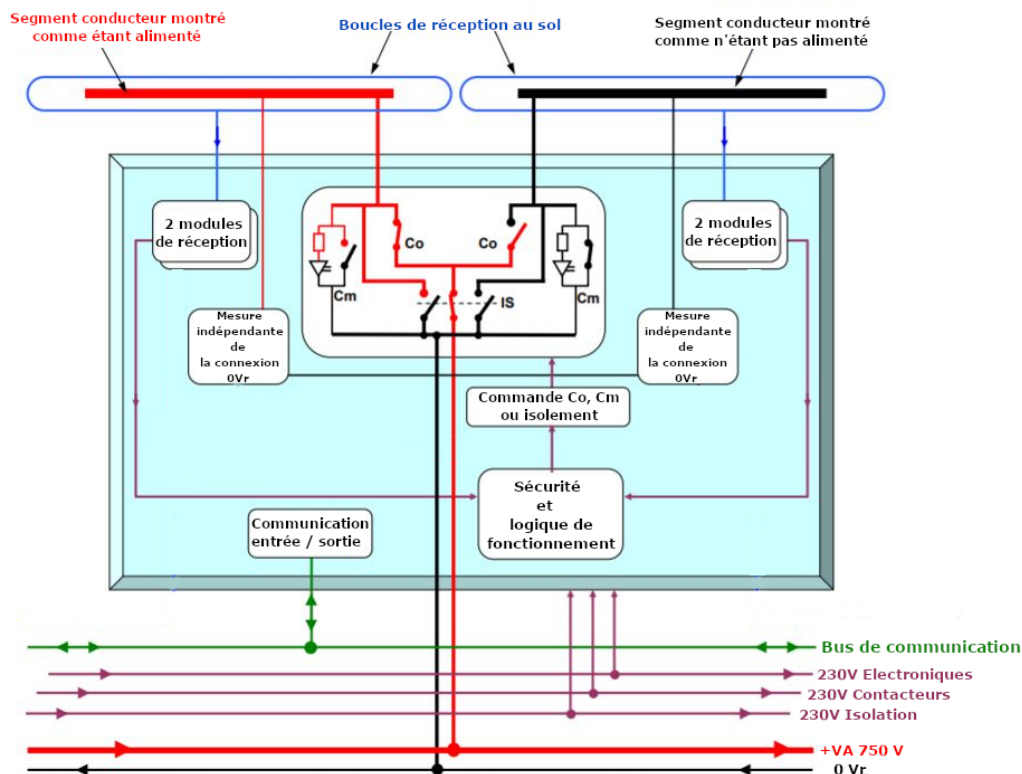


FIGURE 1.11: Schéma du boîtier d'alimentation APS

## B- Équipement embarqué de l'APS :

L'équipement embarqué de l'APS se compose de :

### (a) Équipement de toit :

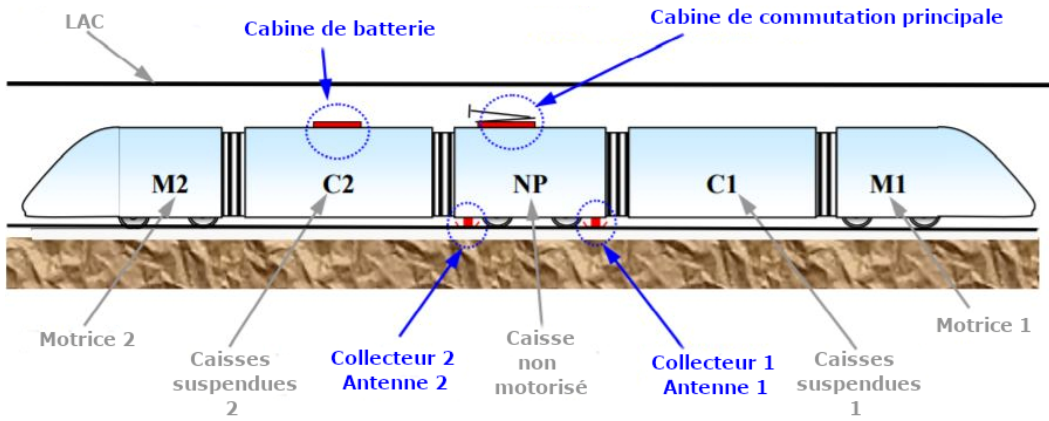
- Une cabine de commutation principale contenant l'interface du sabot collecteur.
- Une cabine de batterie contenant un chargeur et une batterie de traction.

### (b) Équipement du châssis :

- Deux Sabots collecteurs.
- Deux Antennes d'émission.

### (c) Équipement du conducteur :

- Boutons et voyants sur le tableau de bord.

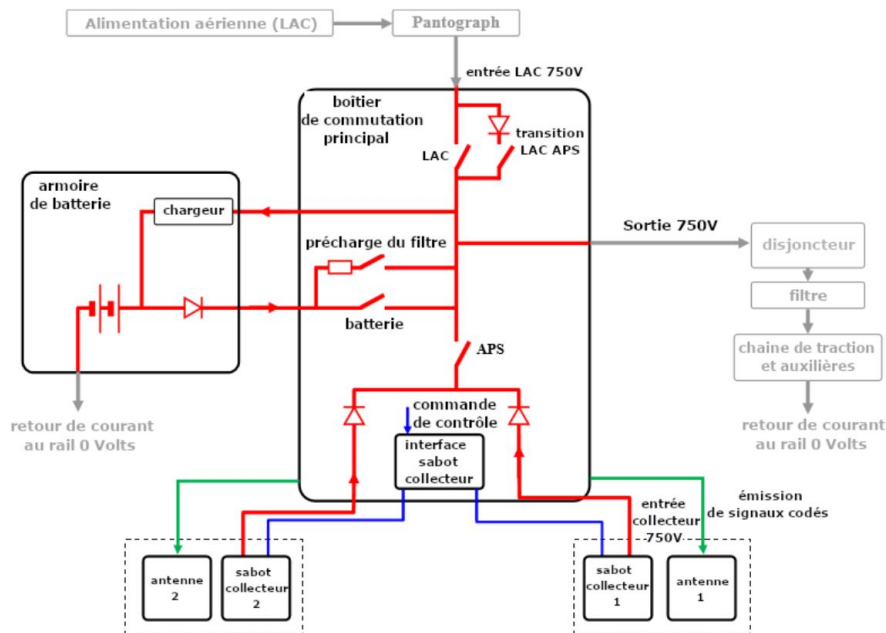


**FIGURE 1.12:** Localisation de l'équipement APS embarqué sur le tramway

Les équipements APS embarqués sont toujours situés dans une zone accessible pour l'équipe de maintenance.

Les équipements du châssis ne doivent pas interférer avec le gabarit du train défini, sauf pour les sabots collecteurs en position basse.

La figure suivante présente le schéma de l'équipement embarqué de l'APS :



**FIGURE 1.13:** Schéma de l'équipement embarqué de l'APS.

### C- Pourquoi l'APS ?

On s'intéresse dans notre cas à l'alimentation par le sol pour les avantages suivants :

- (a) L'idée de l'alimentation par le sol sur une portion de ligne a pour but de :
  - Préserver la beauté des quartiers historiques.
  - Tenir compte de contraintes génie civil existantes (Ouvrages d'art par exemple.
  - Permettre des interventions des secours
  - Minimiser les perturbations de compatibilité électromagnétique (CEM).
- (b) Sur une totalité, pour préserver l'ensemble de la ligne des contraintes imposées par la LAC (fil de contact, supports, poteaux... ). [7]
- (c) Les tramways alimentés par APS peuvent aussi intégrer des équipements de lignes aériennes et/ou des batteries de traction, la transition d'un mode d'alimentation à un autre est fluide. Si une ligne doit être prolongée, il est facile de prolonger le système APS avec elle. [7]

### D- Les inconvénients de l'APS :

Au départ, la chaussée supportait : [7]

- Les rails de roulement du tram.
- Les rails d'alimentation électrique.
- Les coffrets et câbles de l'infrastructure.
- Le trafic routier dense du centre-ville.

En 2006, des problèmes ont été constatés à Bordeaux : [7]

- Ruptures de profilés.
- Usures rapides.
- Perturbations CEM.
- Drainage insuffisant des équipements électriques .

Sinon les problèmes principaux sont le coût de l'installation et la maintenance qui est difficile. [7]

## 1.4 Matériel roulant

Le matériel roulant ferroviaire (la rame) est l'ensemble de cabines, motrices ou remorquées, élaboré pour se déplacer sur une voie ferrée. En Algérie Alstom est l'entreprise de construction des tramways. [1]

Dans notre étude on s'est basé sur le tramway d'Oran où la rame est de type Citadis 302, par contre le tramway d'Alger et de Constantine sont de type Citadis 402.

### 1.4.1 Les composants de la rame

La rame est bidirectionnelle avec 32.5 m de longueur et 2.65 m de largeur, composée de 5 modules et 3 bogies, a une capacité totale de 222 passagers dont 48 assis (8 sièges rabattables relevés) et 174 debout. [8]

Les bogies moteurs sont implantés sous les caisses d'extrémité appelées motrices 1 et 2 (M1 et M2). Le bogie porteur est situé sous la caisse centrale appelée nacelle porteuse (NP). Entre chaque motrice et la nacelle porteuse s'intercalent des caisses suspendues. C1 du côté M1 et C2 du côté M2.

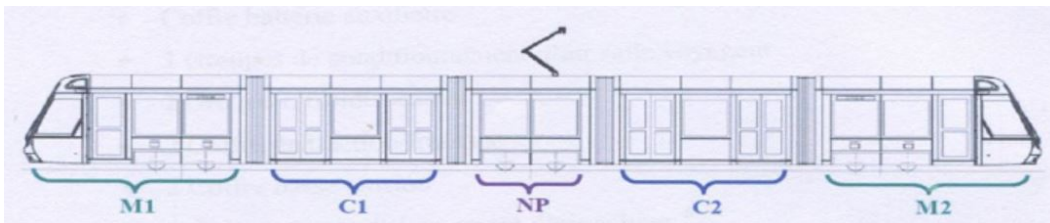


FIGURE 1.14: Cabines du tramway CITADIS 302 ALSTOM.

## 1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté l'infrastructure d'alimentation du tramway et les deux principaux types d'alimentation, alimentation par les lignes aériennes de contact et l'alimentation par le sol. Cette dernière est très intéressante car elle représente une solution éprouvée et performante pour les villes désireuses d'installer un tramway pour préserver leur patrimoine historique et l'environnement urbain.

# Modélisation du circuit d'alimentation du tramway

## 2.1 Introduction

Tout montage électronique nécessite de l'énergie pour fonctionner. Dans plusieurs cas, c'est une "alimentation électrique" ou "convertisseur de puissance" qui remplit ce rôle en fournissant une ou plusieurs tensions.

L'utilité des alimentations consiste à transformer et à stabiliser l'énergie d'une source (le réseau électrique ou des batteries) vers une charge, d'où leur dénomination plus rigoureuse de "convertisseurs de puissance".

Dans ce chapitre on va modéliser le circuit d'alimentation du tramway ainsi que les différents convertisseurs statiques.

## 2.2 Les transformateurs

Un transformateur remplit deux fonctions essentielles :

- Modifier le niveau de la tension pour parvenir celui souhaité à la charge
- Isoler galvaniquement la charge de la source. [9]

Le transformateur de puissance comprend des bobines enroulées autour d'un noyau de fer et positionnées dans un liquide diélectrique. Le principale rôle des constructeurs consiste à placer dans un volume le plus réduit possible des enroulements pouvant supporter sans défaillance les surtensions dues aux ondes à impacts rapides ou aux oscillations internes entretenues. Donc

un transformateur connecté à un réseau très haute tension est soumis à différents types de tension dont la connaissance est importante pour établir les contraintes auxquelles sont soumis les diélectriques.

Le transformateur contient deux enroulements ou plus séparés électriquement et couplés sur un noyau magnétique (figure 2.1). Le côté de la source est appelé le primaire et a  $N_1$  enroulements et le côté de la charge est appelé le secondaire et a  $N_2$  enroulements. Le flux  $\varphi$  est le flux mutuel. Le « • » indique la polarité des tensions. Par convention, un courant qui entre dans un « • » indique un flux positif. [10]

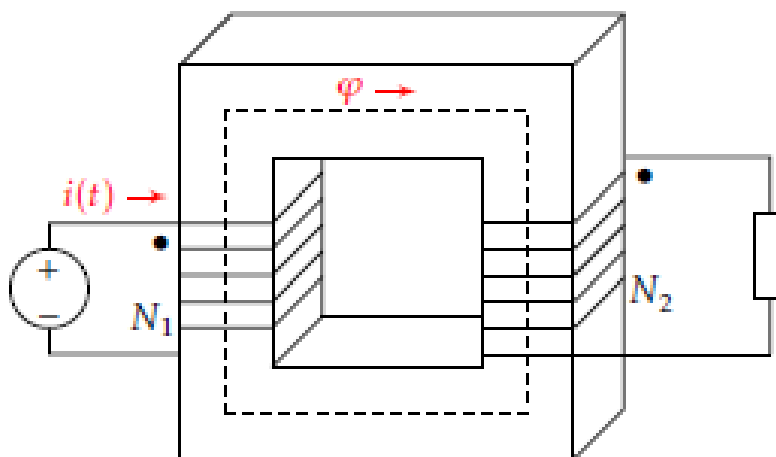


FIGURE 2.1: Le transformateur

### 2.2.1 Transformateur triphasé

Le circuit magnétique d'un transformateur triphasé est généralement constitué de trois colonnes disposées en un seul plan. Cette colonne contient un enroulement primaire et un enroulement secondaire et peut être vue comme un transformateur monophasé. Ces trois enroulements, primaires et secondaires, sont connectés dans une configuration en étoile, en triangle ou en zigzag, de manière à ce que le transformateur comporte trois bornes primaires et trois bornes secondaires seulement.

Les transformateurs qu'on trouve généralement dans le réseau électrique du tramway assurent la transformation de tension entre les niveaux HTA et BTB. Parmi les plus utilisés, on peut noter les transformateurs triphasés traditionnels Dyn, ou les transformateurs équipés de deux secondaires triphasés Ddyn.



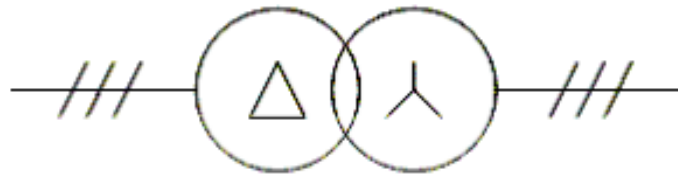


FIGURE 2.2: Transformateur Dyn

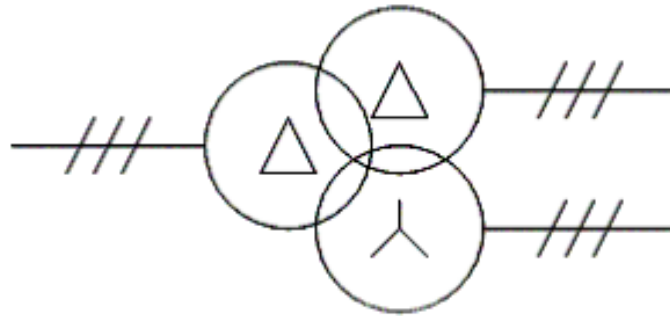


FIGURE 2.3: Transformateur Ddyn

Le montage triangle est préférable dans le cas de très forts courants, où chaque enroulement n'est parcouru que par un courant d'intensité  $J$  :

$$J = I/\sqrt{3}$$

Dans le cas de très hautes tensions, on préfère le couplage étoile pour que chaque bobine n'ait à supporter que  $V$  :

$$V = U/\sqrt{3}$$

### 2.2.2 Modélisation du transformateur

Pour modéliser le transformateur triphasé, on doit établir le modèle équivalent par phase (le modèle du transformateur monophasé).

#### A- Schéma équivalent du transformateur monophasé :

Le transformateur comporte deux enroulements de résistances  $R_1$  et  $R_2$  comportant  $N_1$  et  $N_2$  spires (Figure 2.4). Le primaire reçoit la tension  $U_1(t)$  et absorbe le courant  $i_1(t)$  et le secondaire délivre la tension  $U_2(t)$  et un courant  $i_2(t)$ . A vide on appelle  $U_2(t)$  par  $U_{2v}(t)$  et  $i_2(t)$  devient nulle. [11]

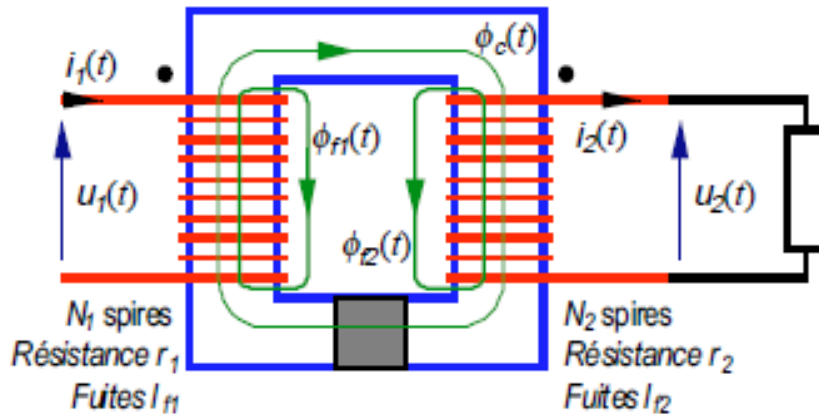


FIGURE 2.4: Notations autour du transformateur.

Le flux  $\phi_1(t)$  créé par l'enroulement primaire se décompose en un flux de fuite au primaire  $\phi_{f1}(t)$  auquel s'ajoute le flux commun  $\phi_c(t)$  dans le circuit magnétique.

#### Les équations des flux :

Flux total embrassé par les  $N_1$  spires du primaire :

$$\phi_1 = N_1 \times (\phi_c + \phi_{f1})$$

Flux total embrassé par les  $N_2$  spires du secondaire :

$$\phi_2 = N_2 \times (\phi_c + \phi_{f2})$$

#### Les équations des tensions :

$$U_1 = R_1 i_1 + N_1 \frac{d\phi_1}{dt} = R_1 i_1 + L_{f1} \frac{di_1}{dt} + N_1 \frac{d\phi_c}{dt}$$

$$U_2 = N_2 \frac{d\phi_2}{dt} - R_2 i_2 = -R_2 i_2 - L_{f2} \frac{di_2}{dt} + N_2 \frac{d\phi_c}{dt}$$

#### Les équations des courants :

Le flux  $\phi_c(t)$  est créé par le champ d'excitation magnétique dans le circuit magnétique.

Le théorème d'Ampère sur la ligne moyenne l :

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = H.l$$

On identifie cette fmm à celle créée par un courant  $I_1$  dans le primaire du transformateur lorsqu'il est à vide (c'est ce que l'on observe pratiquement :  $I_{1\mu} \approx I_{1v}$ ) [12]. Donc :

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = N_1 I_\mu$$

**Les équations en grandeurs complexe :**

$$\bar{U}_1 = R_1 \bar{I}_1 + jL_{f1}\omega \bar{I}_1 + jN_1\omega \bar{\phi}_c = \bar{E}_1 + (R_1 + jX_{f1})\bar{I}_1$$

Tel que :

$$\bar{E}_1 = jN_1\omega \bar{\phi}_c$$

et

$$X_{f1} = L_{f1}\omega$$

$$\bar{U}_2 = -R_2 \bar{I}_2 - jL_{f2}\omega \bar{I}_2 + jN_2\omega \bar{\phi}_c = \bar{E}_2 - (R_2 + jX_{f2})\bar{I}_2$$

Tel que :

$$\bar{E}_2 = jN_2\omega \bar{\phi}_c$$

et

$$X_{f2} = L_{f2}\omega$$

L'analyse de ces relations permet de définir le rapport de transformation :

$$m = \frac{E_2}{E_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

Comportement des courants :

$$N_1 \bar{I}_1 - N_2 \bar{I}_2 = N_1 \bar{I}_\mu$$

Soit

$$I_1 = I_\mu + mI_2$$

Comportement des flux :

$$\bar{\phi}_1 = N_1 \bar{\phi}_c + N_1 \bar{\phi}_{f1}$$

et

$$\bar{\phi}_2 = N_2 \bar{\phi}_c - N_2 \bar{\phi}_{f2}$$

A partir de ces équations, on établit le schéma équivalent du transformateur :

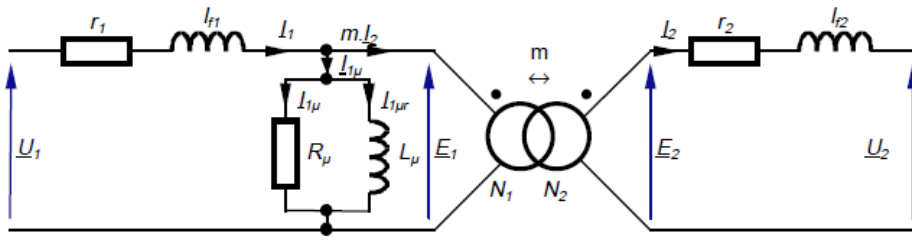


FIGURE 2.5: Schéma équivalent du transformateur.

### B- Schéma équivalent ramené au secondaire :

Les tensions primaires et secondaires à vide sont proportionnelles : elles sont dans le rapport de transformation. En ce qui concerne les courants  $I_\mu$  intervient :

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = N_1 I_\mu$$

Or, les transformateurs sont réalisés de manière à ce que le courant à vide (donc  $N_1 I_\mu$ ) soit le plus faible possible.

L'hypothèse de Kapp permet de négliger ce courant vis à vis de  $I_1$  si bien que  $I_1$  et  $I_2$  sont dans le rapport de transformation. [11]

Donc on a :

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = N_1 I_\mu \approx 0$$

soit

$$N_1 I_1 = N_2 I_2$$

donc

$$I_1 = m I_2 \quad (2.1)$$

$$\bar{U}_1 = \bar{E}_1 + (R_1 + jL_{f1}\omega)\bar{I}_1 \quad (2.2)$$

$$\bar{U}_2 = \bar{E}_2 - (R_2 + jL_{f2}\omega)\bar{I}_2 \quad (2.3)$$

Dans ces conditions, on assimile tous les défauts à un circuit RL au secondaire du transformateur. On multiplie l'équation (2.2) par  $m$  on obtient :

$$m\bar{U}_1 = m\bar{E}_1 + m(R_1 + jL_{f1}\omega)\bar{I}_1$$

Or

$$m\bar{U}_1 = \bar{U}_{2v}, \quad m\bar{E}_1 = \bar{E}_2 \quad \text{et} \quad \bar{I}_1 = m\bar{I}_2$$

Donc

$$\bar{U}_{2v} = \bar{E}_2 + m^2(R_1 + jL_{f1}\omega)\bar{I}_2$$

Mais d'après l'équation (2.3) :

$$\bar{E}_2 = \bar{U}_2 + (R_2 + jL_{f2}\omega)\bar{I}_2$$

En remplaçant

$$\bar{U}_2 = \bar{U}_{2v} - m^2(R_1 + jL_{f1}\omega)\bar{I}_2 - (R_2 + jL_{f2}\omega)\bar{I}_2$$

Donc, le secondaire se comporte comme une source de tension :

- de fem  $U_{2v}$ .
- d'impédance :

$$\bar{Z}_2 = (R_2 + m^2R_1) + j\omega(L_{f2} + m^2L_{f1})$$

On peut écrire l'équation du transformateur ramenée au secondaire :

$$\bar{U}_2 = \bar{U}_{2v} - (R'_2 + jL'_2\omega)\bar{I}_2 \quad (2.4)$$

Tel que :

La résistance totale ramenée au secondaire est :

$$R'_2 = R_2 + m^2R_1$$

et l'inductance totale ramenée au secondaire est :

$$L'_2 = L_{f2} + m^2L_{f1}$$

Alors, on obtient un schéma équivalent final ramené au secondaire :

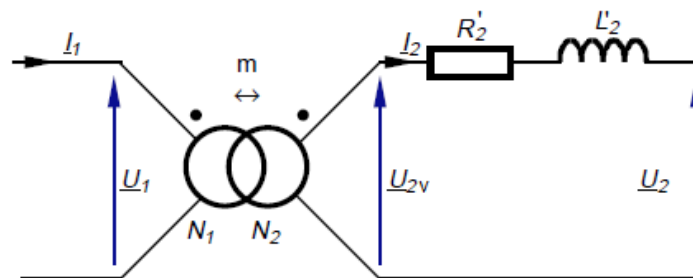


FIGURE 2.6: Schéma équivalent ramené au secondaire.

