

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Présenté par :

GHILANI Abdelmoumen

TIDJANI Islam

Thème:

Alimentation électrique du tramway (Cas de tramway de Ouargla)

Soumis au jury composé de :

M ^r KOURAS Sid Ali	MAA	Président	UKM Ouargla
M ^r LOUAZENE Med Lakhdar	MCA	Encadreur	UKM Ouargla
M ^r KHETTACHE Laid	MCB	Examineur	UKM Ouargla

Année universitaire 2020/2021

Dédicace

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

À mes parents les plus chers, à 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

À mes frères et sœurs qui m'ont soutenu et m'ont donné la force d'aller de l'avant, Mes plus proches amis, Salah et Marwane.

À mon binôme Isalm, dont je suis extrêmement fier et reconnaissant, et tous mes collègues avec qui j'ai partagé les deux dernières années.

Vous avez travaillé dur pour moi, sans compter le prix à 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 Mémoire.

GHIJANI.ABDELMOUMEN

Dieu merci, il m'a aidé à accomplir ce travail modeste Je la dédie à mes chers parents qui me soutiennent et me guident dans chaque partie de mes études, "Que Dieu les bénisse". À mes frères et sœurs qui m'ont soutenu et m'ont donné la force d'aller de l'avant.

TIDJANI ISLAM

Remerciement

Avant tout, nous tenons à remercier Allah « Tout Puissant » qui nous a donné, santé et courage pour achever notre travail.

Nous tenons également à exprimer notre sincère gratitude, notre appréciation et notre respect à LOUZEN LAKHDAÏR, à cause de sa grande confiance et pour nous avoir choisis pour prendre en charge ce travail.

Je lui remercie pour son implication, son soutien, ses remarques fructueuses et ses précieux conseils lors de notre étude et réalisation de ce travail.

Nos remerciements vont aussi au président du jury et aux membres du jury aminateurs qui nous ont fait l'honneur de participer à l'évaluation de ce travail.

Nos remerciements sont adressés également aux enseignants de notre département d'électrotechnique lors de contributions à notre formation.

Nos remerciements vont également au setram Ouargla, qui ont contribué à notre Mémoire

Enfin, nous remercions nos familles, nos amies qui de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Table des matières

Table des matières	I
Liste des figures	IV
Liste des tableaux	VII
Liste des abréviations	VIII
Introduction générale	1
I Les réseaux électriques des tramways	2
I.1 Introduction	2
I.2 Historique	2
I.3 Le structure du réseaux d'alimentation de tramway	2
I.3.1 Ligne aérienne de contact	3
I.3.2 Alimentation par le sol	4
I.4 La sous-station de redressement	5
I.4.1 Tableau haute tension	6
I.4.2 Les transformateurs	7
I.4.3 L'ensemble redresseur SIA	7
I.4.4 Le disjoncteur DC ultrarapide :	7
I.4.5 Le tableau général basse tension	8
I.4.6 L'alimentation sans interruption (ASI)	8
I.4.7 Les pertes en ligne	8
I.5 Le matériel roulant	8
I.5.1 La motorisation des tramways	9
I.5.2 Les bogies	9
I.5.3 Les types de freinage :	10
I.5.4 Les courants vagabonds	11
I.6 La Chaîne de traction	12
I.6.1 L'appareil de protection	13
I.6.2 Le filtre d'entrée	13
I.6.3 Les convertisseurs de traction	13
I.6.4 Les moteurs	13
I.6.5 Les convertisseurs auxiliaires	13
I.6.6 Le maintien du plan de tension	13
I.6.7 Échanges entre les tramways	14
I.7 Limitations et améliorations possibles d'un réseau classique de tramways	14
I.7.1 Architecture électrique classique d'un réseau de tramways	14