## 2.3 Les redresseurs

Les redresseurs sont des convertisseurs de l'électronique de puissance (alternatif-continu). Alimentés par une source de tension alternative, ils assurent d'alimenter le récepteur branché à leur sortie en courant continu. [12]

Il existe deux types de redresseurs :

- Les redresseurs non commandés : Ou les redresseurs à diodes, n'accordent pas la variation du rapport entre la tension alternative d'entrée et la tension continue de sortie. De plus, ils sont irréversibles, c'est-à-dire la puissance n'a qu'un seul sens du côté alternatif vers le côté continu.
- Les redresseurs commandés : Ou les redresseurs à thyristors, sont réversibles et permettent pour une tension alternative d'entrée fixée, la variation de la tension continue de sortie.

Dans notre étude, on va se concentrer sur les redresseurs non commandés.

### 2.3.1 Les types de montages redresseurs

Remarque : Il faut refaire les schémas de P3 et PD3 à base de diode.

On distingue deux types de montages : [12]

- $P_q$  : Montages avec source en étoile et un seul commutateur ou redresseur "simple alternance".
- $PD_q$  : Montages avec source en étoile et deux commutateurs ou redresseurs "en pont" avec source étoilée.

Avec «  $q$  » le nombre de phases (3 phases).

La (figure 2.7) présente le schéma électrique des montages  $P3$  et  $PD3$ .

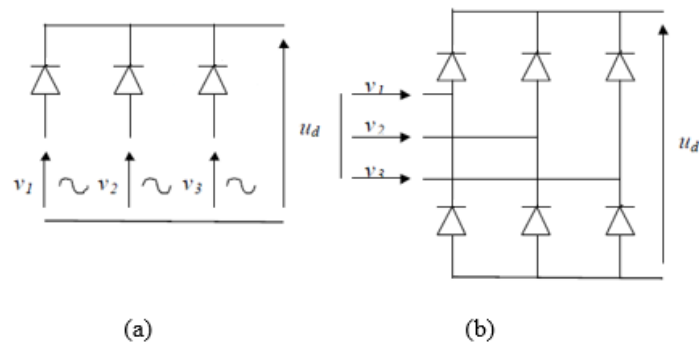


FIGURE 2.7: Redresseurs triphasés. (a) P3. (b) PD3.

En pratique, le redresseur le plus utilisé est le PD3. Donc, on va modéliser seulement le redresseur PD3

### 2.3.2 Modélisation du montage redresseur parallèle double PD3

Les enroulements secondaires du transformateur sont aussi couplés en étoile, le redresseur composé de 6 diodes, un premier groupe ( $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ ) monté en cathode commune (nommé commutateur plus positif  $M$ ) et le deuxième groupe ( $D'_1$ ,  $D'_2$ ,  $D'_3$ ) monté en anode commune (nommé commutateur plus négatif  $N$ ). La charge est située entre les point  $M$  et  $N$ . Les tensions des enroulements secondaires de valeur efficace forment un système triphasé direct. La figure 2.9 représente le montage PD3, seul le secondaire en étoile du transformateur est représenté.

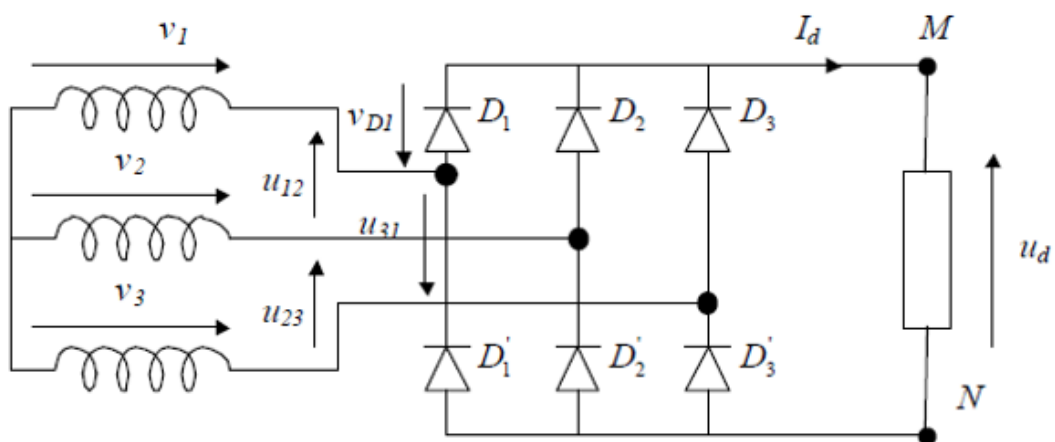


FIGURE 2.8: Redresseur double alternance montage PD3

La présence d'un courant continu dans la charge impose la conduction de deux diodes à tout instant, une de chaque commutateur :

- Pour le commutateur à cathode commune, la diode dont l'anode est au potentiel le plus élevé conduit, d'où la dénomination « + positif ». [13]
- Pour le commutateur à anode commune, la diode dont la cathode est au potentiel négatif le plus faible conduit, d'où la dénomination « - négatif ». [13]

Donc on a :

$$D_1 D'_2 \text{ sont passantes} : u_d = v_1 - v_2$$

$$D_1 D'_3 \text{ sont passantes} : u_d = v_1 - v_3$$

$$D_2 D'_3 \text{ sont passantes} : u_d = v_2 - v_3$$

etc...

Donc, chaque diode est passante pendant un tiers de période. Cependant, la tension redressée est composée de six portions de sinusoïdes par période. La figure 2.9, représente l'allure de la tension redressée  $u_d$  ainsi que  $V_{D1}$  la tension aux bornes de la diode  $D1$ .

La tension redressée  $u_d$  est périodique de période  $T/6$ , ( $T/p$  tel que ( $p$ ) indice de pulsation).

Donc la tension entre  $T/12$  et  $T/4$  s'exprime par :

$$u_d = v_1 - v_2 = V_{max} \left( \sin(\omega t) - \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \right)$$

La valeur moyenne de cette tension est calculée par :

$$U_{dmoy} = \frac{6}{T} \int_{\frac{T}{12}}^{\frac{T}{4}} V_{max} (\sin(\omega t) - \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})) dt = \frac{3\sqrt{3}V_{max}}{\pi}$$

La valeur efficace de cette tension est calculée par :

$$\begin{aligned} U_{deff} &= \sqrt{\frac{6}{T} \int_{\frac{T}{12}}^{\frac{T}{4}} \left( V_{max} \left( \sin(\omega t) - \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \right) \right)^2 dt} \\ &= \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} V_{max} \sqrt{1 + \frac{\sin(\frac{2\pi}{6})}{\frac{2\pi}{6}}} \\ &= 1.662 V_{max} \end{aligned} \tag{2.5}$$



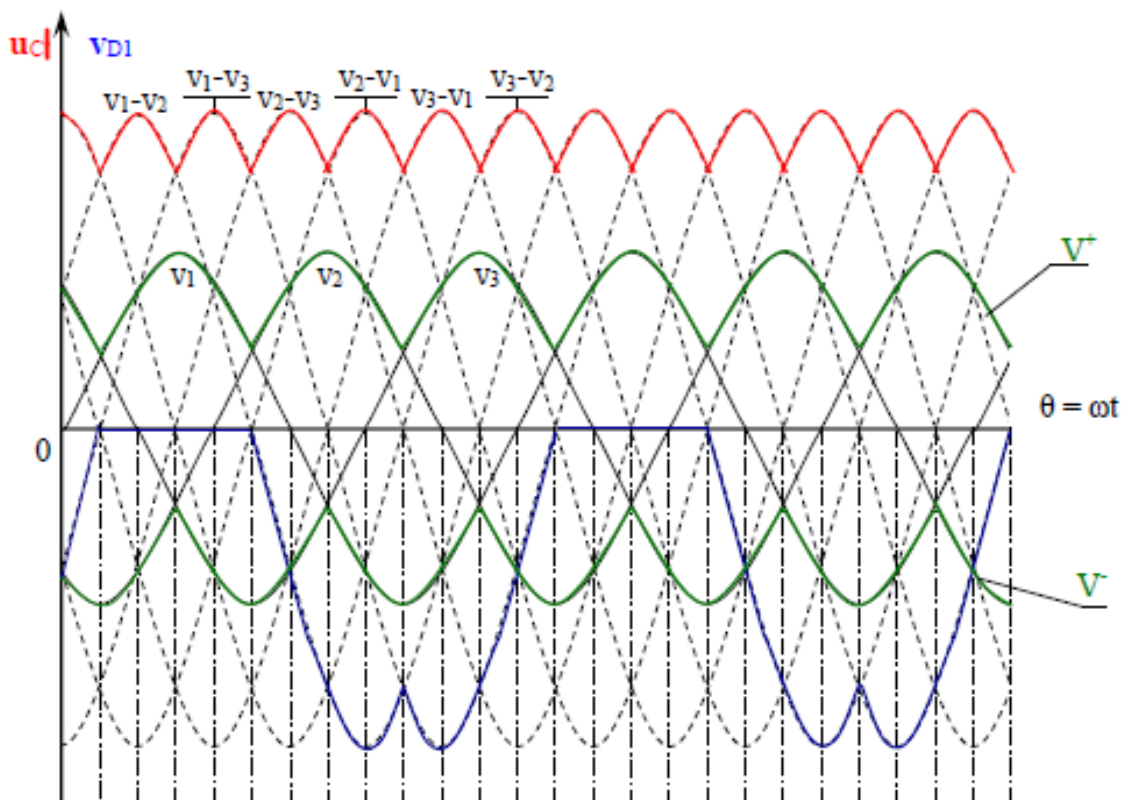


FIGURE 2.9: Les tensions de sortie du redresseur PD3

## 2.4 Les hacheurs

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques qui permettent de convertir une tension continue à une autre tension continue mais de valeur supérieure ou inférieure. Ils régulent le transfert d'énergie entre une source électrique continue et une charge électrique continue.

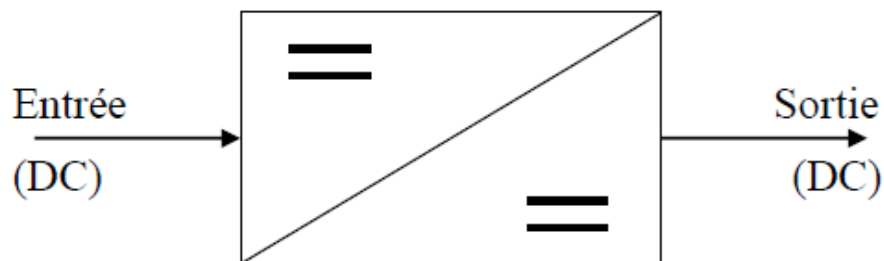


FIGURE 2.10: Convertisseur Continu(DC) hacheur

Les hacheurs sont spécialement exploités pour :

- La variation de vitesse d'un moteur à courant continu.

- Le freinage par récupération.
- Alimentation d'appareil électronique grand public (PC, ...).

Il existe différents types d'hacheur :

- Hacheur série (Buck).
- Hacheur parallèle (Boost).
- Hacheur 2 et 4 quadrants.
- Les alimentations à découpage.

Dans notre étude on va s'intéresser aux hacheurs série et parallèle.

### 2.4.1 Hacheur Série (Buck)

Un hacheur série est un convertisseur statique qui permet de commander le débit d'une tension continue comme source dans un récepteur de courant continu. L'énergie ne circule que dans un seul sens de l'entrée vers la sortie et il contient qu'un seul interrupteur commandé et une diode de roue libre. [14]

Ce hacheur est de type abaisseur, la tension de sortie est toujours inférieure à la tension d'entrée.

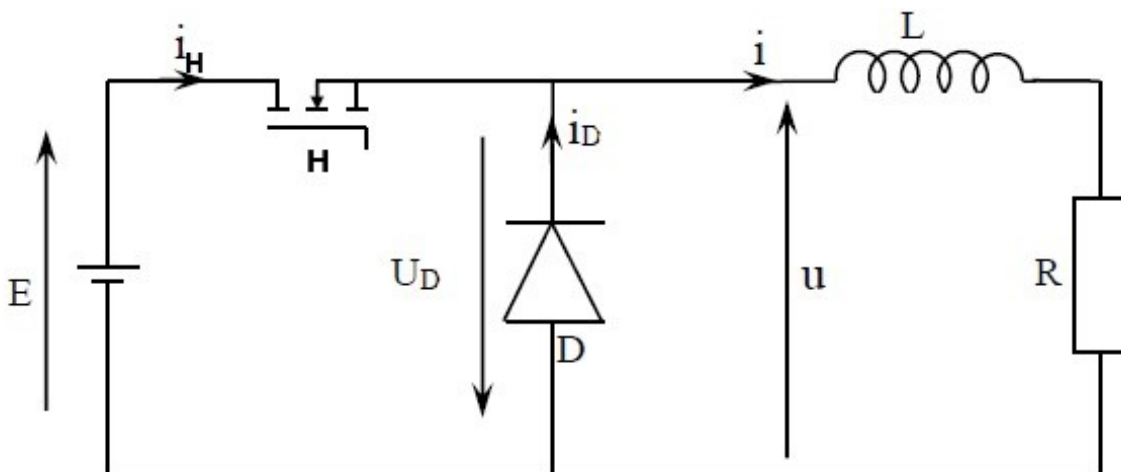


FIGURE 2.11: Schéma d'un hacheur série.

### 2.4.2 Modélisation d'un hacheur série

On a  $H$  est parfait ( $V_H = 0$  en conduction) est la diode  $D$  (roue libre) est idéale.

$H$  est commandé en commutation à la période  $T$  avec un rapport cyclique  $\alpha$ . Le rapport cyclique est défini comme

$$\alpha = \frac{\text{temps de conduction}}{T}$$

$0 \leq t \leq \alpha T$  : l'interrupteur  $H$  est passant, donc on obtient :

$$U_D = -E$$

$$u = E$$

$$I_H = I$$

$$I_D = 0$$

$$Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} = E$$

Sachant que :

$$i(0) = I_{min}$$

et

$$i(\alpha T) = I_{max}$$

$$\Rightarrow i(t) = \frac{E}{R} + \left( I_{min} - \frac{E}{R} \right) \exp \left( -\frac{t}{\tau} \right)$$

De  $\alpha T \leq t \leq T$  : l'interrupteur  $H$  est bloqué, donc on obtient :

$$U_D = 0$$

$$u = 0$$

$$I_H = 0$$

$$I_D = I$$

$$Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} = 0$$

Sachant que :

$$i(T) = I_{min}$$

et

$$i(\alpha T) = I_{max}$$

$$\Rightarrow i(t) = I_{max} \exp - \left( \frac{t - \alpha T}{\tau} \right)$$

Donc on a le graphe suivant :

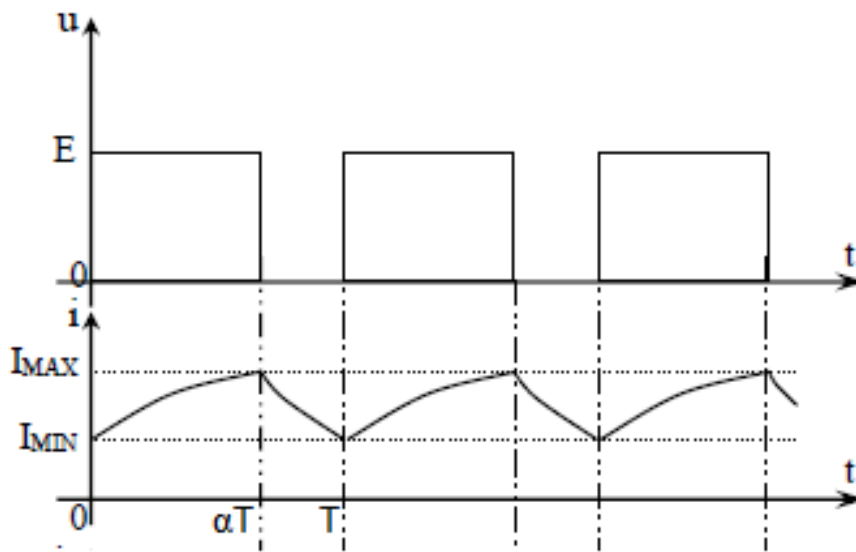


FIGURE 2.12: La forme d'onde de tension et du courant d'un hacheur série.

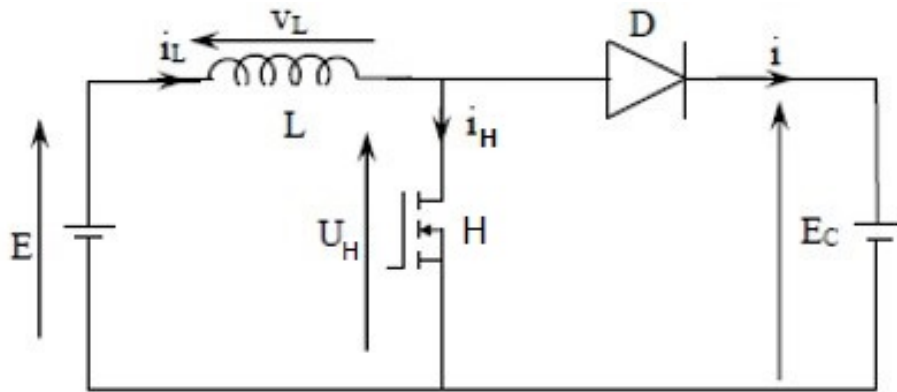
D'où la relation entre la tension d'entrée et de sortie est :

$$\begin{aligned}
 U_{moy} &= \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} E dt = \alpha E \\
 &\Rightarrow U_{moy} = \alpha E \\
 I &= \frac{\alpha E}{R}
 \end{aligned}$$

### 2.4.3 Hacheur parallèle (Boost)

Un hacheur parallèle est un convertisseur statique qui permet de changer le courant débité par une source de courant continu dans un récepteur de tension continue. Ce hacheur est constitué d'un interrupteur à ouverture commandée en parallèle avec le récepteur et d'un interrupteur à fermeture et ouverture spontanée entre la source et le récepteur. [14]

Ce hacheur est de type élévateur, la tension de sortie est toujours supérieure à la tension d'entrée.



**FIGURE 2.13:** schéma d'un hacheur parallèle.

$0 \leq t \leq \alpha T$  : l'interrupteur H est passant, donc :

$$U_H = 0$$

$$V_D = -E_c$$

$$I_H = I_L$$

$$I_D = 0$$

$$\frac{L di_L(t)}{dt} = E$$

Sachant que :

$$i(0) = I_{Lmin}$$

et

$$i(\alpha T) = I_{Lmax}$$

$$\Rightarrow i_L(t) = \frac{E}{L}t + I_{Lmin}$$

De  $\alpha T \leq t \leq T$  : l'interrupteur H est bloqué, donc on obtient :

$$U_H = E_c$$

$$V_D = 0$$

$$I_H = 0$$

$$I_D = I_L$$

$$\frac{L di_L(t)}{dt} = E - E_c$$

Sachant que :

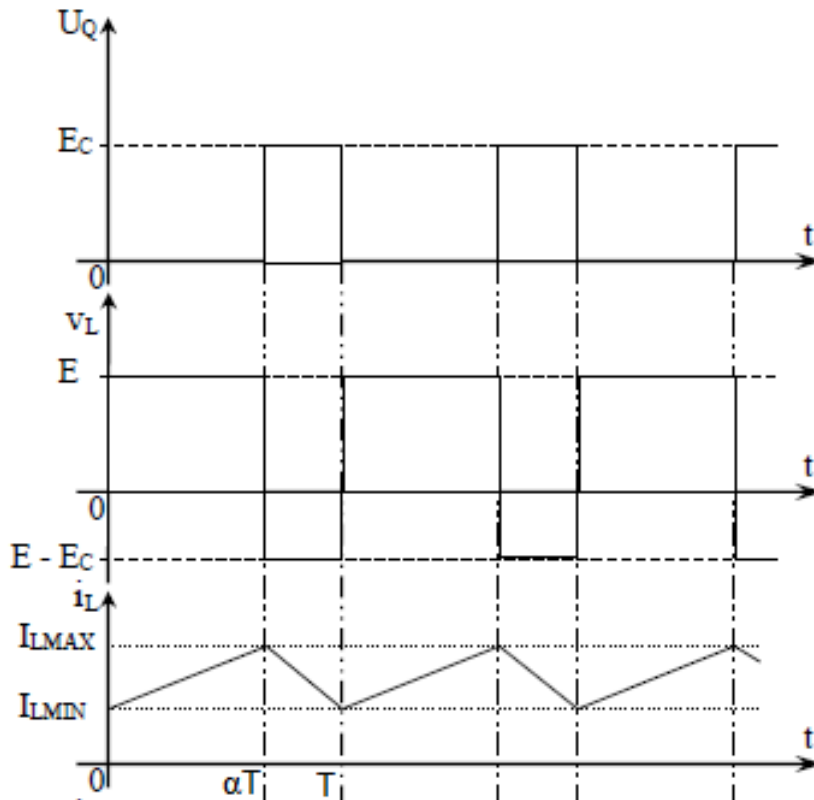
$$i(T) = I_{Lmin}$$

et

$$i(\alpha T) = I_{L_{max}}$$

$$\Rightarrow i_L(t) = \left( \frac{E - E_c}{L} \right) (T - \alpha T) + I_{L_{max}}$$

Donc on a le graphe suivant :



**FIGURE 2.14:** La forme d'onde de tension et du courant d'un hacheur Boost.

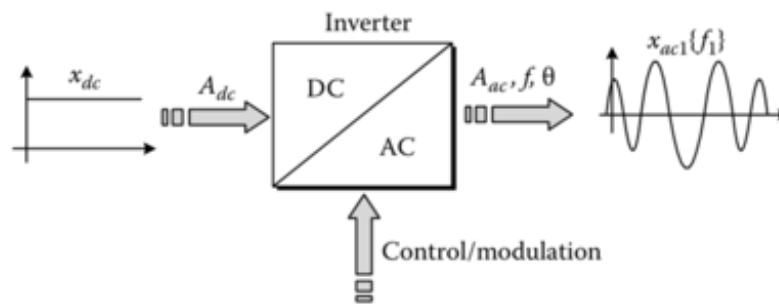
D'où la relation entre la tension d'entrée et de sortie est :

$$E_{c_{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T E_c(t) dt = \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T E dt$$

$$\Rightarrow E_{c_{moy}} = \frac{E}{1 - \alpha}$$

## 2.5 Les onduleurs

Un onduleur est un dispositif d'électronique de puissance permettant d'obtenir à partir d'une source d'énergie électrique continue des tensions et des courants alternatifs à fréquence fixes ou variables en tant que source d'alimentation alternative monophasée ou triphasée. [15] La représentation symbolique d'un onduleur (figure 2.15).



**FIGURE 2.15:** Schéma de principe de l'onduleur.

Les onduleurs sont utilisés en électrotechnique pour :

- Fournir des courants ou des tensions alternatifs de fréquence et amplitudes variables comme les onduleurs servant à alimenter des moteurs à courant alternatif.
- Fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes comme le cas des alimentations de sécurité destinées à se substituer au réseau en cas de défaillance. [16]

L'énergie stockée dans les batteries de secours est reproduite sous forme continue, donc l'onduleur est requis pour reproduire la forme de tension et fréquence du réseau.

### 2.5.1 Domaine d'application

Les onduleurs ont été conçus principalement pour fonctionner dans deux domaines d'application :

- Les alimentations sans interruption (ASI) : En temps normal, la batterie est maintenue en charge, mais l'énergie est produite par le réseau via le redresseur et l'onduleur. En cas de panne dans le réseau, comme dans certaines applications sensibles (hôpitaux, serveurs informatiques...) qui ne peuvent supporter la moindre panne d'alimentation, l'énergie est produite par la batterie via l'onduleur.
- La variation de vitesse : pour bien régler la vitesse des machines (MAS) et jouer sur la fréquence de leur tension d'alimentation, on doit réaliser un redresseur triphasé qui fournit une tension continue et puis on ajoute un onduleur à la suite qui crée le réseau de tension triphasé sinusoïdal à une amplitude et à une fréquence accordant le fonctionnement souhaité.

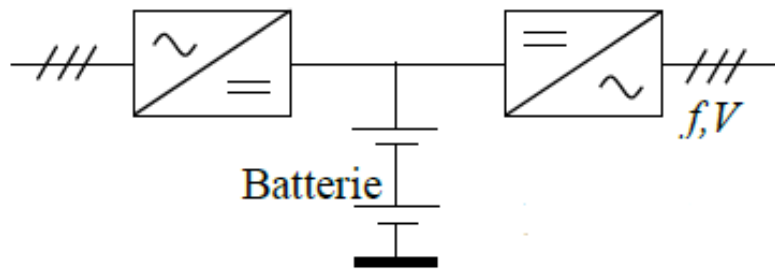


FIGURE 2.16: Schéma d'une alimentation sans interruption.

## 2.5.2 Onduleur de tension triphasé

L'onduleur en pont triphasé se compose d'une source de tension continue et de six interrupteurs posés en pont, la tension continue est en général issue d'un redresseur à diode triphasé qui est suivi d'un filtre. Il est largement utilisé en MLI pour alimenter des récepteurs triphasés équilibrés à tension et fréquence qui sont variables. Il peut être vu comme la superposition de trois onduleurs monophasés en demi-pont. Chacune des trois tensions de sortie est issue d'une onde bistable qui prend les valeurs  $-U$  et  $+U$  mais qui est déphasée de  $2\pi/3$  de chacune d'entre elles. [17]

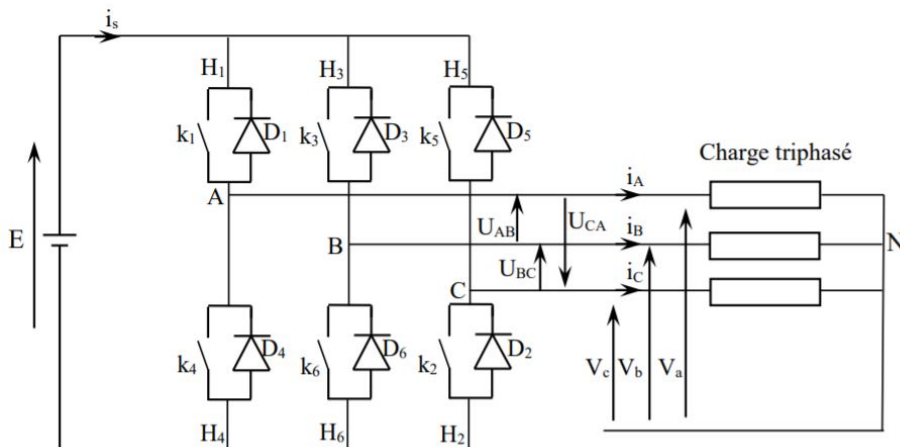


FIGURE 2.17: Structure d'un onduleur triphasé en pont.

L'onduleur alimenté par une source de tension idéale impose à sa sortie, par le jeu d'ouverture des interrupteurs, une tension alternative obtenue par une suite de sections rectangulaires à deux niveaux, le cycle de fonctionnement est déterminé par la commande de l'interrupteur.

L'architecture du convertisseur se constitue de plusieurs branches, chacune est connectée à une phase du réseau et comprend deux interrup-



teurs.

Les interrupteurs de puissance sont les éléments de base de l'onduleur, ils se composent d'un composant de puissance, de GTO (Gate Turn Off), de MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) ou d'IGBT (Insulated Gate Bipolaire Transistor) en parallèle avec une diode, cette dernière a une fonction de garantir la continuité du courant quand il change de direction. [14]

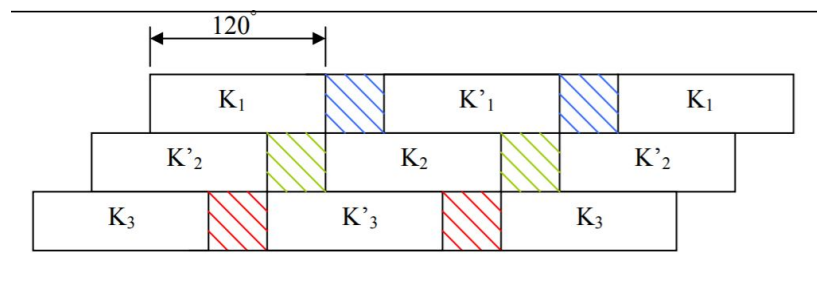
Les caractéristiques de l'onduleur sont essentiellement déterminées par ces composants de puissance. Celles-ci définissent la puissance, la tension et le courant maximum commutés, la fréquence de commutation maximale et le temps mort. Les deux derniers paramètres sont très importants car ils influencent grandement la conception de l'onduleur. [14]

Pour la commande des interrupteurs il existe plusieurs types, les plus souvent utilisés sont :

- La commande  $120^\circ$  (décalée).
- La commande  $180^\circ$  (symétrique).
- La commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI).

• **La commande  $120^\circ$  :**

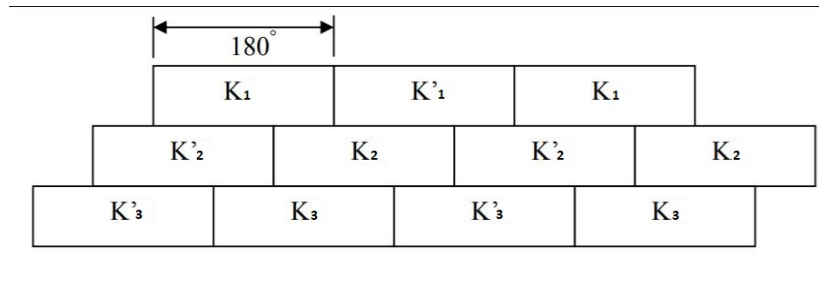
La période de commande de l'interrupteur est un tiers de la période, mais le décalage d'un bras par rapport à l'autre est de  $120^\circ$ . [17], [18]



**FIGURE 2.18:** Séquence de conduction des interrupteurs pour la commande  $120^\circ$ .

• **La commande  $180^\circ$  :**

Le but de la conception de cette commande est de contrôler la durée de commande des interrupteurs équivalent à une demi période, avec un décalage de  $2\pi/3$  et  $4\pi/3$  du deuxième et troisième bras par rapport au premier bras. [17], [18]

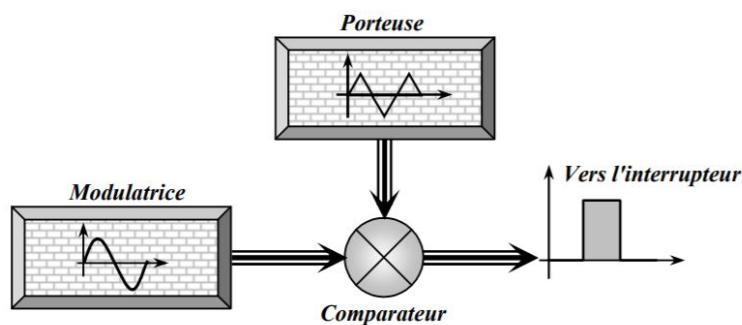


**FIGURE 2.19:** Séquence de conduction des interrupteurs pour la commande 180°.

•**La commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI) :**

La modulation de largeur d'impulsion (PWM Pulse Width modulation en anglais) est une technique qui adapte une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie et forme chaque demi-onde d'une tension de sortie dans une succession de créneaux de largeurs appropriées. Cette technique peut être vue comme une extension du principe de commande de commutation où la durée de l'impulsion n'est plus constante mais choisie de manière à supprimer le nombre maximum d'harmoniques de faibles rangs qui sont difficilement filtrables.

Le concept de base de la modulation de largeur d'impulsion est basé sur le découpage d'une onde rectangulaire pleine. Ainsi, la tension de sortie de l'onduleur est obtenue par une suite de tranches d'amplitude équivalente à la tension d'alimentation (DC) et de largeur variable. La technique la plus courante pour la reconstitution d'un signal MLI est de comparer un signal triangulaire dit porteur haute fréquence avec un signal de référence nommé modulateur, qui constitue l'énergie du signal collecté à la sortie de l'onduleur. [19]



**FIGURE 2.20:** Schéma de principe de la MLI.

### Modulation sinus-triangle :

La MLI sinus-triangle est obtenue en comparant une onde modulante à fréquence basse (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangle. Les moments de commutation sont déterminés par les points de croisement entre la porteuse et le modulateur. La fréquence de commutation des interrupteurs est définie par la porteuse. En triphasé, les trois références sinusoïdales sont décalées de  $2\pi/3$  à la même fréquence  $f$ . [14]

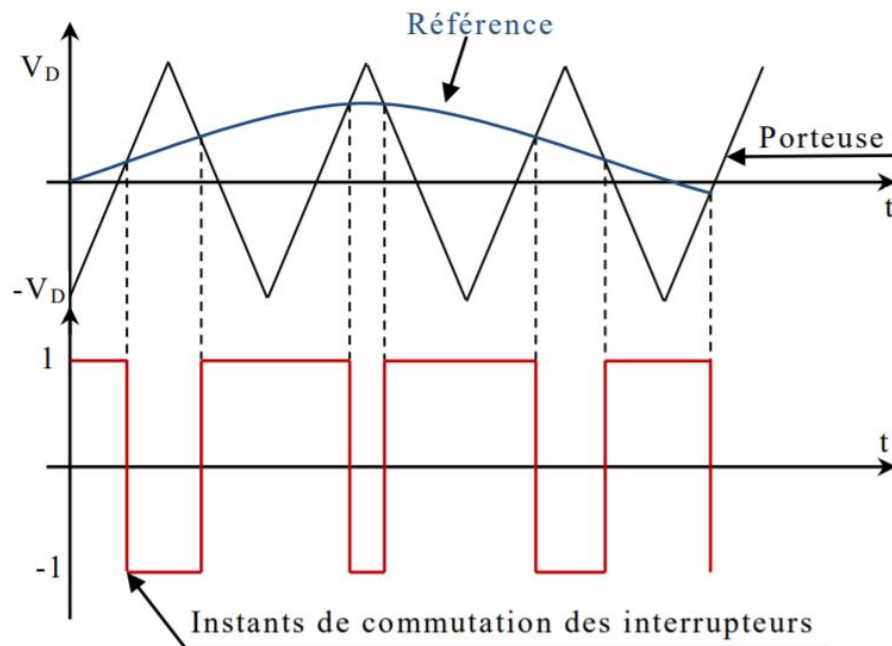
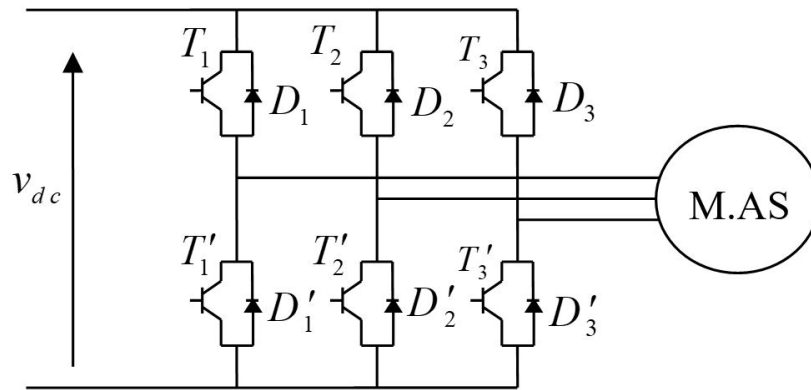


FIGURE 2.21: Le signal de la MLI sinus-triangle.

### 2.5.3 Modélisation de l'alimentation électrique d'une machine par l'onduleur

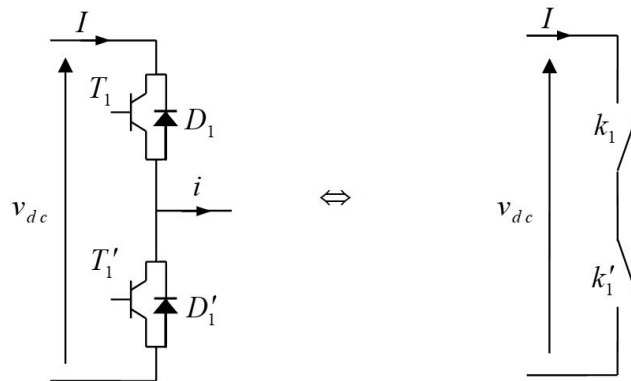
La figure 2.22 présente un schéma d'un onduleur triphasé qui alimente un moteur asynchrone. [20], [21]



**FIGURE 2.22:** Schéma de l'onduleur de tension

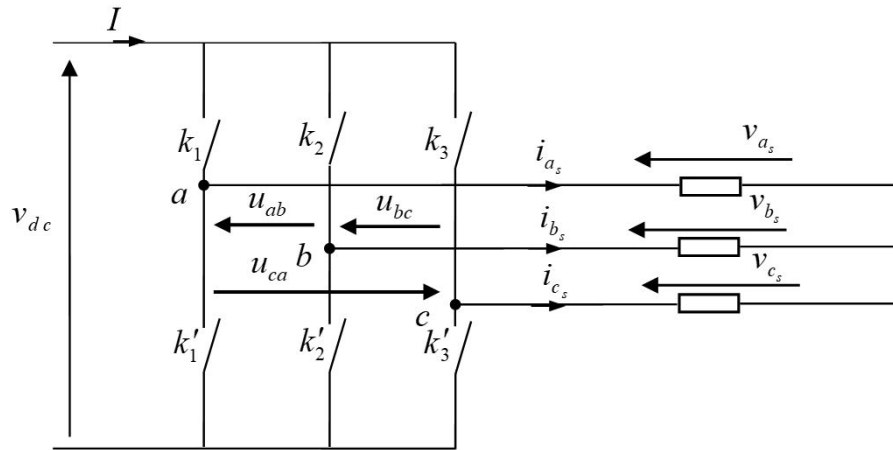
Les onduleurs de tension sont composés de trois bras de commutation à transistor. Chacun des bras est muni de deux cellules avec une diode et un transistor. Tous ces éléments sont des interrupteurs idéaux.

En mode commandable, le bras est un interrupteur à deux positions qui fournit deux niveaux de tension à la sortie. Un bras de l'onduleur est illustré par la figure 2.23.



**FIGURE 2.23:** Représentation d'un bras d'onduleur

Le schéma équivalent de l'onduleur est représenté dans la figure 2.24.



**FIGURE 2.24:** Schéma équivalent de l'onduleur

L'onduleur est modélisé par association à chaque bras une fonction logique  $S$  qui détermine ses états de conduction : [20], [21]

$$S_1 = \begin{cases} 1 & \text{si } k_1 \text{ fermé et } k'_1 \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } k'_1 \text{ fermé et } k_1 \text{ ouvert} \end{cases}$$

$$S_2 = \begin{cases} 1 & \text{si } k_2 \text{ fermé et } k'_2 \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } k'_2 \text{ fermé et } k_2 \text{ ouvert} \end{cases}$$

$$S_3 = \begin{cases} 1 & \text{si } k_3 \text{ fermé et } k'_3 \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } k'_3 \text{ fermé et } k_3 \text{ ouvert} \end{cases}$$

Les tensions de ligne sont donc exprimées par :

$$U_{ab} = V_{as} - V_{bs} = V_{dc}(S_1 - S_2) \quad (2.6)$$

$$U_{bc} = V_{bs} - V_{cs} = V_{dc}(S_2 - S_3) \quad (2.7)$$

$$U_{ca} = V_{cs} - V_{as} = V_{dc}(S_3 - S_1) \quad (2.8)$$

Dans l'hypothèse nous avons les tensions  $V_{as}, V_{bs}, V_{cs}$  forment un système de tension triphasé équilibré , donc de (2.6)-(2.8) on obtient :

$$V_{as} = \frac{V_{dc}}{3}(2S_1 - S_2 - S_3) \quad (2.9)$$

De (2.6)-(2.7) on obtient :

$$V_{bs} = \frac{V_{dc}}{3}(2S_2 - S_1 - S_3) \quad (2.10)$$

De (2.7)-(2.8) on obtient :

$$V_{cs} = \frac{V_{dc}}{3}(2S_3 - S_1 - S_2) \quad (2.11)$$

On a :

$$\begin{cases} V_{as} = \frac{2V_{dc}}{3}S_1 - \frac{V_{dc}}{3}S_2 - \frac{V_{dc}}{3}S_3 \\ V_{bs} = \frac{2V_{dc}}{3}S_2 - \frac{V_{dc}}{3}S_1 - \frac{V_{dc}}{3}S_3 \\ V_{cs} = \frac{2V_{dc}}{3}S_3 - \frac{V_{dc}}{3}S_1 - \frac{V_{dc}}{3}S_2 \end{cases}$$

Donc :

$$\begin{pmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{pmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

Avec :

$V_{dc}$  : la tension d'alimentation continue de l'onduleur.

$U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$  : tensions d'entrée de l'onduleur (valeurs DC).

$V_{as}, V_{bs}, V_{cs}$  : tensions à la sortie de l'onduleur.

La matrice de transfert  $M$  est donnée par :

$$M = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

## 2.6 Moteur asynchrone

Un moteur asynchrone est une machine électrique à courant alternatif et à vitesse ajustable constituée de deux enroulements, le premier (le primaire) étant alimenté par un réseau électrique à pulsation  $\omega$  et le second (le secondaire) étant fermé sur lui-même ou sur des résistances électriques.

Le moteur asynchrone triphasé est très utilisé dans le secteur industriel, sa constitution simple en fait un dispositif très sûr et de très peu d'entretien.

Dans le passé, son utilisation (démarrage et variation de vitesse) était complexe, mais les progrès de l'électronique de puissance ont permis de résoudre tous ces problèmes. [23]

### 2.6.1 Constitution du moteur asynchrone

Le moteur asynchrone est constitué d'une partie fixe, le stator, qui comporte l'enroulement, et d'une partie rotative, le rotor, qui peut être soit en cage d'écureuil ou bien bobiné .

#### – Stator

Le stator des moteurs asynchrones triphasés est identique au stator du moteur synchrone ou de l'alternateur, c'est le stator qui génère le champ tournant. En fait, il est constitué d'un circuit magnétique entièrement laminé en forme de couronne dont la périphérie interne est régulièrement munie d'un nombre d'encoches identiques. Les conducteurs constituant l'enroulement du stator sont placés dans ces encoches. [24]

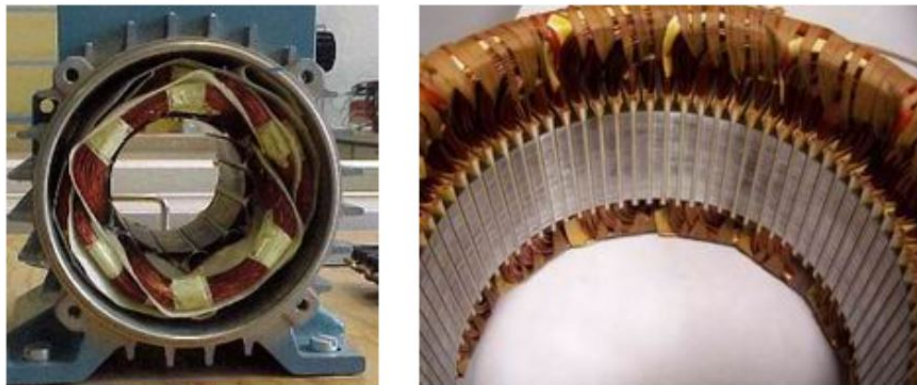


FIGURE 2.25: Exemple de stator d'une Machine asynchrone

#### – Rotor

Le rotor contient l'enroulement où les courants induits doivent circuler. Dans la pratique on trouve deux types de rotor :

- \* Un rotor bobiné : le bobinage, similaire à celui du stator, possède  $p$  paires de pôles par phase ; les trois paires sont raccordées à trois anneaux qui permettent d'insérer un rhéostat dans le circuit du rotor. Ce moteur est également connu sous le nom de moteur à bagues. [23]
- \* Un rotor à cage : le rotor est fabriqué à partir de tiges de cuivre ou d'aluminium reliées aux deux bouts par deux anneaux conducteurs. Ce modèle (à cage d'écureuil) est économique et très résistant et est le plus utilisé. [23]

## 2.6.2 Principe de fonctionnement du moteur asynchrone

L'enroulement du rotor est soumis à un balayage par le champ tournant créé par l'enroulement triphasé du stator. Ils constituent donc le siège d'une f.e.m. induite qui engendre des courants rotoriques induits dans la mesure où ces enroulements sont clos sur eux-mêmes. Ces courants, selon la loi de Lenz sont en opposition avec la cause qui les a générés. Ainsi, plus le rotor est accéléré, plus la vitesse relative par rapport au champ tournant diminue. Si tous les deux tournent à une même vitesse, il se produit une immobilité relative de l'enroulement du rotor par rapport au champ de sorte qu'il n'y aura plus de courants induits et donc plus de couple moteur. Cela signifie qu'il y aura toujours une différence entre la vitesse du champ tournant et celle du rotor. Cet écart par rapport à la vitesse synchrone est appelé glissement. Il est défini par la suite [?] :

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2.14)$$

$n_s$  : vitesse de rotation de synchronisme du champs tournant ( $tr.s^{-1}$ ).