I.7.2	Nouvelles architectures d'alimentation(Transformateur centralisé)	15
I.7.3	La réversibilité des sous-stations	15
I.8	Conclusion	16
II	L'alimentation électrique du tramway de Ouargla	17
II.1	Introduction	17
II.2	La ligne du tramway de Ouargla	17
II.3	Matériel roulant du tramway de Ouargla	18
II.3.1	Les bogies	19
II.3.2	Le freinage	20
II.4	Le centre de maintenance	21
II.4.1	Le poste de commandes centralisées	21
II.4.2	Le poste haute tension	22
II.5	Les postes équipements force	24
II.6	La sous-station de redressement	24
II.7	Les lignes aériennes	26
II.7.1	Isolateurs de sections	26
II.7.2	Coffrets de mise en parallèle	27
II.7.3	Les connexions de continuité.	27
II.7.4	Feux de présence tension	27
II.8	La chaîne de traction	28
II.8.1	Coffre de traction	31
II.8.2	Le module de puissance (ONIX850DLP3)	31
II.8.3	Moteur de traction (4HGA1433)	33
II.8.4	Les convertisseurs auxiliaires	34
II.9	Conclusion	34
III	Commande direct du couple des moteurs de tramway	35
III.1	Introduction	35
III.2	Les onduleurs	36
III.2.1	L'onduleur triphasé à deux niveaux	36
III.3	La machine asynchrone	38
III.3.1	Constitution de la machine asynchrone	38
III.3.2	Principe de fonctionnement du moteur asynchrone	38
III.3.3	Equations de la machine asynchrone généralisée	39
III.3.4	Les changements de référentiels	41
III.4	Principe de la commande directe du couple	42
III.5	La théorie de la commande directe du couple	43
III.5.1	Le contrôle vectoriel du couple	43
III.5.2	Contrôle du vecteur flux statorique	44
III.6	Présentation de la structure de contrôle	45
III.6.1	Sélection du vecteur tension V_s	45
III.6.2	Estimation du flux statorique	46
III.6.3	Estimation du couple électromagnétique	47
III.7	Elaboration du vecteur de commande	47
III.7.1	Correcteur du flux de la DTC à deux niveaux	47
III.7.2	Correcteur du couple de la DTC à trois niveaux	48
III.7.3	Elaboration de la table de commande	49
III.8	Gestion de la trajectoire de vitesse du tramway	50

III.9 Structure générale de la commande direct du couple des moteurs de tramway	50
III.10 Conclusion	52
IV Modélisation et simulation de l'alimentation électrique du tramway	53
IV.1 Introduction	53
IV.2 Simulation du réseaux de l'alimentation du tramway	53
IV.2.1 Le transformateur	53
IV.2.2 Le redresseur	54
IV.2.3 Simulation du poste haute tension	56
IV.2.4 Simulation de la sous-station	57
IV.3 Modélisation et simulation de la chaîne de traction du tramway	58
IV.3.1 Modélisation de la chaîne cinématique	58
IV.3.2 Modélisation de la commande direct du couple	61
IV.3.3 Modélisation de l'algorithme de gestion de la trajectoire de vitesse de tramway	62
IV.3.4 Simulation du bogie moteur	63
IV.3.5 Simulation du hacheur de freinage	64
IV.3.6 Simulation d'onduleur triphasé à deux niveaux	64
IV.3.7 Bloc de defluxage	65
IV.4 Les résultats de simulation du réseaux d'alimentation électrique du tram- way	65
IV.4.1 Interprétation des résultats	68
IV.5 Les résultats de simulation de la chaine de traction	68
IV.5.1 Interprétation des résultats	72
IV.6 Conclusion	73
Conclusion générale	74
Bibliographie	76
Annexe A	78
Annexe B	81
Annexe C	83
Résumé	84

Liste des figures

I.1	Illustration d'un réseau de tramway	3
I.2	Principe de la ligne aérienne de contact (LAC)	3
I.3	Support latéral d'une ligne aérienne de contact	4
I.4	Pantographe	4
I.5	Principe d'alimentation par sol l'APS	5
I.6	Tramway de Bordeaux : changement d'alimentation LAC/APS	5
I.7	Le rôle de la sous-station de redressement	6
I.8	Les types des transformateurs de traction	7
I.9	Schéma d'une alimentation sans interruption	8
I.10	Bogie moteur Arpège équipant les tramways Citadis TM	9
I.11	Bogie moteur Ixège pour les tramways Citadis TM	10
I.12	Bogie porteur	10
I.13	Les Outils de freinages	11
I.14	Principe de circulation des courants vagabonds	12
I.15	Schéma de principe d'une chaîne de traction de tramway	12
I.16	Alimentation classique d'un réseau de tramway	14
I.17	Nouvelles architectures d'alimentations	15
I.18	Une sous-station réversible	16
II.1	La ligne de tramway de Ouargla.	17
II.2	Tramway de Ouargla.	18
II.3	Schéma de tramway de Ouargla	19
II.4	Bogies moteur du tramway de Ouargla	20
II.5	Bogie porteur du tramway de Ouargla	20
II.6	Le centre de maintenance du tramway de Ouargla	21
II.7	Le poste de commandes centralisées (PCC)	21
II.8	Les deux arrivées du poste haute tension de tramway de Ouargla	22
II.9	Le poste haute tension (PHT) de tramway de Ouargla	22
II.10	Schéma des deux transformateur de puissance 60 /30 KV	23
II.11	Transformateur de puissance 60 /30 KV-13MVA	23
II.12	La distribution du réseau 30kV	24
II.13	Localisation des sous-station de redressement	24
II.14	Schéma des deux types de sous station de redressement de la ligne de tramway de Ouargla	25
II.15	Les lignes aériennes de tramway de Ouargla	26
II.16	Isolateurs de sections	26
II.17	Distribution de câble feeder 750 Vcc	27
II.18	Connexion de continuité	27

II.19	Feux de présence tension	28
II.20	Pantographe de tramway de Ouargla	28
II.21	La chaîne de traction de tramway de Ouargla	29
II.22	Les équipements en toiture du matériel roulant du Citadis 402	30
II.23	Coffre de traction	31
II.24	Schéma du module de puissance ONIX850DLP3	32
II.25	Le régulateur AGATE	32
II.26	Moteur 4HGA1433	33
II.27	Profil couple- vitesse	33
II.28	Alimentation des auxiliaires à travers des convertisseurs	34
III.1	Structure d'un onduleur triphasé à deux niveaux	36
III.2	Etats des interrupteurs pour chaque vecteur de tension	37
III.3	Représentation de la machine asynchrone triphasée dans l'espace électrique	39
III.4	Transformation de Concordia	41
III.5	Le couple produit en fonction des flux $\bar{\phi}_s$ et $\bar{\phi}_r$	44
III.6	Évolution du vecteur flux statorique dans le plan (α, β)	44
III.7	Pilotage du vecteur flux statorique à l'aide des vecteurs tension fournis par un onduleur de deux niveaux	44
III.8	Evolution du flux et du couple pour les différents vecteurs de tensions possibles	46
III.9	Contrôleur à hystérésis à deux niveaux et sélection des tensions correspondant	47
III.10	Contrôle du couple électromagnétique à l'aide d'un comparateur à hystérésis à trois niveaux	49
III.11	Schéma synoptique de la commande direct du couple des moteurs du tramway	51
IV.1	Transformateur monophasé	53
IV.2	Redressement triphasé simple alternance	54
IV.3	Redressement triphasé double alternance	55
IV.4	Redresseur dodécaphasé	55
IV.5	Tension de sortie du redresseur dodécaphasé	56
IV.6	Simulation du poste haute tension	56
IV.7	Les paramètres des blocs	57
IV.8	Simulation de la sous-station	57
IV.9	Les paramètres des blocs	58
IV.10	La transmission du couple entre le moteur et les roues	58
IV.11	Le modèle du réducteur	59
IV.12	Modèle du calcul du couple résistant	60
IV.13	La structure générale de DTC	61
IV.14	Modèle d'estimateur	61
IV.15	Modèle du table de commande	62
IV.16	Modèle de l'algorithme de gestion de la trajectoire de vitesse	63
IV.17	Simulation du bogie moteur	63
IV.18	Simulation du hacheur de freinage	64
IV.19	La boucle de régulation de la tension du bus continu	64
IV.20	Le filtre d'entrée	64
IV.21	Simulation d'onduleur	64
IV.22	La simulation complète du réseaux d'alimentation électrique de tramway	65
IV.23	Les résultats de la simulation de PHT	66
IV.24	Les courants d'entrée du transformateur Ddyn	66