$n$  : vitesse de rotation du rotor ( $tr.s^{-1}$ ).

### Symboles

Ci-dessous, les différents symboles utilisés pour représenter le moteur asynchrone. [21]

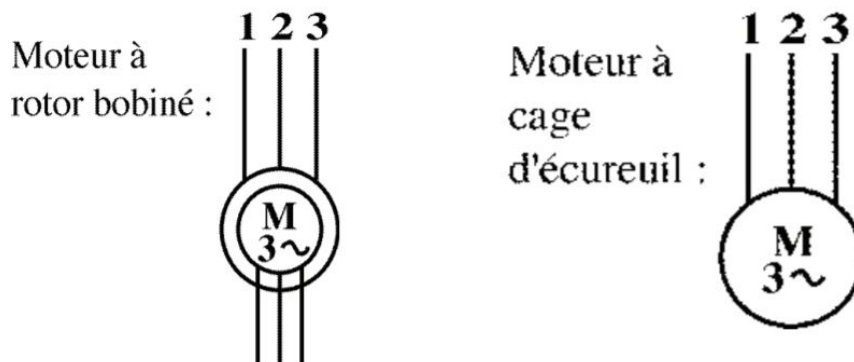


FIGURE 2.26: Symboles du moteur asynchrone



### 2.6.3 Modélisation du moteur asynchrone

La modélisation du moteur asynchrone repose sur un ensemble d'hypothèses : [20], [21], [22], [25]

- La symétrie parfaite de la machine.
- Une absence de saturation et de pertes dans le circuit magnétique (Hystérésis et courant de FOUCAULT sont négligeables).
- La distribution sinusoïdale, tout au long de l'entrefer supposé constant.
- Les résistances d'enroulement ne changent pas avec la température de fonctionnement et l'effet de peau est également négligé.
- La cage est considérée comme un enroulement triphasé court-circuité du même nombre .
- L'énergie est fournie par des tensions triphasées symétriques .
- Le stator comprendra trois bobines similaires (A, B et C) décalées régulièrement de  $2\pi/3$  radians électriques, la phase A étant la référence angulaire. Le rotor est considéré comme étant constitué de trois bobines identiques (a, b et c) en court-circuit sur elles-mêmes également déphasées régulièrement par  $2\pi/3$  radians électriques.

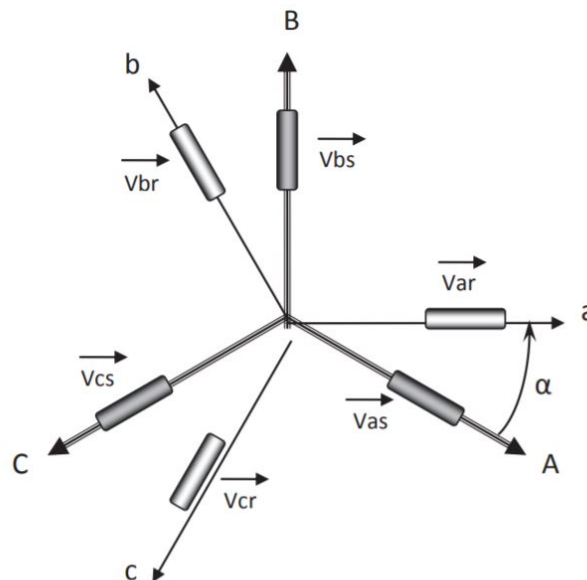


FIGURE 2.27: Illustration schématique d'un moteur asynchrone triphasé.

### Equations générales :

Selon les hypothèses simplificatrices et dans le cas d'une machine équilibrée, les équations du moteur se présentent comme ci-dessous :

#### (a) Equations électriques :

Les équations de tension électrique des trois phases du stator et des trois phases du rotor sont :

$$\begin{cases} V_{as} = R_s i_{as} + \frac{d\phi_{as}}{dt} \\ V_{bs} = R_s i_{bs} + \frac{d\phi_{bs}}{dt} \\ V_{cs} = R_s i_{cs} + \frac{d\phi_{cs}}{dt} \end{cases} \quad (2.15)$$

$$\begin{cases} V_{ar} = R_r i_{ar} + \frac{d\phi_{ar}}{dt} \\ V_{br} = R_r i_{br} + \frac{d\phi_{br}}{dt} \\ V_{cr} = R_r i_{cr} + \frac{d\phi_{cr}}{dt} \end{cases} \quad (2.16)$$

Avec :

$V_{as}$  ,  $V_{bs}$  ,  $V_{cs}$  : les tensions des trois phases statoriques.

$i_{as}$  ,  $i_{bs}$  ,  $i_{cs}$  : les courants qui passent par les trois phases du stator.

$V_{ar}$  ,  $V_{br}$  ,  $V_{cr}$  : les tensions des trois phases rotoriques.

$i_{ar}$  ,  $i_{br}$  ,  $i_{cr}$  : les courants qui passent par les trois phases du rotor.

$\phi_{as}$  ,  $\phi_{bs}$  ,  $\phi_{cs}$  : le total des flux à parcourir dans les enroulements du stator.

$\phi_{ar}$  ,  $\phi_{br}$  ,  $\phi_{cr}$  : le total des flux à parcourir dans les enroulements du rotor.

$R_s$  : résistance de phase du stator.

$R_r$  : résistance de phase du rotor.

Les équations (2.15) et (2.16) sont évidemment sous forme de matrice :

$$\begin{pmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \\ V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \\ \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{pmatrix} \quad (2.17)$$

Où :

Pour le stator :

$$[V_{abcs}] = [R_s][i_{abcs}] + \frac{d}{dt}[\phi_{abcs}] \quad (2.18)$$

Pour le rotor :

$$[V_{abcr}] = [R_r][i_{abcr}] + \frac{d}{dt}[\phi_{abcr}] \quad (2.19)$$

(b) **Equations magnétiques :**

On va exprimer les grandeurs magnétiques au niveau du stator et du rotor, en utilisant toujours le repère a, b, c :

$$\begin{pmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \\ \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_s & L_{ms} & L_{ms} & L_{m1} & L_{m3} & L_{m2} \\ L_{ms} & l_s & L_{ms} & L_{m2} & L_{m1} & L_{m3} \\ L_{ms} & L_{ms} & l_s & L_{m3} & L_{m2} & L_{m1} \\ L_{m1} & L_{m2} & L_{m3} & l_r & L_{mr} & L_{mr} \\ L_{m3} & L_{m1} & L_{m2} & L_{mr} & l_r & L_{mr} \\ L_{m2} & L_{m3} & L_{m1} & L_{mr} & L_{mr} & l_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

Tels que :

$l_s$  : L'inductance propre d'une phase du stator.

$l_r$  : L'inductance propre d'une phase du rotor.

$L_{ms}$  : L'inductance mutuelle entre phases statoriques.

$L_{mr}$  : L'inductance mutuelle entre phases rotoriques.

Et

$$L_{m1} = L_{msr} \cos(\alpha)$$

$$L_{m2} = L_{msr} \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3})$$

$$L_{m3} = L_{msr} \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3})$$

$L_{msr}$  : est la valeur maximale de l'inductance mutuelle comprise entre une phase de stator et une phase de rotor.

La matrice d'inductance est constituée de quatre sous-matrices :

$$\begin{pmatrix} \phi_{abcs} \\ \phi_{abcr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [L_s] & [L_{msr}] \\ [L_{mrs}] & [L_r] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{abcs} \\ i_{abcr} \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

Avec :

La matrice d'inductance du stator :

$$[L_s] = \begin{pmatrix} l_s & L_{ms} & L_{ms} \\ L_{ms} & l_s & L_{ms} \\ L_{ms} & L_{ms} & l_s \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

La matrice d'inductance du rotor :

$$[L_r] = \begin{pmatrix} l_r & L_{mr} & L_{mr} \\ L_{mr} & l_r & L_{mr} \\ L_{mr} & L_{mr} & l_r \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

La matrice des inductances mutuelles :

$$\begin{aligned}
 [L_{mrs}] &= [L_{mrs}]^T \\
 &= L_m \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha) & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \quad (2.24)
 \end{aligned}$$

On obtient :

$$\begin{cases} [V_{abcs}] = [R_s][i_{abcs}] + \frac{d}{dt}([L_s][i_{abcs}] + [L_{mrs}][i_{abcr}]) \\ [V_{abcr}] = [R_r][i_{abcr}] + \frac{d}{dt}([L_r][i_{abcr}] + [L_{mrs}][i_{abcs}]) \end{cases} \quad (2.25)$$

### (c) Equations mécaniques :

L'équation mécanique est exprimée par l'expression :

$$C_{em} - C_r = j \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \quad (2.26)$$

La vitesse électrique du rotor est exprimée par l'expression suivante [2.MAS] :

$$\omega_r = p\Omega_r \quad (2.27)$$

## 2.6.4 Modélisation dans le repère de Park

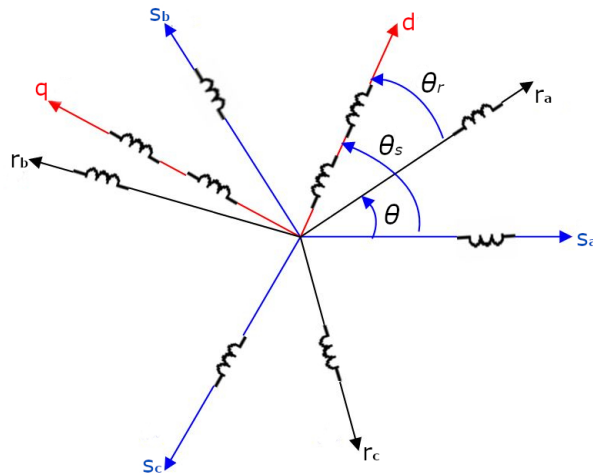
En raison de la complexité et de la non-linéarité des équations ci-dessus, il sera difficile de simuler le système, il est donc essentiel de transformer le système triphasé équilibré (a,b,c) en un système biphasé (d,q) en utilisant la transformation de Park, à condition que la force magnétomotrice et la puissance instantanée soient maintenues. [20]

La matrice de transformation de Park :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (2.28)$$

La matrice inverse de Park :

$$P^{-1}(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix} \quad (2.29)$$



**FIGURE 2.28:** Position angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique.

- Pour la transformation, l'angle  $\theta$  correspond à la position du repère choisi.
- Pour le stator  $\theta = \theta_s$  (angle formé par l'axe (od) et la phase (a) du stator).
- Pour le rotor  $\theta = \theta_r$  (angle formé par l'axe (od) et la phase (a) du rotor).

(a) **Equations électriques :**

En utilisant la transformation de Park sur les équations électriques, on obtient :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \left(\frac{d\theta_s}{dt}\right)\phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} - \left(\frac{d\theta_s}{dt}\right)\phi_{ds} \\ V_{dr} = R_s i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \left(\frac{d\theta_r}{dt}\right)\phi_{qr} = 0 \\ V_{qr} = R_s i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - \left(\frac{d\theta_r}{dt}\right)\phi_{dr} = 0 \end{cases} \quad (2.30)$$

$V_{dr}$  et  $V_{qr}$  sont nulles car le rotor est court-circuité.

(b) **Equations magnétiques :**

En utilisant la transformation de Park sur les équations magnétiques et en réduisant le nombre de paramètres, on obtient :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \phi_{dr} = L_s i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_s i_{qr} + L_m i_{qs} \end{cases} \quad (2.31)$$

Avec :

$L_s = l_s - L_{ms}$  : Inductance cyclique du stator.

$L_r = l_r - L_{mr}$  : Inductance cyclique du rotor.

$L_m$  : Inductance mutuelle cyclique (rotor stator).

(c) **Équations mécaniques :**

On a L'énergie  $dW_\delta$  qui passe par l'entrefer est donnée par l'expression :

$$dW_\delta = \omega_s(\phi_{ds}i_{qs} - \phi_{qs}i_{ds})dt \quad (2.32)$$

$$= R_r(i_{dr}^2 + i_{qr}^2)dt + (d\phi_{dr}i_{dr} + d\phi_{qr}i_{qr}) + \omega L_m(i_{qs}i_{dr} - i_{ds}i_{qr}) \quad (2.33)$$

L'énergie  $dW_\delta$  est composée de trois termes :

- L'énergie dissipée par effet joule au rotor.
- La variation de l'énergie magnétique du rotor.
- L'énergie  $dW_{em}$  produisant le couple électromagnétique.

Le couple électromagnétique qui en résulte est obtenu par la division de  $dW_{em}$  par la vitesse mécanique :

$$\Omega = \frac{\omega}{p}$$

$$C_{em} = pL_m(i_{qs}i_{dr} - i_{ds}i_{qr}) \quad (2.34)$$

Dans le cas du modèle d'état comportant les courants de stator et les flux du rotor, le couple est exprimé par :

$$C_{em} = p \frac{L_m}{L_r}(\phi_{dr}i_{qs} - \phi_{qr}i_{ds}) \quad (2.35)$$

**Choix de référentiel :**

Le choix est fait en fonction de l'objectif de l'application et pour notre cas, le choix s'est porté sur le repère fixe par rapport au stator, c'est le cadre de référence le plus approprié pour travailler avec des grandeurs instantanées. Il dispose de tensions et de courants réels et peut servir à étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines à courant alternatif, il est donné par les conditions suivantes :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_{sbs} = 0$$

et

$$\frac{d\theta_r}{dt} = -\omega_r$$

$\omega_{sbs}$  : la vitesse de rotation du système biphasé relativement au stator fixe.

### 2.6.5 Représentation d'état du système

**Modèle représenté par le repère (d,q) lié au stator :**

Le passage de Park ( $d, q$ ) à Concordia ( $\alpha, \beta$ ) par un angle de rotation  $\theta$  :

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

La transformation inverse est également définie par :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Le système d'équations modélisant le moteur asynchrone à cage dans le repère fixe est :

$$\begin{cases} V_{\alpha s} = R_s i_{\alpha s} + \frac{d\phi_{\alpha s}}{dt} \\ V_{\beta s} = R_s i_{\beta s} + \frac{d\phi_{\beta s}}{dt} \end{cases} \quad (2.38)$$

$$\begin{cases} 0 = R_r i_{\alpha r} + \frac{d\phi_{\alpha r}}{dt} + \omega \phi_{\beta r} \\ 0 = R_r i_{\beta r} + \frac{d\phi_{\beta r}}{dt} + \omega \phi_{\alpha r} \end{cases} \quad (2.39)$$

Comme le repère ( $\alpha, \beta$ ) est lié au stator et que leurs tensions sont réelles et indépendantes de la position ( $\theta$ ) du rotor, il en résulte que :

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha s} \\ V_{\beta s} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

Les courants du rotor peuvent être définis en fonction du flux statorique et du courant du stator, comme suit :

$$\begin{cases} i_{\alpha r} = \frac{(\phi_{\alpha s} - l_s i_{\alpha s})}{L_{msr}} \\ i_{\beta r} = \frac{(\phi_{\beta s} - l_s i_{\beta s})}{L_{msr}} \end{cases} \quad (2.41)$$

les relations entre le rotor, le stator et les fuites sont alors définies par :

$$\begin{cases} \phi_{\alpha r} = \frac{l_r}{L_{msr}} (\phi_{\alpha s} - \sigma l_s i_{\alpha s}) \\ \phi_{\beta r} = \frac{l_r}{L_{msr}} (\phi_{\beta s} - \sigma l_s i_{\beta s}) \end{cases} \quad (2.42)$$

En dérivant l'équation (2.42) par rapport au temps, on obtient :

$$\begin{cases} \frac{d\phi_{\alpha r}}{dt} = \frac{l_r}{L_{msr}} \left( \frac{d\phi_{\alpha s}}{dt} - \sigma l_s \frac{di_{\alpha s}}{dt} \right) \\ \frac{d\phi_{\beta r}}{dt} = \frac{l_r}{L_{msr}} \left( \frac{d\phi_{\beta s}}{dt} - \sigma l_s \frac{di_{\beta s}}{dt} \right) \end{cases} \quad (2.43)$$

En remplaçant dans les équations (2.37) et (2.38) par les expressions des équations (2.40) et (2.42), on obtient l'équation d'état de la machine asynchrone dans le repère du stator : [21] [22]

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{i}_{\alpha s} \\ \dot{i}_{\beta s} \\ \dot{\phi}_{\alpha s} \\ \dot{\phi}_{\beta s} \end{bmatrix}}_{\dot{X}} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{1}{\sigma} \left( \frac{1}{T_s} + \frac{L_{msr}^2}{l_s l_r T_r} \right) & 0 & \frac{L_{msr}}{l_s l_r T_r} & \frac{L_{msr}}{\sigma l_s l_r T_r} \omega \\ 0 & -\frac{1}{\sigma} \left( \frac{1}{T_s} + \frac{L_{msr}^2}{l_s l_r T_r} \right) & \frac{L_{msr}}{\sigma l_s l_r T_r} \omega & \frac{L_{msr}}{l_s l_r T_r} \\ \frac{L_{msr}}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & -\omega \\ 0 & \frac{L_{msr}}{T_r} & \omega & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \\ \phi_{\alpha s} \\ \phi_{\beta s} \end{bmatrix}}_X + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma l_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma l_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_B \underbrace{\begin{bmatrix} V_{\alpha s} \\ V_{\beta s} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_U \quad (2.44)$$

Avec :

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + BU \\ \sigma &= 1 - \frac{L_{msr}^2}{l_s l_r} \\ T_r &= \frac{l_r}{R_r}, T_s = \frac{l_s}{R_s} \end{aligned}$$

$T_r, T_s$  : Constantes de temps.

$\sigma$  : Coefficient de dispersion.

## 2.7 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté d'une manière générale le circuit d'alimentation du tramway ainsi que la modélisation des différents convertisseurs statiques et du moteur asynchrone.



# Simulation du circuit d'alimentation du tramway

## 3.1 Introduction

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.

Dans ce chapitre, on présentera les schémas électroniques des convertisseurs étudiés, et les simuler par les logiciels SIMULINK et Proteus Design Suite, ensuite on représentera les différentes courbes obtenues.

## 3.2 Les logiciels

### 1- MATLAB-Simulink :

MATLAB (MATrix LABoratory) a été créée à l'origine pour fournir un accès facile au logiciel Matrix développé par les projets LINPACK (paquet système linéaire) et EISPACK (paquet système Eigen). [26]

Simulink est un logiciel de modélisation d'un système multi-physique édité par l'entreprise américaine The MathWorks. Il est disponible avec l'installation MATLAB et contrairement à MATLAB, il modélise le système à l'aide de blocs de construction et de petits éléments, puis simule pour analyser le modèle. Il peut effectuer la modélisation mathématique ainsi que 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. [26]

## 2- Proteus Design Suite :

Proteus est une série de logiciels pour l'électronique. Créé par la société Labcenter Electronics, les logiciels compris dans Proteus permettent la CAO dans le secteur de l'électronique. Deux principaux logiciels composent cette suite logicielle : ISIS, ARES, PROSPICE et VSM. [28]

### \* Proteus dans l'industrie :

La suite de conception Proteus est largement utilisée dans divers secteurs industriels comme solution rentable pour la conception professionnelle de circuits imprimés et comme outil de prototypage rapide pour la recherche et le développement.

### \* Proteus dans l'éducation :

On trouve Proteus Design Suite dans les écoles secondaires, les collèges et les universités du monde entier, où des dizaines de milliers d'étudiants apprennent chaque année l'électronique, la conception intégrée et la mise en page de circuits imprimés. [29]

## ISIS :

Le logiciel ISIS de Proteus est essentiellement connu pour l'édition de schémas électriques. En outre, le logiciel permettant également de simuler ces schémas, il est possible de détecter certaines erreurs au stade de la conception. Indirectement, les circuits électriques conçus avec ce logiciel sont utilisables dans la documentation car le logiciel permet de contrôler la plupart de l'aspect graphique des circuits. [28]

## 3.3 simulation des composants de la sous-station

La sous-station se compose d'un transformateur et d'un groupe redresseurs (mise en cascade d'un redresseur non commandé-convertisseur DC-DC)

### 3.3.1 Simulation du transformateur

Dans notre étude on va simuler un transformateur Dyn qui a une tension d'entrée  $30\text{ kV}$  et la réduire en  $585\text{ V}$ .

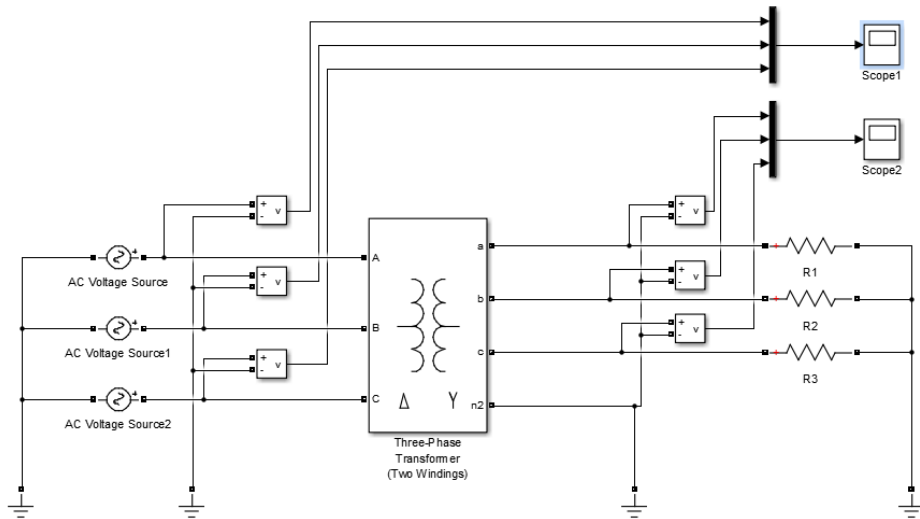


FIGURE 3.1: Modèle d'un transformateur Dy.

Après avoir lancer la simulation on obtient les resultats suivants :

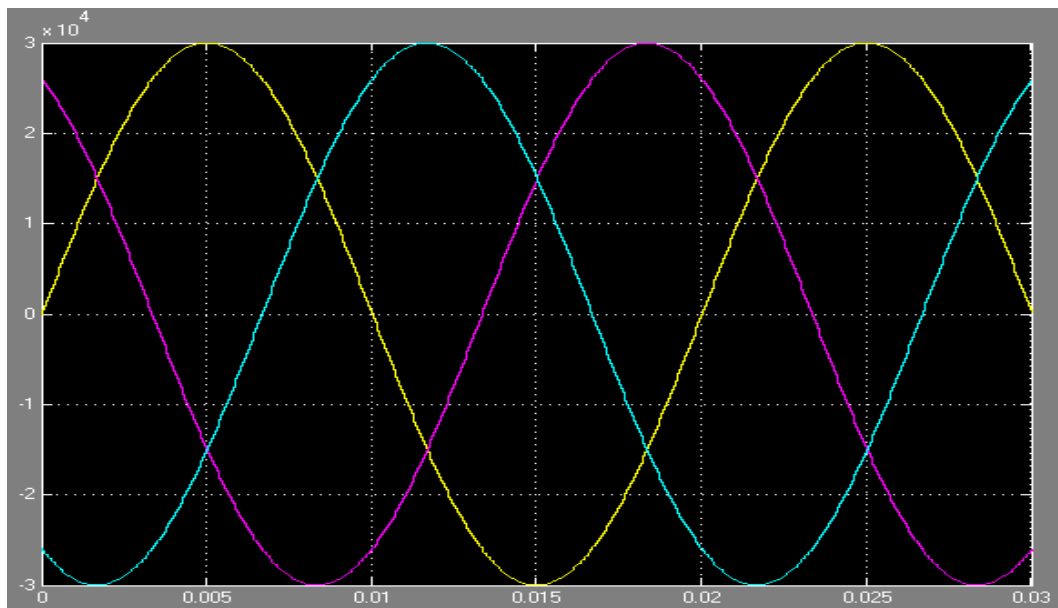
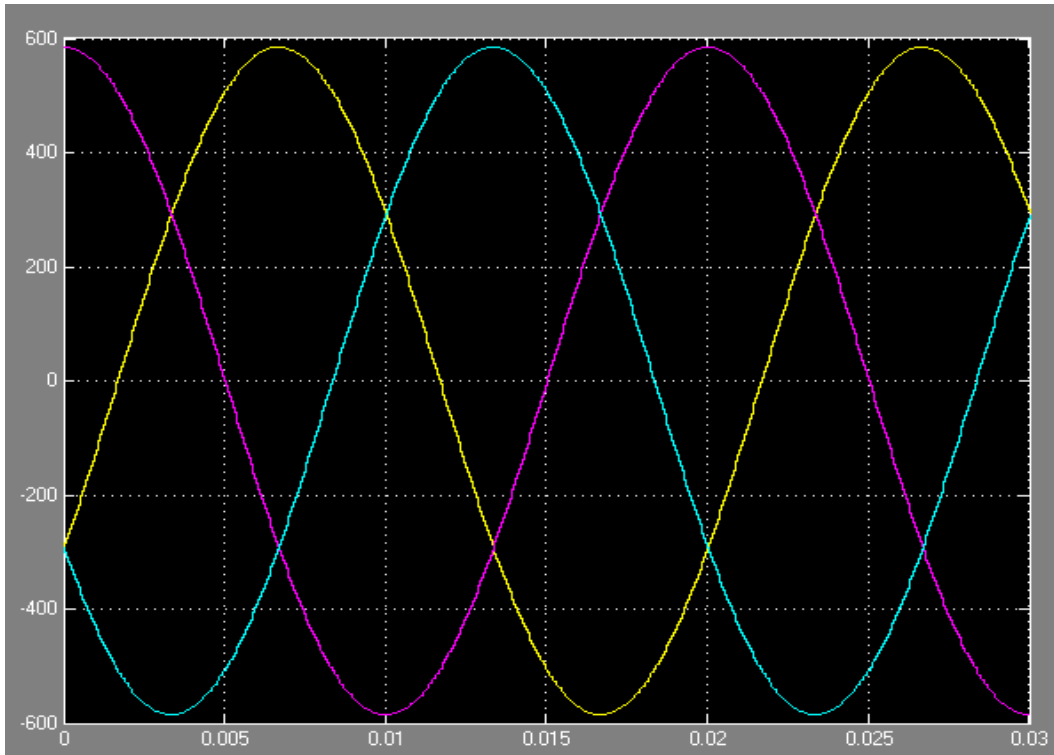


FIGURE 3.2: Tension primaire du transformateur.



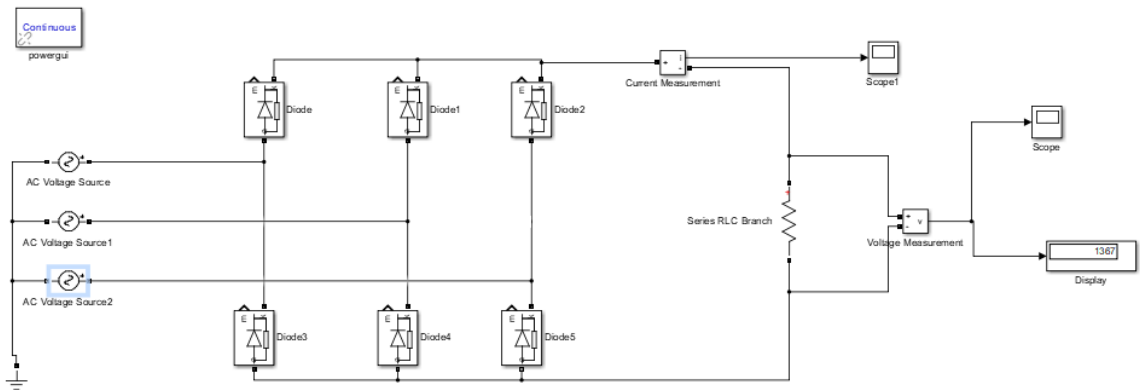
**FIGURE 3.3:** Tensions du secondaire de transformateur.

La (figure 3.3) illustre les tensions de sortie du transformateur. Donc on remarque que la tension a été réduite à 585V à peu près(Comme on voit dans la figure est presque 600V).

### 3.3.2 Simulation du redresseur PD3 non commandé

La fonction du redresseur est de transformer la tension alternative triphasée du réseau en tension continue. En pratique, il est difficile d'obtenir une tension de sortie parfaitement continue, ce qui donne en général une tension continue comportant une ondulation résiduelle. Suivant le type de technologie utilisé. Les composants utilisés sont des diodes. Parmi les trois configurations existantes (parallèle, parallèle double et série), seul le montage parallèle double sera développé dans notre chapitre.

Le schéma bloc du redresseur PD3 :



**FIGURE 3.4:** Montage d'un redresseur triphasé parallèle double PD3.

La figure ci-dessus représente un pont redresseur PD3, avec une source triphasée expliquée à l'aide de ces équations :

$$V_1 = V\sqrt{2} \sin(\omega t) \quad (3.1)$$

$$V_2 = V\sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.2)$$

$$V_3 = V\sqrt{2} \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.3)$$

Avec :  $\omega = 2\pi f$

Notre redresseur est un redresseur non commandé, donc on ne peut pas régler la tension de sortie moyenne pour une tension d'entrée donnée.

La tension de sortie est constituée de portions de sinusôides de valeur efficace  $V\sqrt{3}$ . La tension de sortie est périodique de période  $\frac{T}{6}$ . Par exemple si on calcule la valeur moyenne lorsque les diodes (diode) et (diode5) conduisent, la tension de sortie  $V_s$  vaut la tension U13 entre les phases 1 et 3.

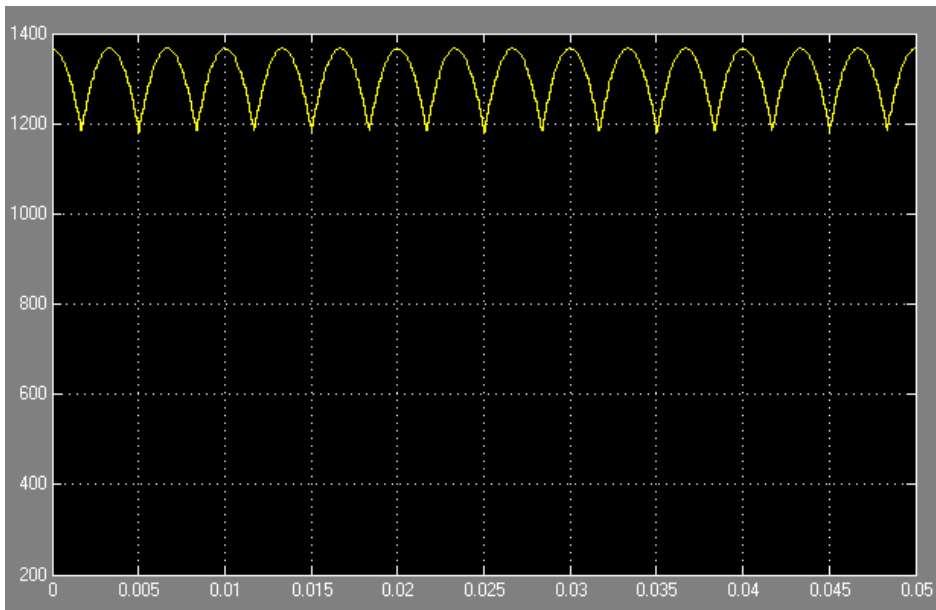
$$V_{smoy} = \frac{6}{T} \int_{-\frac{T}{12}}^{\frac{T}{12}} U_{13}(t) dt = \frac{6}{T} \int_{-\frac{T}{12}}^{\frac{T}{12}} V\sqrt{3}\sqrt{2} \cos(\omega t) dt \quad (3.4)$$

$$= \frac{3V\omega\sqrt{3}\sqrt{2}}{\pi} \int_{-\frac{T}{12}}^{\frac{T}{12}} \cos(\omega t) dt = \frac{3\sqrt{3}\sqrt{2}}{\pi} V 2 \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) \quad (3.5)$$

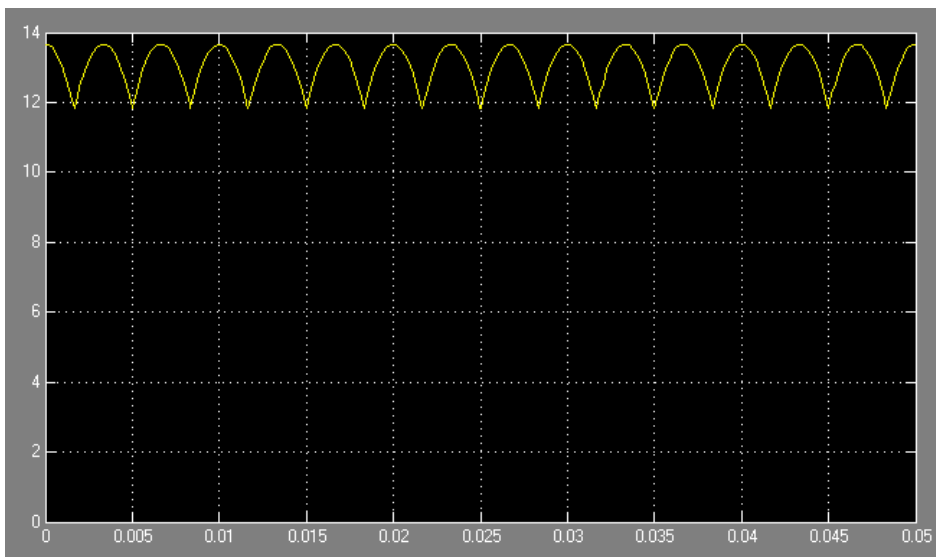
Finalement on obtient :

$$V_{smoy} = \frac{3\sqrt{3}\sqrt{2}}{\pi} V = \frac{3\sqrt{3}\sqrt{2}}{\pi} 585 = 1368V \quad (3.6)$$

Donc le résultat de ce redresseur est :



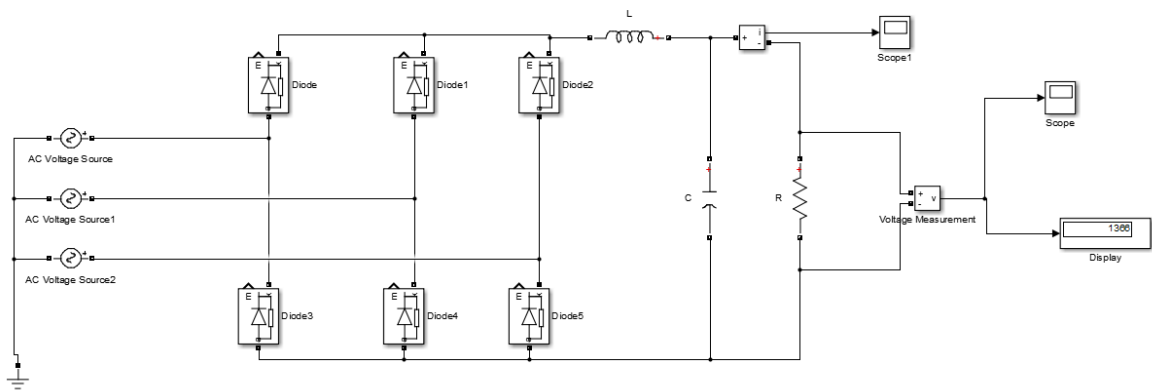
**FIGURE 3.5:** Tension de sortie redressée sans filtrage.



**FIGURE 3.6:** Courant de sortie redressée sans filtrage.

Comme on voit dans les figures ci-dessus le signal de sortie n'est pas purement continu, malgré qu'il a été redressé mais il contient toujours des ondulations.

A fin d'éliminer ces ondulations du signal obtenu, on a ajouté une capacité pour effectuer un filtrage capacitif pour la tension, et on a ajouté une bobine pour lisser le courant, voir (la Figure 3.7).

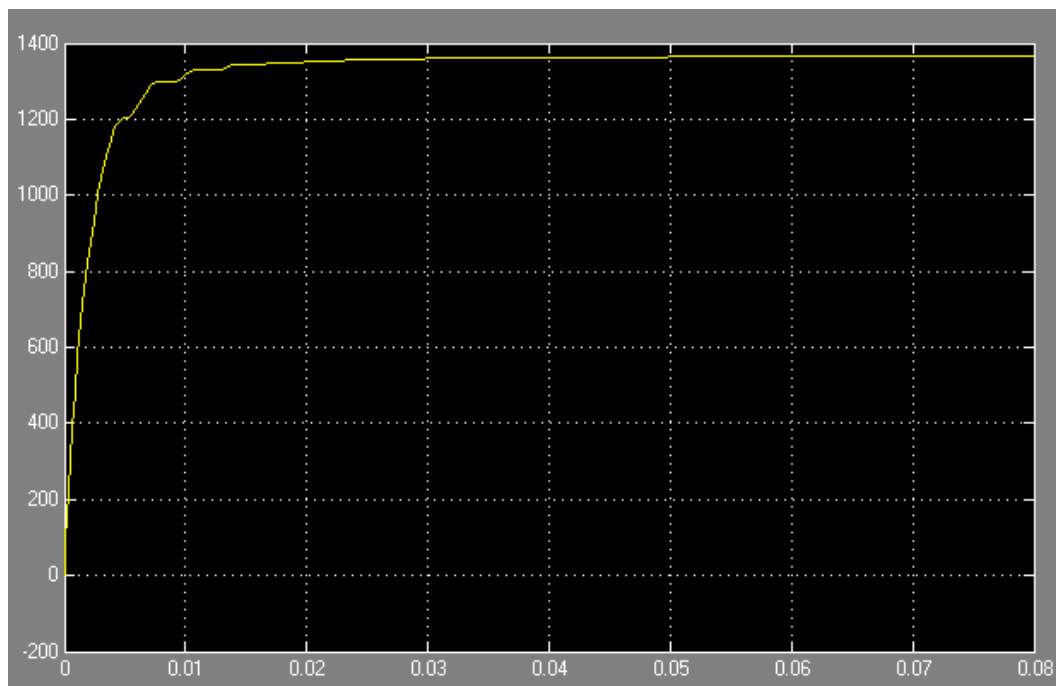


**FIGURE 3.7:** Redresseur triphasé non commandé avec filtrage capacitif.

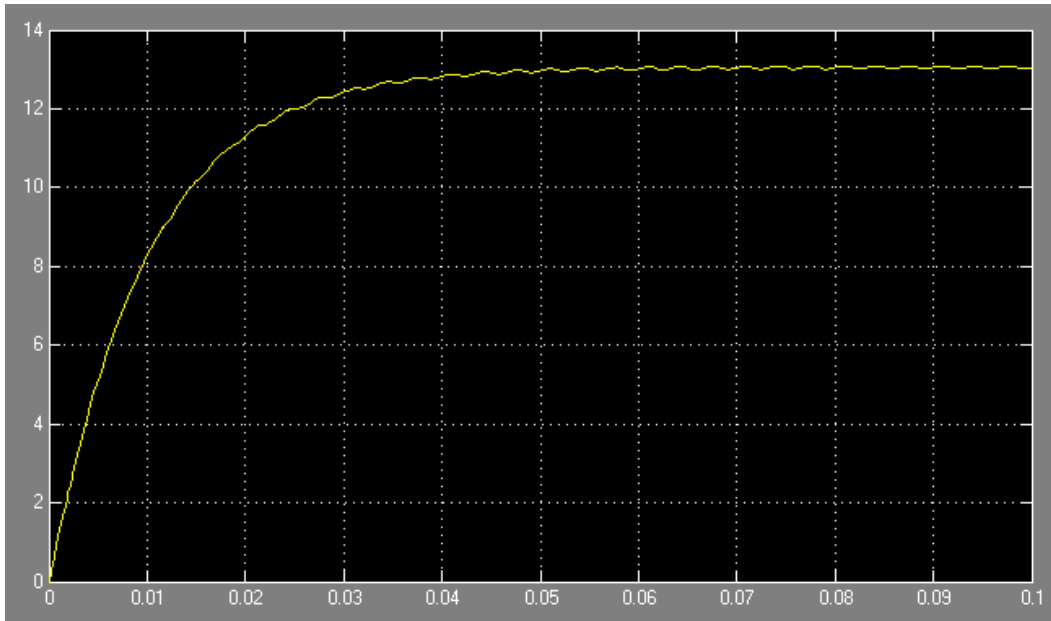
Pour avoir une tension filtrée et bien continue on a ajouté une capacité de  $1 \times 10^{-6} \text{C}$ .

Pour avoir un courant lissé bien continu on a ajouté une bobine de 1 H.

On obtient la tension et le courant suivants :



**FIGURE 3.8:** Tension de sortie redressée avec filtrage.



**FIGURE 3.9:** Courant de sortie redressé avec filtrage.

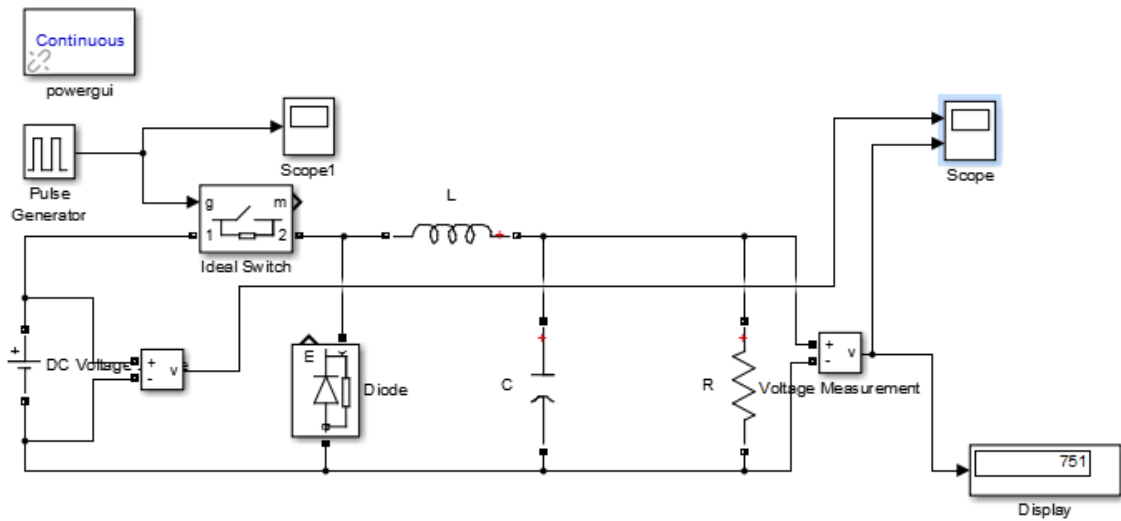
Donc on remarque bien que la tension redressé avec filtrage est bien lisse par rapport au tension redressé sans filtrage capacitif. Et meme en ajoutant la bobine le courant est devenu plus lisse.

On voit que la tension obtenue du redresseur est 1368 V (affichée dans le display), afin de l'abaisser en 750 V on ajoute un hacheur buck (série).

### 3.3.3 Simulation de l'hacheur buck

Un convertisseur buck, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur. Un convertisseur Buck bien conçu possède un fort rendement et offre la possibilité de réguler la tension de sortie. [27]



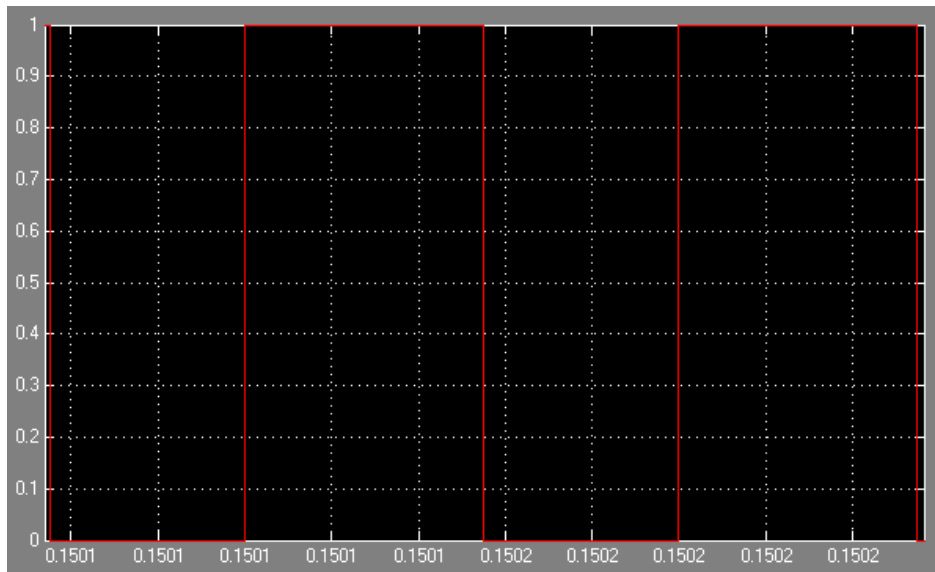


**FIGURE 3.10:** Montage d'un hacheur série.

On a prit  $C = 1 \times 10^{-6}C$ , et  $L = 0.1H$  pour avoir un regime transitoire cours et une tension de sortie continue sans ondulation.

La durée de conduction  $T$  est compris entre 0 et 1 donc, le rapport cyclique est compris entre 0 et 1. On peut exprimer la durée de conduction et de blocage de l'interrupteur en fonction de  $\alpha$  et  $T$  :

- Durée de conduction :  $T_{cond} = \alpha T = 54.8\mu s$ .
- Durée de blocage :  $T_{off} = (1 - \alpha)T = 45.2\mu s$ .



**FIGURE 3.11:** Signal de commande de l'interrupteur.

Donc on peut calculer cotre rapport cyclique comme suit :

$$\alpha = \frac{T_{cond}}{T} = 0.548$$

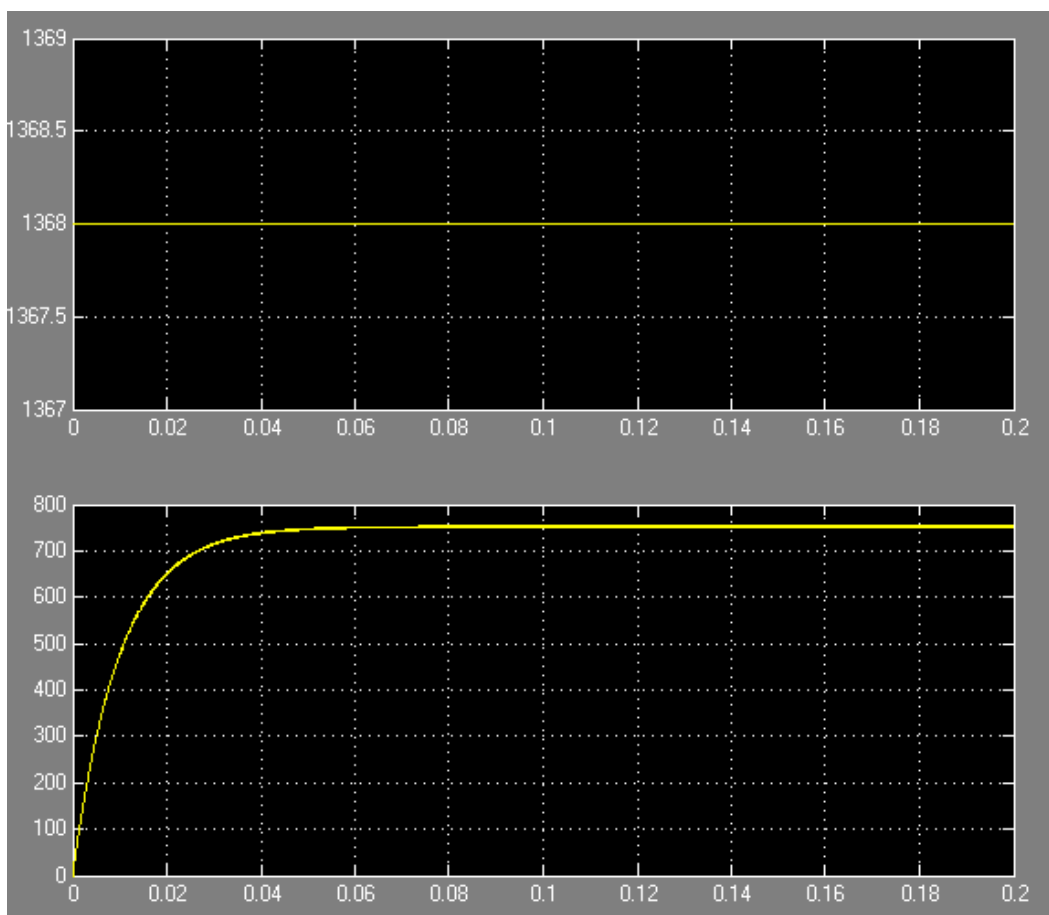
On a vu dans le chapitre précédent que la relation entre la tension d'entrée et la tension de sortie d'un hacheur série est :

$$V_s = \alpha U$$

Donc :

$$V_s = 0.548 \times 1368 = 750V$$

La figure ci-dessous illustre la tension d'entrée et la tension de sortie obtenue par hacheur buck.



**FIGURE 3.12:** Tension d'entrée de sortie de l'hacheur série.

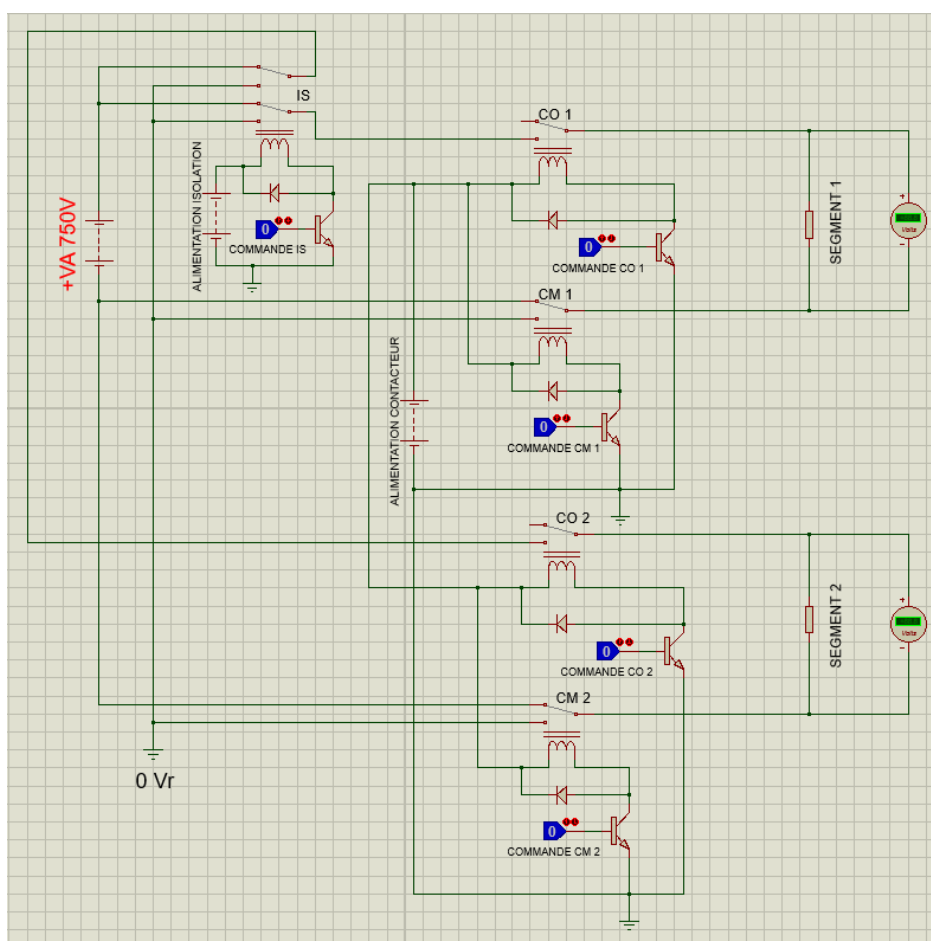
Donc on remarque que la tension a été abaissée de 1368 V vers 750 V. La tension de sortie est continue avec un régime transitoire de 0.04s.

### 3.4 Simulation du boîtier d'alimentation APS

Les boîtiers d'alimentation APS qui sont installés sur la voie du tramway fournissent de l'énergie aux segments APS, et assurent que les segments sont alimentés uniquement quand ils sont entièrement recouverts par le tram grâce à des contacteurs et une unité électronique qui les commande selon la présence ou l'absence du tram.

Avec le logiciel Proteus design suite on a pu reproduire le schéma d'un boîtier qui alimente deux segments (figure 3.13).

Les commandes des contacteurs et l'interrupteur d'isolation sont simulés par des états logiques.

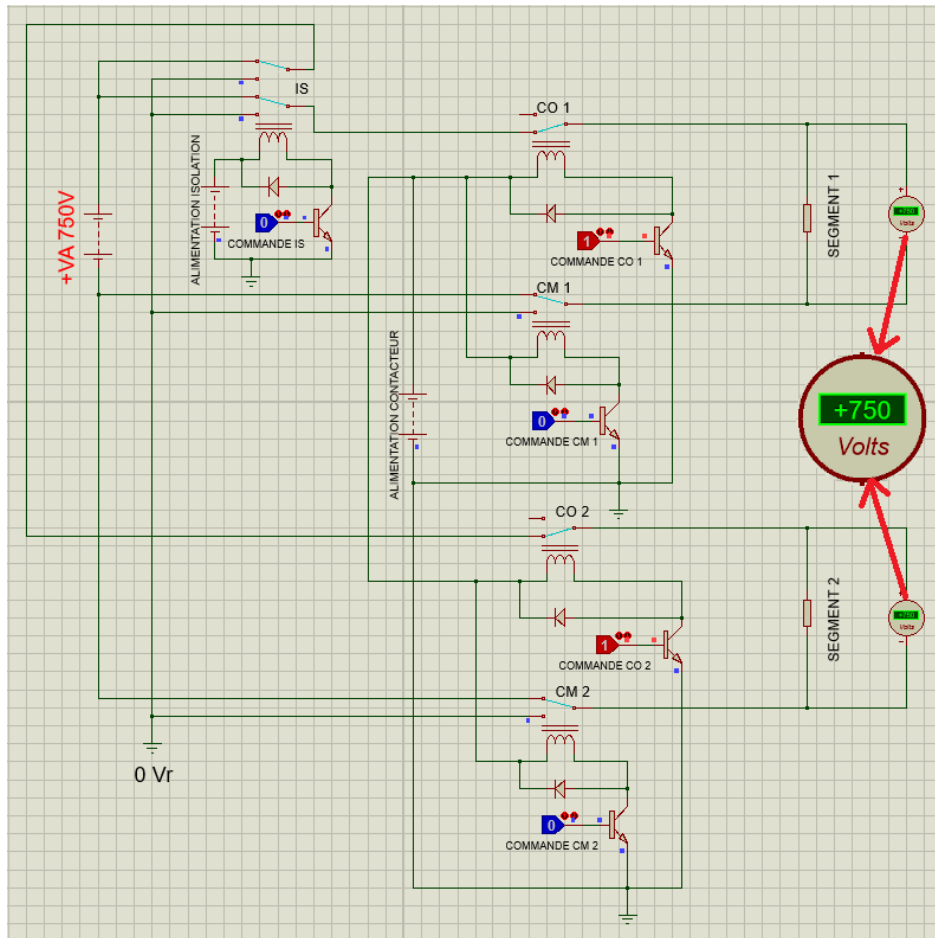


**FIGURE 3.13:** Schéma du boîtier d'alimentation APS sur Proteus

L'émission du signal de présence est faite par l'antenne située dans le châssis du tramway, ensuite, les modules de réception dans le boîtier d'alimentation le reçoivent et l'unité électronique donne la commande au contacteur de puissance (Co) pour connecter le segment APS au +Va.

**La figure(3.14)** montre l'alimentation des segments par le +Va 750V après

avoir l'état logique 1 dans les contacteurs Co 1 et Co 2 qui signifie la présence du tramway sur ces segments.



**FIGURE 3.14:** Commande des contacteurs Co

Quand le tramway quitte un segment, l'unité électronique génère un signal de commande pour ouvrir le contacteur Co et fermer le contacteur Cm pour connecter le segment au  $0V_r$  pour éviter tout risque d'électrocution pour les autres utilisateurs (piétons, cycles,...) en raison de l'absence d'énergie.

**les figures (3.15) et (3.16)** illustre cet action de commande des contacteurs Co 1 et 2 et Cm 1 et 2

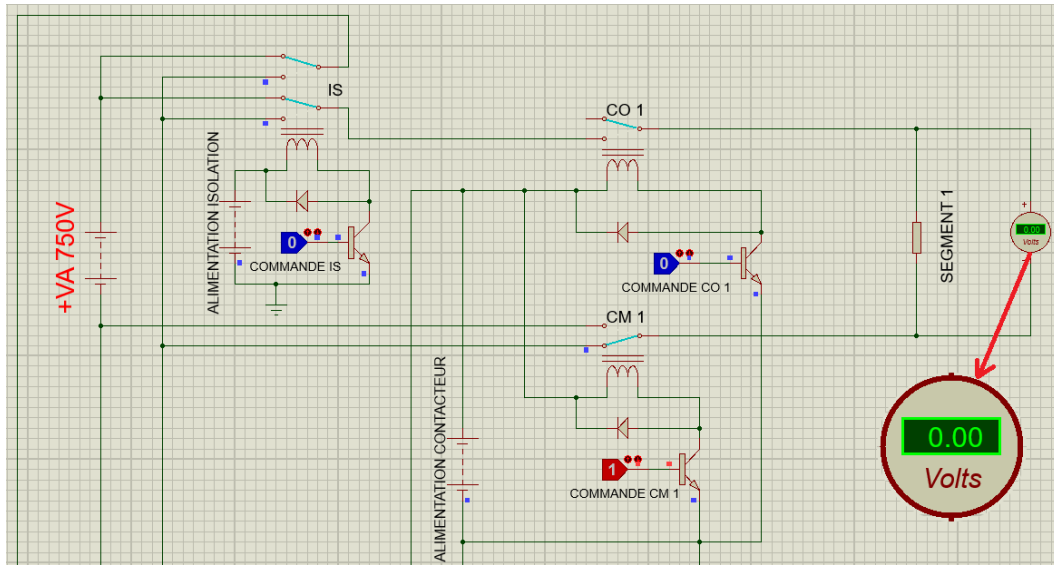


FIGURE 3.15: Commande de contacteurs Co 1 et Cm 1

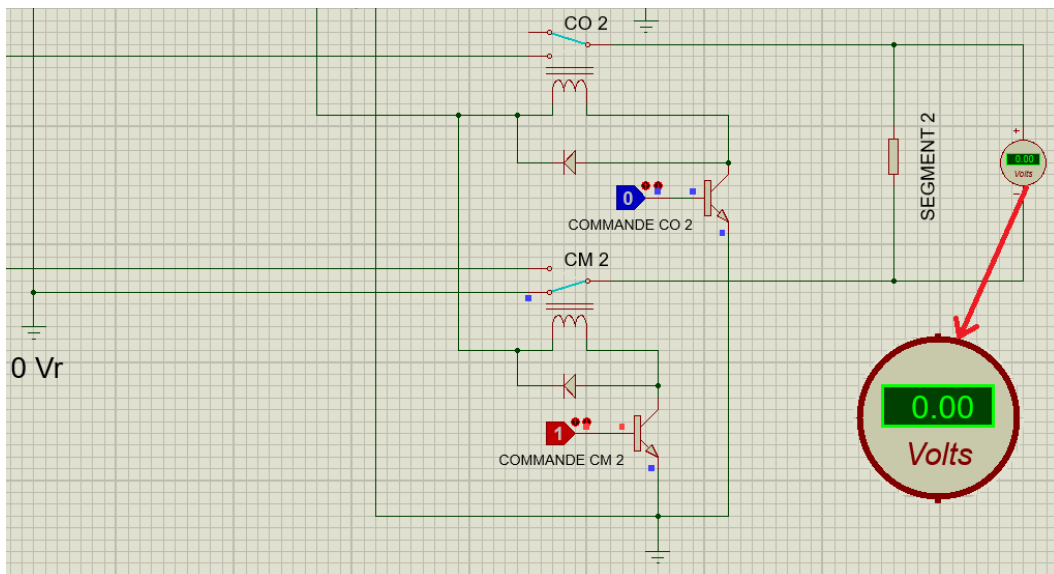


FIGURE 3.16: Commande de contacteurs Co 2 et Cm 2

En cas de panne ou un défaut et aussi pour la maintenance du boîtier , un interrupteur d'isolement IS est utilisé pour mettre le boîtier d'alimentation à l'état "hors service".

La figure 3.17 nous montre comment l'interrupteur d'isolement isole l'alimentation des segments vers le  $0V_r$  malgré la présence du tramway sur ces segments (Co 1 et Co 2 actifs).

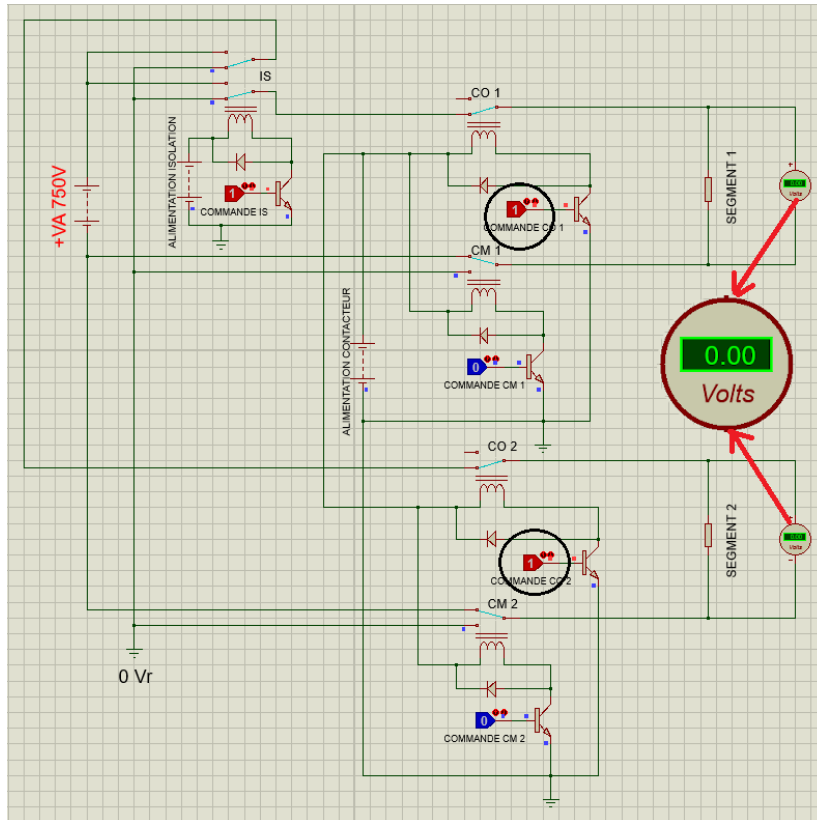


FIGURE 3.17: La commande de l'interrupteur d'isolement IS

### 3.5 Simulation des composants du tramway

Le tramway se compose principalement d'un hacheur rhéostatique, un onduleur et un moteur asynchrone.

#### 3.5.1 Simulation de l'hacheur rhéostatique

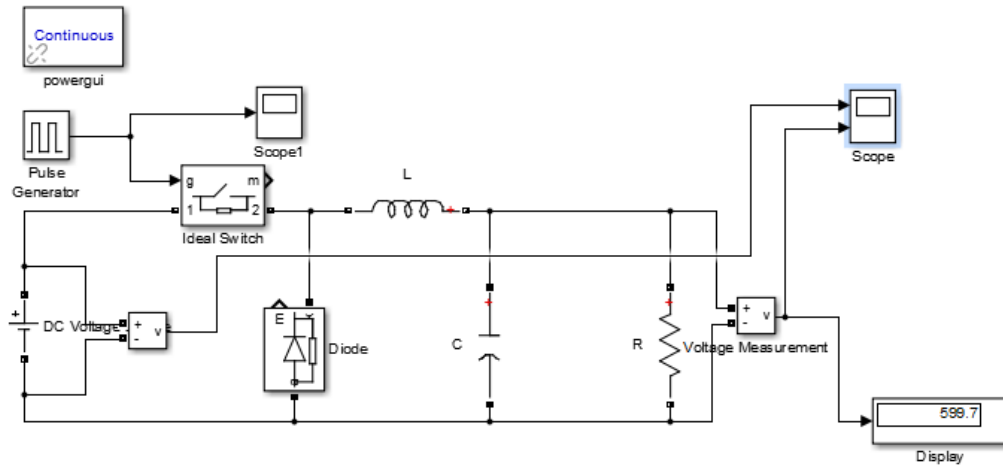
Durant la traction, il est utilisé comme un convertisseur Buck, ou hacheur série, qui sert à abaisser la tension continue entrante au tramway pour la délivrer à l'onduleur.

En freinage électrique, le moteur asynchrone est utilisé comme générateur et l'onduleur opère comme un simple redresseur à diodes. donc l'ensemble est similaire à un moteur à courant continu fonctionnant comme un générateur et cette énergie de freinage se réinjecte au circuit de traction se qui cause par conséquent la destruction de certains matériels de traction.

Donc, un des moyens de résoudre ce problème est de dissiper l'énergie renvoyée aux résistances rhéostatiques présentes à l'intérieur du tram

par l'intermédiaire de l'hacheur de freinage associé en parallèle (Boost).  
[30] [31] [3]

La figure ci-dessous présente le montage de l'hacheur en mode traction.

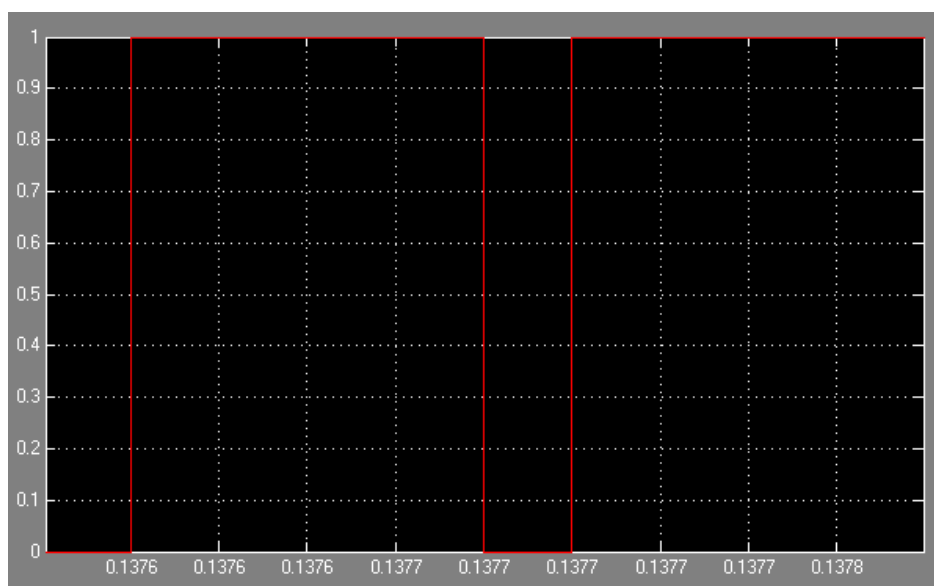


**FIGURE 3.18:** Montage de l'hacheur rhéostatique en mode traction

On a gardé les mêmes valeurs de  $C = 1 \times 10^{-6} \text{C}$ , et  $L = 0.1 \text{H}$ .

La durée de conduction  $T$  est comprise entre 0 et 1 donc, le rapport cyclique est compris entre 0 et 1. On peut exprimer la durée de conduction et de blocage de l'interrupteur en fonction de  $\alpha$  et  $T$  :

- Durée de conduction :  $T_{cond} = \alpha T = 80 \mu\text{s}$ .
- Durée de blocage :  $T_{off} = (1 - \alpha T) = 20 \mu\text{s}$ .



**FIGURE 3.19:** Signal de commande de l'interrupteur

Donc on peut calculer cotre rapport cyclique comme suit :

$$\alpha = \frac{T_{cond}}{T} = \frac{80}{100} = 0.8$$

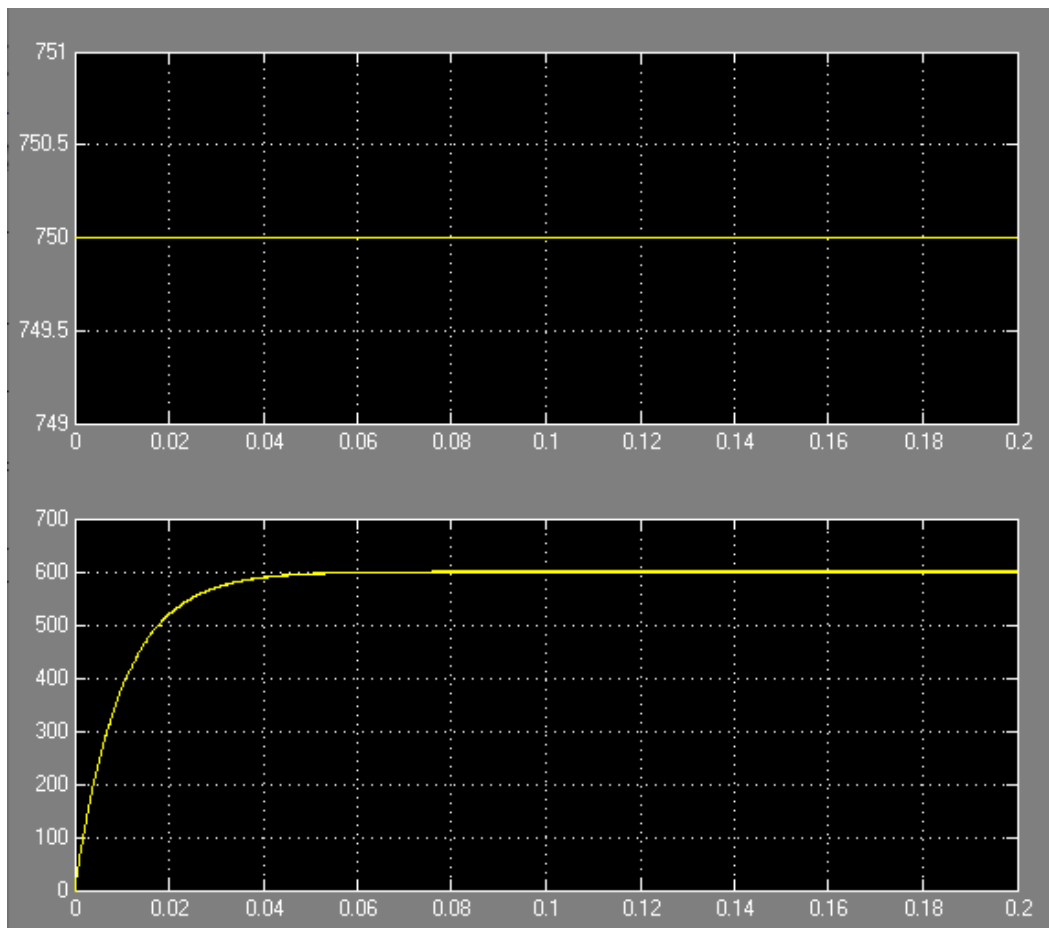
Comme on a vu dans le chapitre précédent la relation entre la tension d'entrée et la tension de sortie d'un hacheur série :

$$V_s = \alpha U$$

Donc :

$$V_s = 0.8 \times 750 = 600V$$

La figure suivante illustre la tension de sortie obtenue par l'hacheur série réduite à 600 V.

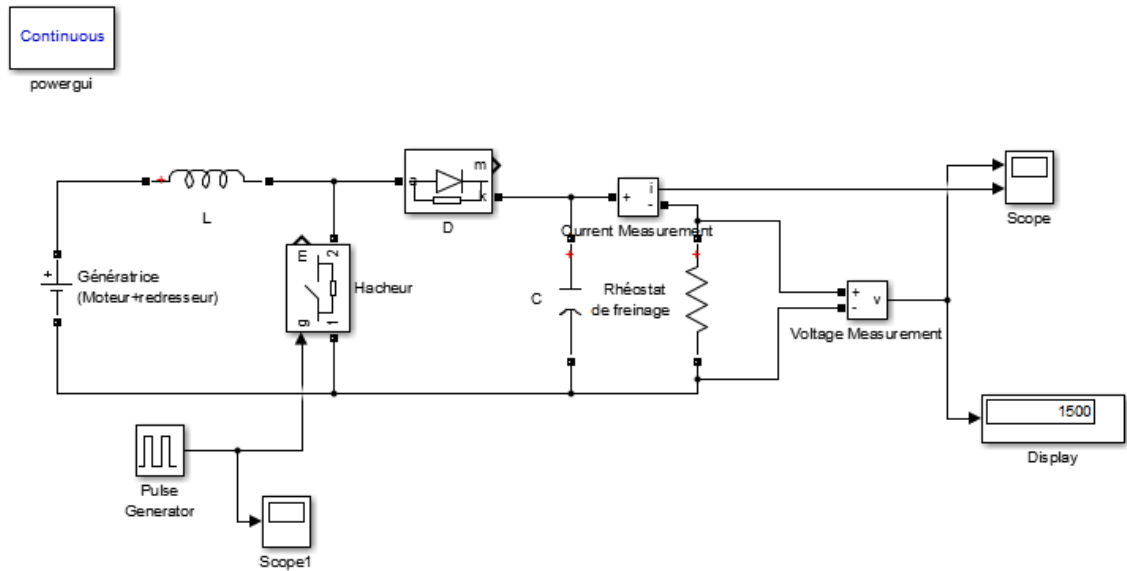


**FIGURE 3.20:** Tension d'entrée et de sortie de l'hacheur en traction

Donc on voit bien que la tension de sortie de l'hacheur est 600 V DC. Avec un régime transitoire de 0.05s.



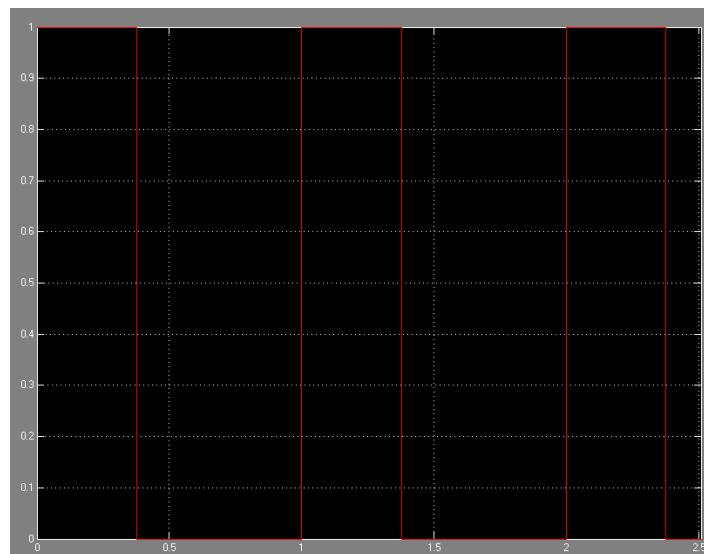
La figure ci-dessous présente le montage de l'hacheur en mode freinage.



**FIGURE 3.21:** Montage de l'hacheur rhéostatique en mode freinage

la durée de conduction et de blocage de l'interrupteur en fonction de  $\alpha$  et  $T$  :

- Durée de conduction :  $T_{cond} = \alpha T = 37.7 \mu s$ .
- Durée de blocage :  $T_{off} = (1 - \alpha T) = 62.3 \mu s$ .



**FIGURE 3.22:** Signal de commande de l'interrupteur

Donc on peut calculer cotre rapport cyclique comme suit :

$$\alpha = \frac{T_{cond}}{T} = \frac{37.7}{100} = 0.377$$

Comme on a vu dans le chapitre précédent la relation entre la tension d'entrée et la tension de sortie d'un hacheur parallèle :

$$V_s = \frac{U}{1 - \alpha}$$

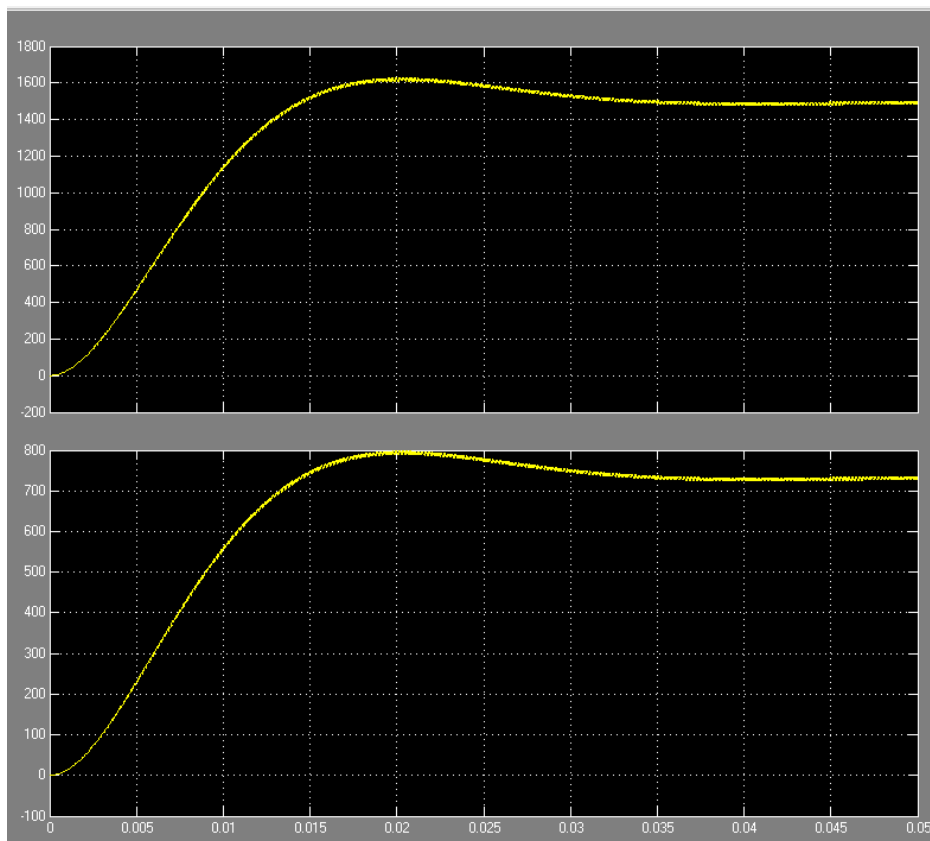
Avec la tension d'entrée est la tension sortante du moteur redressée par l'onduleur qui, dans ce cas, opère comme un redresseur à diodes.

$$V_{Red} = \frac{3\sqrt{3}\sqrt{2}}{\pi}V = \frac{3\sqrt{3}\sqrt{2}}{\pi}400 = 935V$$

Donc :

$$V_s = \frac{935}{1 - 0.377} = 1500V$$

Et on obtient les valeurs de la tension et courant suivante :



**FIGURE 3.23:** Tension et courant de sortie de l'hacheur en mode freinage

D'après les figures on remarque bien que la tension et le courant ont été bien élevés, ou on voit que la tension de sortie est de 1500V, avec un régime transitoire court de 0.03s.

Donc on aura une dissipation de l'énergie générée avec un courant élevé comme la figure nous montre.

### 3.5.2 Simulation de l'onduleur triphasé à commande MLI sinus-triangle

L'onduleur est un convertisseur DC-AC qui fournit des courants ou des tensions alternatifs de fréquence et amplitudes pour alimenter les moteurs à courant alternatif.

Dans le tramway on trouve un onduleur triphasé à base des interrupteurs qui se compose d'IGBT de puissance (Insulated Gate Bipolaire Transistor) en parallèle avec une diode, cette dernière qui assure la continuité en sens inverse du courant.

La commande de ces interrupteurs est faite par la commande MLI.

La figure ci-dessous présente le montage de l'onduleur triphasé en MLI sinus-triangle.

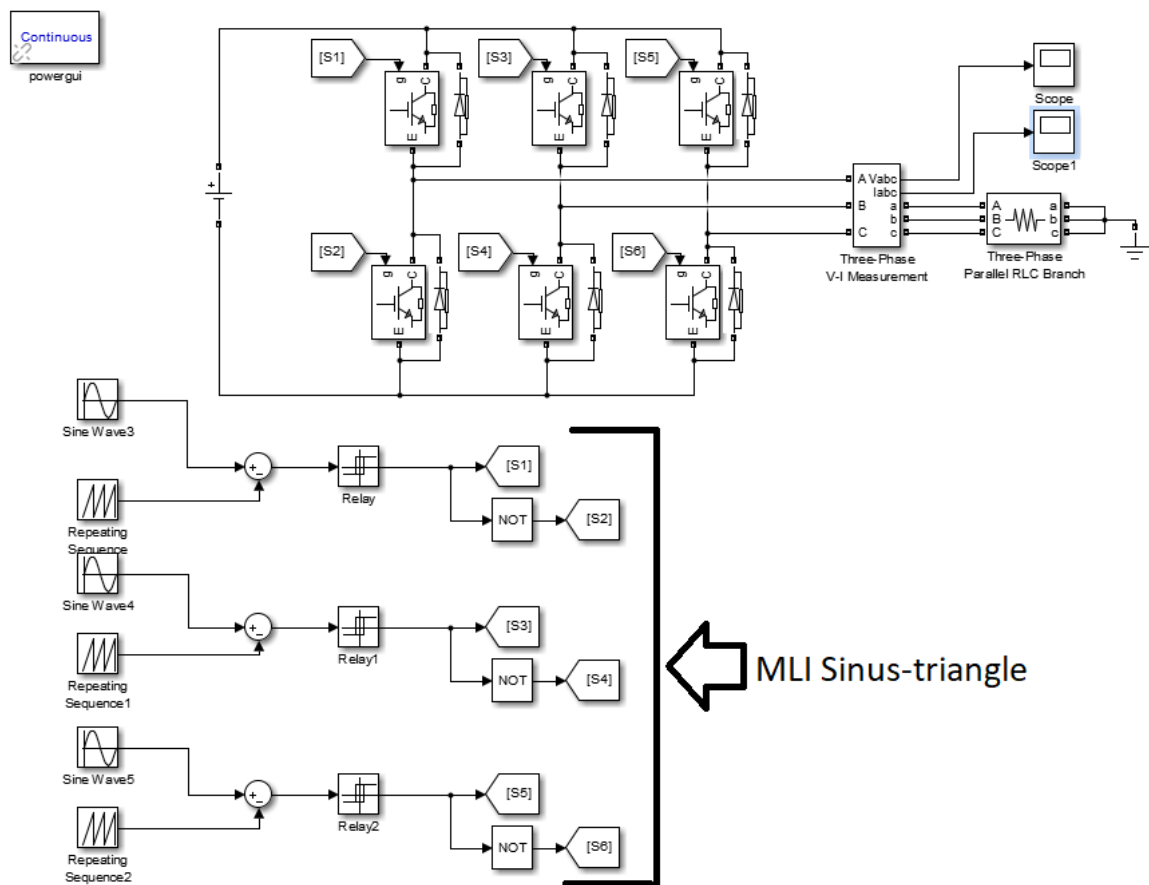
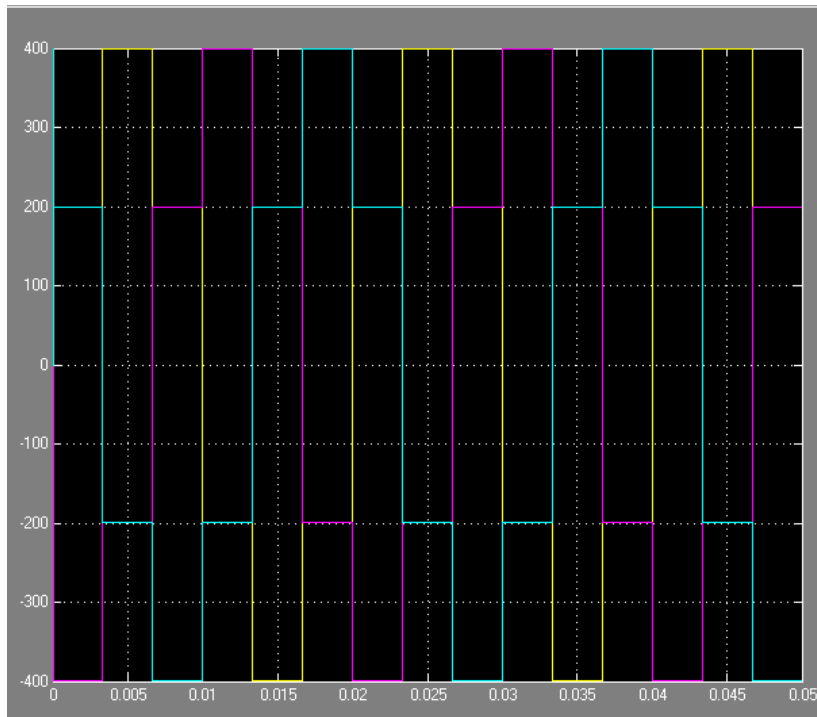


FIGURE 3.24: Montage d'un onduleur triphasé commandé en MLI

Après la simulation on obtient les courbes de tensions et courants sortants de l'onduleur qui sont illustrés par les figures si-dessous



**FIGURE 3.25:** Les tensions de sortie de l'onduleur

La commande MLI sinus-triangle a comparé les tensions de référence à un signal triangulaire appelé porteuse dont la fréquence est relativement élevée par rapport à celle des références, de sorte que les tensions de sortie de l'onduleur ont un fondamental très proche des tensions de référence. [32]

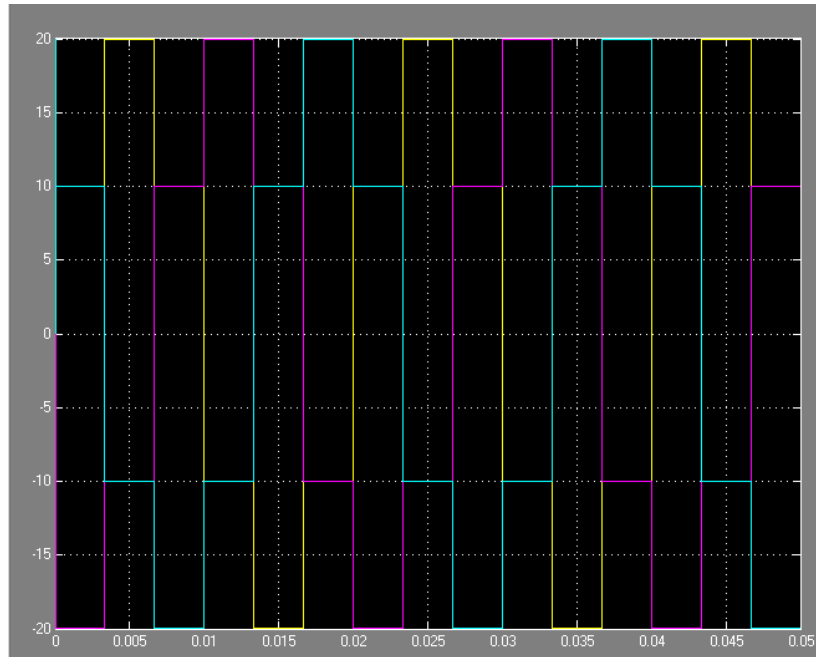


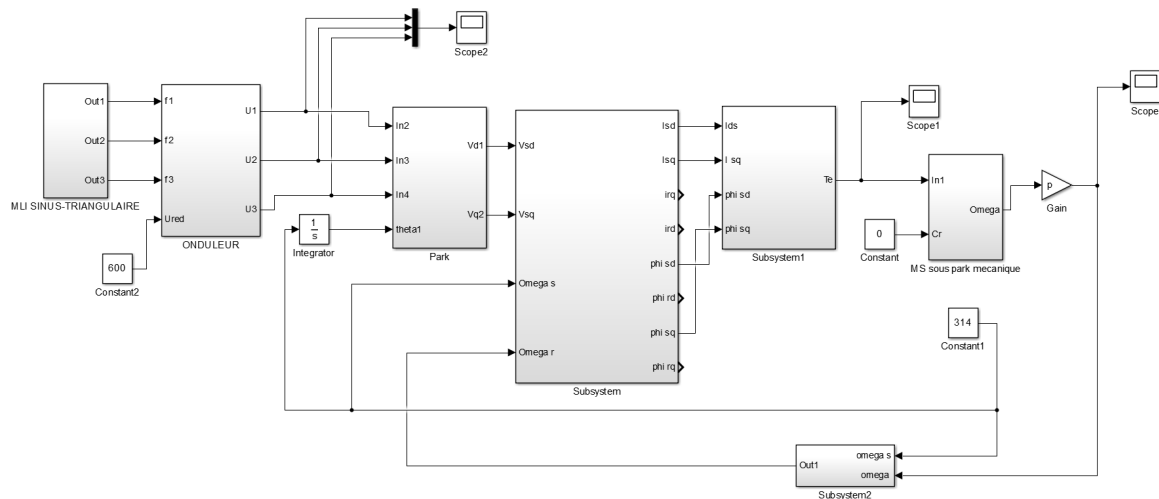
FIGURE 3.26: Les courants de sorties de l'onduleur

### 3.5.3 Simulation du moteur asynchrone

Le dernier élément qu'on va simuler parmi les composants du tramway est le moteur asynchrone, qui est une machine électrique à courant alternatif et à vitesse ajustable, très utilisé dans le secteur industriel à cause de sa simple constitution et nécessite très peu d'entretien.

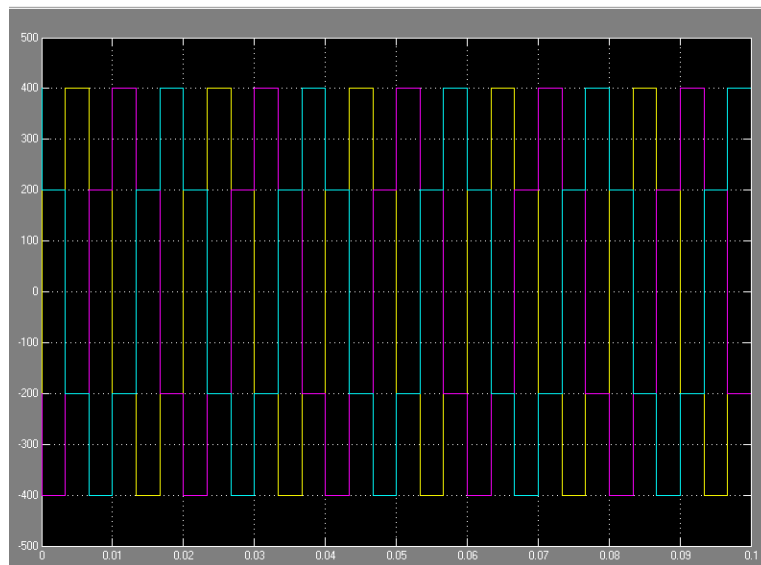
Avec les progrès et le développement de l'électronique de puissance, le moteur asynchrone est devenu plus facile à commander par l'alimentation triphasée variable assurée via un convertisseur électronique qui est l'onduleur, destiné pour variation de la vitesse des moteurs électriques.

Donc, en utilisant les équations de modélisation la machine asynchrone vu dans le chapitre 2 et les traduire en bloc sur SIMULINK on aura le schéma suivant :



**FIGURE 3.27:** Schéma bloc de simulation de l'association onduleur-MAS

Le moteur asynchrone est associé à un onduleur triphasé MLI Sinus-Triangle, la figure ci-dessous nous montre les tensions de sortie de l'onduleur qui vont alimenter le moteur :



**FIGURE 3.28:** Les tensions à la sortie de l'onduleur

On peut voir que l'onduleur simulé ne prend pas une forme parfaitement sinusoïdale, cela est en raison de la commande MLI.

Les figures suivantes illustrent les équations au stator et au rotor et l'équation mécanique, ainsi que la transformation de PARK

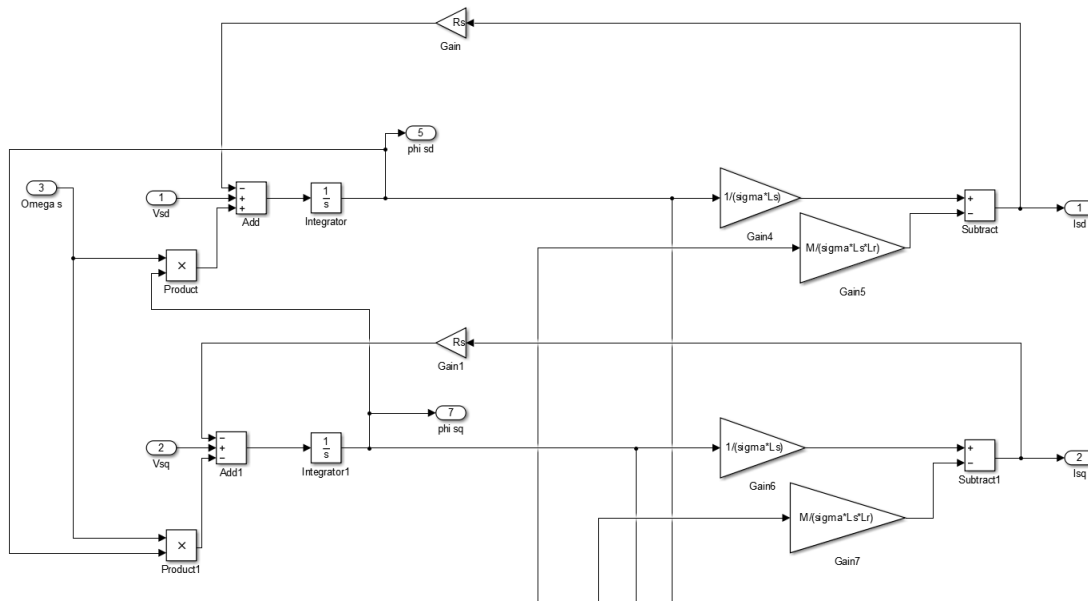


FIGURE 3.29: équations de la machine au stator

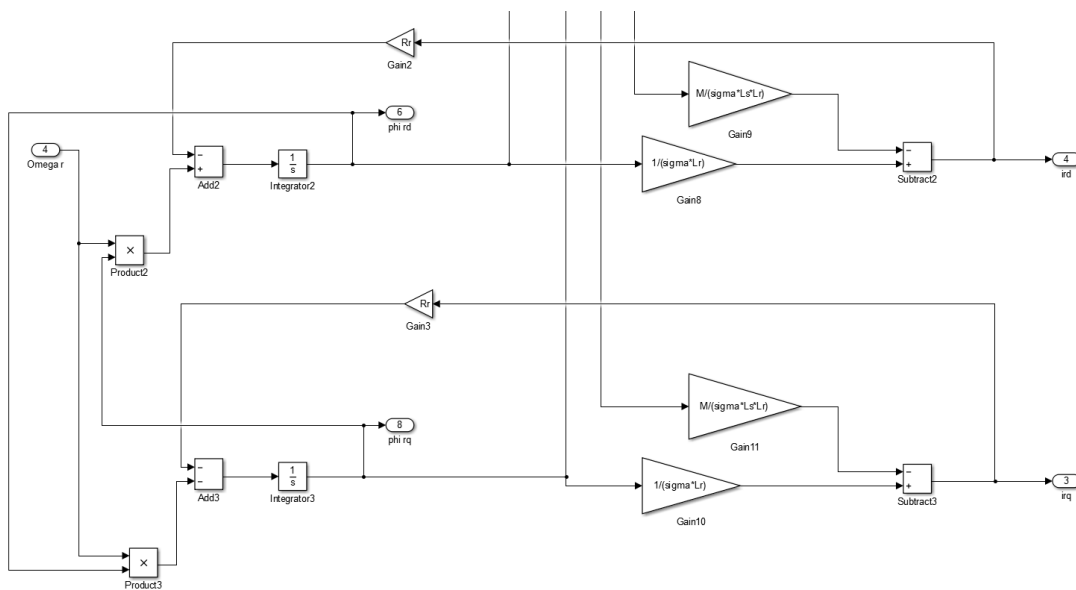


FIGURE 3.30: équations de la machine au rotor

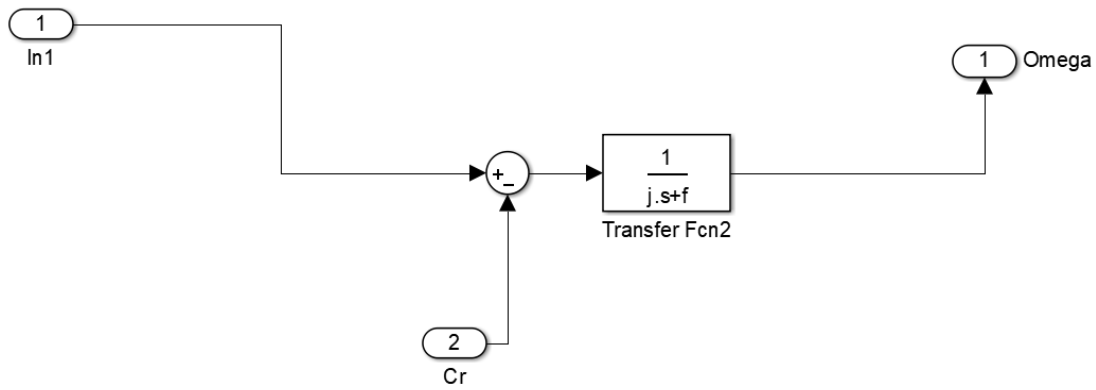


FIGURE 3.31: équation mécanique

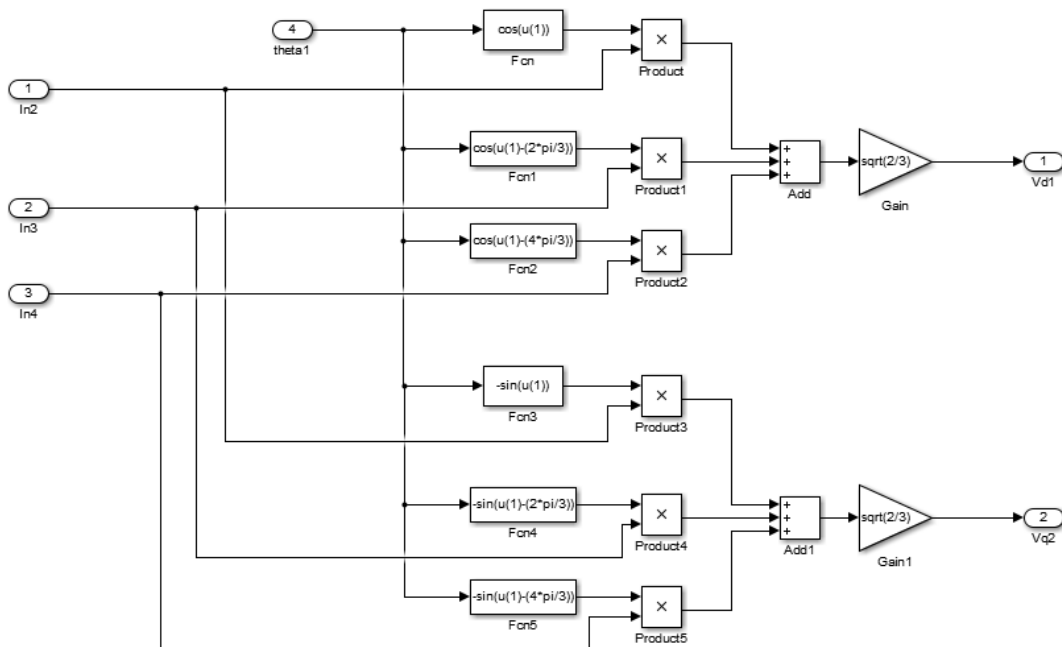
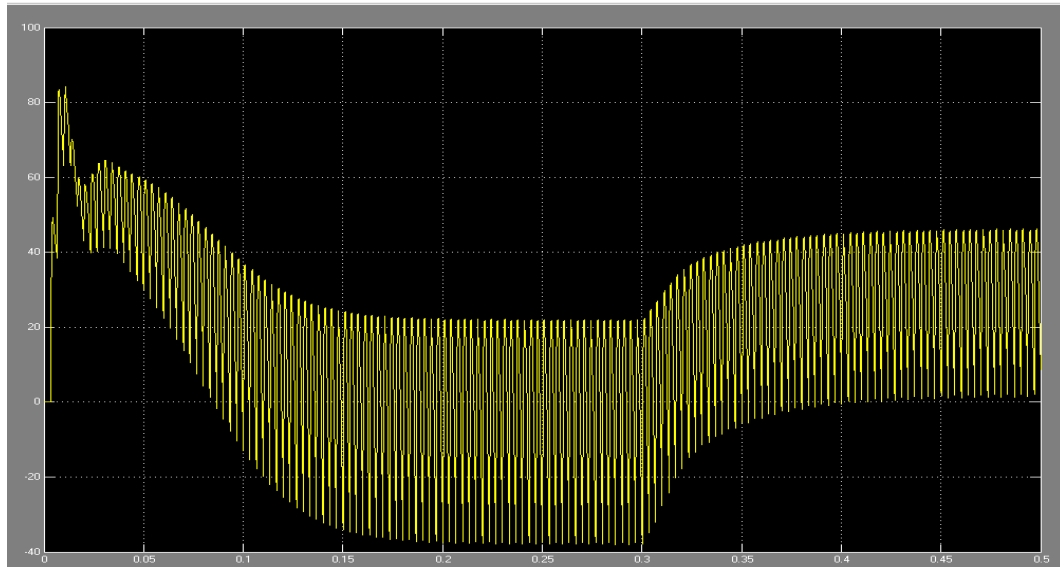


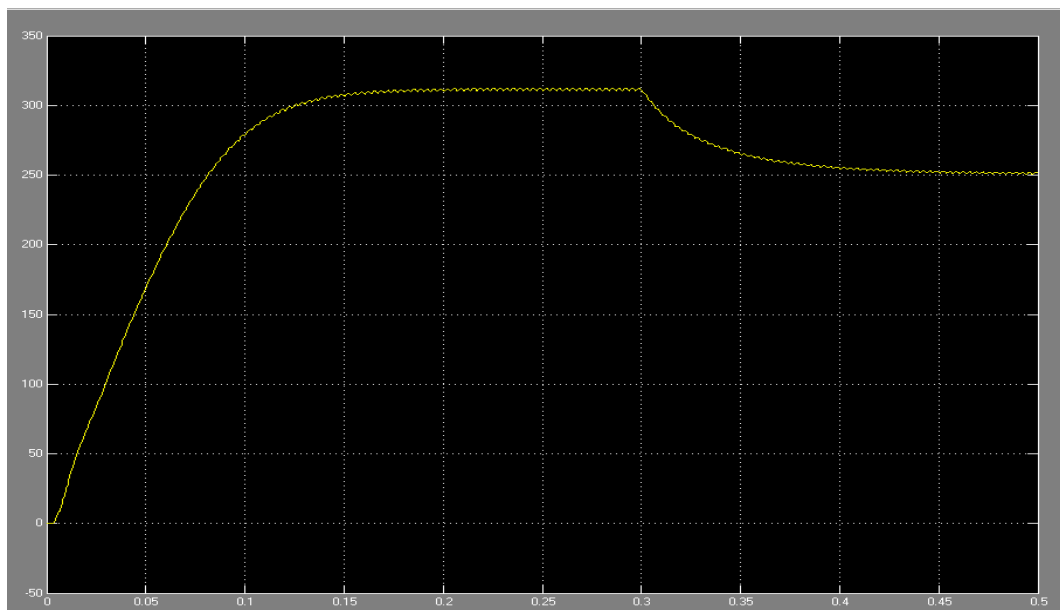
FIGURE 3.32: La transformé de PARK

on va simuler le démarrage à vide à l'instant initial , puis on introduit un couple résistant  $C_r = 30Nm$  à l'instant  $t = 0.3s$ .





**FIGURE 3.33:** Allure du couple



**FIGURE 3.34:** Allure de la vitesse

D'après les figure (3.33) et (3.34) , le moteur démarre très rapidement à vide en raison du couple de démarrage élevé puis se stabilise près du zéro et il prend une vitesse désiré. Puis lors de l'application d'un échelon du couple résistant  $C_r = 30Nm$  , la vitesse diminue et le couple tend vers la valeur du couple résistant.

On peut voir que l'onduleur était capable de fournir une puissance au moteur avec des ondulations de vitesse mais qui sont acceptables. [33]

## 3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons bien présenté la simulation des composants du réseau d'alimentation du tramway, ainsi que nous avons montrés le changement de forme et type de tension suite à l'integration des convertisseurs électrique (Redresseur, Hacheur, Onduleur, Transformateur). Dans ce chapitre nous avons aussi simulés l'interface APS par le logiciel ISIS PROTEUS.

Les résultats de la simulation sont concordants avec nos objectifs et très similaire au réalité.

# Conclusion générale

Le tramway a connu plusieurs étapes d'évolution. Il constitue le meilleur moyen de transport urbain, on est passé des tramways à cheval aux tramways électriques.

L'Algérie aussi a reconnue une évolution dans le domaine des tramways, y'avait aucun tramway en service jusqu'à l'an 2011 ou on a reconnu le premier tramway à Alger. A l'heure présent six villes profitent de ce moyen de transport, et dans trois autres on est en phase de construction.

Ce travail présente la modélisation et la simulation du réseau d'alimentation du tramway, plus précisément l'alimentation par le sol. Tout d'abord nous avons commencé par présenter le réseau d'alimentation électrique des tramways urbains et le système de traction, où nous avons appris que les lignes des tramways sont alimentées par des réseaux a courant continu sous une tension qui est généralement de 750 V. cette tension est convertie en tension alternative pour être utiliser a la motorisation de la machine asynchrone cette dernière responsable de la traction de tramway.

En suite, nous avons abordé le principe de traitement de l'énergie électrique et l'étude de changement de forme et type de tension en utilisant des convertisseurs électrique (Redresseur, Hacheur, Onduleur, Transformateur) et la machine asynchrone, ainsi que la modélisation de ces dernières.

En fin, nous avons terminés par la simulation du circuit composant le réseau d'alimentation et de traction en simulant sous MATLAB tout les convertisseurs statiques qui assurent la conversion indirecte AC/DC/AC entre le réseau alternatif triphasé du poste HT et la machine triphasée asynchrone, ou les résultats de simulation montrent un bon fonctionnement des convertisseurs. Comme on a simulé l'interface APS par le logiciel ISIS PROTEUS.

Pour conclure notre travail, nous voulons dire que ce travail ne prétend pas être le meilleur résultat pour le système de traction des tramways,

mais, il ouvre la route vers une étude plus approfondie. Cependant, il ya encore de nombreux problèmes à résoudre, comme la récupération de l'énergie de freinage qui peut aider à réduire la demande d'énergie. D'ailleurs, ce travail nous a permis d'acquérir des connaissances utiles pour la suite de notre vie professionnelle.

# Bibliographie

- [1] W. BENHASSANI. La commande de tramway Cas de tramway de constantine, Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'Hidi-Oum El Bouaghi.
- [2] Liste des tramways en Algerie Ema, <https://metroalger-dz.com/fr/activities.php>.
- [3] E. MORIN. Modélisation d'un réseau électrique de tramway : du composant au système, Thèse de Doctorat, Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2005.
- [4] A. ARAB et M. R. FAKIH. Etude du système d'alimentation du tram de Sidi Bel Abbès, Mémoire de Master, Université Djillali Liabes Sidi Bel Abbès, 2015.
- [5] Tramway : Alimentation par le sol, baccalauréat général session 2007 Série S Sciences de l'ingénieur.
- [6] APS Subsystem Overview Specification. Engineer employer's representative, ALSTOM.
- [7] T. FORT et O. CHANTAL. Evaluation sous trafic lourd des systèmes d'Alimentation Par le Sol (APS) des tramways, ALSTOM transport.
- [8] Cital-assemblage et maintenance des matériels roulants <https://www.cital-dz.com/produits-services/citadis>.
- [9] M. P. MATHYS et S. PROHOROFF, Modélisation et simulation de transformateurs pour alimentations à découpage, Thèse de Doctorat, Université Libre de Bruxelles.
- [10] G. CORMIER, Support de cours sur les transformateurs.
- [11] S. GUY et N. FRANCIS. Electrotechnique industrielle, Tec et doc (Lavoisier), 1982.
- [12] Support cours sur les redresseurs, Université de Savoie.
- [13] A. BENHADJER, Etude, simulation et réalisation du redresseur, aiguilleur et hacheur pour les trains électro-diesel, PFE, Ecole Supérieure en Sciences Appliquées Tlemcen.

- [14] I. HIDRI. Support de cours d'électronique de puissance, ISET de Nabeul.
- [15] L'onduleur, <http://for-ge.blogspot.com/2015/08/londuleur.html>.
- [16] D.. VIOLAINE, Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques Fonctionnement, Etat de l'Art et Etude des Performances, Hespul Villeurbanne.
- [17] S. GUY, B. ROBERT, L. FRANCIS, Les convertisseurs de l'électronique de puissance la conversion alternatif (volume 4). Edition tecdoc, 1995.
- [18] A. BOUKAROURA, Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche Bond-Graph, Magister en Electrotechnique, Université Ferhat Abbas de Setif.
- [19] N. ADJIMI et W. BELAIDI, Modélisation et commande d'un onduleur MLI, Mémoire de fin d'études, Université Larbi Ben M'hidi Oum El-Bouaghi.
- [20] A. DEBICHE et A. SMATI, Commande non linéaire adaptative avec observateurs d'état d'une machine alimentée en courant, Ingénieur d'état en génie électrotechnique, M'sila 2004-2005.
- [21] Y. DIAF et D.I BEN ANTER, Modélisation et commande d'un onduleur triphasé piloté par MLI à structure multiniveaux, Projet de fin d'étude ingénierie électrique, Université Kasdi Merbah à Ouargla.
- [22] R.TOUFOUTI, Contribution à la commande directe du couple de la machine asynchrone, Doctorat en Sciences en électrotechnique, Université Mentouri Constantine.
- [23] N. KEMASSI et B. GRAID, Etude d'alimentation électrique du tramway, Mémoire Master académique, Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [24] A. KERBOUA, Électrotechnique II : machines électriques à courant alternatif ; Machines Synchrones et Asynchrones, Polycopié du cours, Université de Mascara.
- [25] J. P. LOUIS, Modélisation des machines électriques en vue de leur commande, EGEM, LAVOISIER 2004.
- [26] A. S. HADEED, Simulation of Power Electronics Circuits using SIMULINK, 1<sup>st</sup> ed. Saarbruchen, Germany : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013.
- [27] Convertisseur buck, <http://bib.univ-oeb.dz:8080/js-pui/bitstream/123456789/7929/1/these>.
- [28] Proteus (ISIS et ARES), <http://www.elektronique.fr/logiciels/proteus.php>.

- [29] Labcenter, <https://www.labcenter.com/>.
- [30] V. SABATÉ, Traction électrique ferroviaire : Convertisseurs et moteurs, Techniques de l'Ingénieur, 2008.
- [31] I. TALIL et F. ZERHOUNI, Building Information Modeling pour des Applications Ferroviaires : Conception d'une Sous-Station de Tramway, Mémoire de fin d'études, Université Ibn Tofail.
- [32] A. KERBOUA, Chapitre IV : Commande de la Machine Synchrone, support de cours, Ecole supérieure en sciences appliquées Tlemcen.
- [33] A. KERBOUA, Chapitre V : Commande de la Machine Asynchrone, support de cours, Ecole supérieure en sciences appliquées Tlemcen.

## Résumé

Depuis des années, le marché du transport urbain bénéficie principalement du mode routier. Cependant, le mode ferroviaire s'impose aujourd'hui face aux besoins croissants des tramways.

Le tramway fait partie d'une grande attention en faveur du développement durable, de l'amélioration de la qualité de vie, de l'environnement et des facilités de déplacements pour les habitants.

C'est un transport urbain devenu incontournable dans les grandes villes, il facilite les voyages, les déplacements professionnels, les courses, les enfants pour aller à l'école ou même pour une simple sortie en famille.

L'alimentation électrique par le sol (APS) est une méthode d'alimentation pour tramways se substituant, dans certaines zones de centre-ville ou de rues étroites, il est fiable et réduit l'empreinte des lignes de tramway et préserve l'esthétique des environnements urbains.

Le réseau d'alimentation du tramway est constitué de plusieurs composants, donc nous avons modélisé ce réseau d'alimentation, et simulé chaque convertisseur plus le moteur de traction sous le logiciel Matlab.

**Mots-clés :** Tramways, déplacement, alimentation électrique par le sol, réseau d'alimentation, modélisation, simulation.

## Abstract

For years, the urban transportation market has mainly benefited from road transport. However, the rail mode is now essential to meet the growing needs of tramways.

The tramway is part of a major focus on sustainable development, improving the quality of life, the environment and the ease of travel for residents.

It is an urban transport system that has become a must in large cities, making travel, business trips, shopping, school trips and even simple family outings easier for children.

Ground Power Supply is an alternative power supply method for streetcars, in certain areas of city centers or narrow streets, it is reliable and reduces the footprint of tramway lines and preserves the aesthetics of urban environments.

The tramway power supply network is made up of several components, so we have modeled this power supply network, and simulated each converter plus the traction motor under Matlab software.

**Keywords :** Tramway, travel, Ground Power Supply, The tramway power supply, modelization, simulation.



## المخلص

لسنوات عديدة، استفاد سوق النقل الحضري بشكل أساسي من وضع الطرق. ومع ذلك، فإن وضع السكك الحديدية ضروري اليوم في مواجهة الاحتياجات المتزايدة لقطارات الترامواي.

يعتبر الترامواي جزءاً مهم لصالح التنمية المستدامة وتحسين نوعية الحياة والبيئة وسهولة الحركة للمقيمين. فهو وسيلة نقل حضرية أصبحت ضرورية في المدن الكبيرة، فهي تسهل السفر ورحلات العمل والتسوق والأطفال للذهاب إلى المدرسة أو حتى لنزهة عائلية بسيطة.

مصدر الطاقة تحت الأرض هو وسيلة بديلة لتزويد الطاقة بالترامواي، في بعض مناطق وسط المدينة أو الشوارع الضيقة، يمكن الاعتماد عليه ويقلل من أثر خطوط الترامواي ويحافظ على الجماليات البيئات الحضرية.

تتكون شبكة طاقة الترامواي من عدة مكونات، لذلك قمنا بتصميم شبكة الطاقة هذه، وقمنا بمحاكاة كل محول بالإضافة إلى محرك الجر في إطار برنامج Matlab.

**الكلمات المفتاحية:** الترامواي، الحركة، مصدر الطاقة تحت الأرض، شبكة طاقة الترامواي، بتصميم شبكة الطاقة.