IV.25	Les résultats de la simulation de SSR	67
IV.26	La simulation complète de la chaîne de traction	68
IV.27	Résultants de la simulation de la chaîne de traction	69
IV.28	La tensions aux bornes du bus continu et la résistance de freinage	70
IV.29	Les courants statorique du moteur	70
IV.30	La puissance utile du moteur	70
IV.31	La tension de l'alimentation du moteur V_{ab}	71
IV.32	Le module du flux statorique	71
IV.33	La trajectoire des tensions d'alimentation dans le plan référentiel (α, β) . . .	71
IV.34	La trajectoire du flux statorique dans le plan référentiel (α, β)	71

Liste des tableaux

II.1	Caractéristiques d'une rame de tramway de Ouargla(Citadis 402)	18
II.2	Caractéristiques du moteur de traction	33
III.1	Table de contrôle de flux	48
III.2	Table de commande du couple	49
III.3	Tableau de la DTC conventionnelle définissant les séquences d'un onduleur	50
IV.1	Coefficients de résistance à l'avancement pour une vitesse en m/s	60
IV.2	Paramètres du moteur asynchrone(HGA1433)	63
IV.3	Paramètres du filtre d'entrée	64
IV.4	Coefficients des forces	68

Liste des abréviations

LAC	Ligne aérienne de contact
APS	Alimentation par le sol
SSR	Sous-station de redressement
TRT	Transformateur de traction
IST	Interrupteur de secours télécommandé
CMP	Coffrets de mise en parallèle
PEF	Poste équipements force
PHT	Poste haute tension
DTC	Commande directe du couple
ASI	Alimentations sans interruption
PCC	Poste de commandes centralisées
MSA	Machine asynchrone
HTB	Haute tension de niveau B
HTA	Haute tension de niveau A
BT	Basse Tension
SIA	Sectionneur d'isolement automatique
DUR	Disjoncteur DC ultrarapide
GRF	Groupe de refroidissement
MLI	Modulation de largeur d'impulsions
CEM	Compatibilité électromagnétique
Vt	Vitesse de translation du tramway
Ff	Frottements dus au mouvement du tramway
Fc	Force due aux courbures
Fd	Force due aux déclivités
Fres	Effort de résistance à l'avancement
GRTE	Gestionnaire du réseau de transport de l'électricité
TGBT	Tableau général basse tension
IGBT	Insulated gate bipolar transistor

Introduction générale

Le tramway est redevenu aujourd'hui le mode de transport collectif urbain le plus répandu dans le monde. La politique Algérienne en matière de transport collectif dans les grandes agglomérations, adoptée depuis quelques années, a retenu ce mode de transport pour nos villes pour sortir de l'impasse des encombrements sur les routes occasionnés par des milliers de véhicules. La forte croissance démographique semble la cause principale de ce désagrément où le transport traditionnel par bus est devenu inadapté car il contribue à aggraver les conditions de circulation et ne répond pas aux exigences des voyageurs en matière de confort et de sécurité. C'est dans ce contexte que le projet du tramway de Ouargla a été élaboré dans le but de désengorger cette ville de très forte densité de population.

Le tramway de Ouargla est un réseau de tramway qui dessert la ville de Ouargla, en Algérie, et mis en service commercial le 20 mars 2018. En 2018, il comprend une ligne de 9,7 km avec 16 stations. Ouargla est la cinquième ville d'Algérie à disposer d'un tramway moderne. L'objectif de cette mémoire est d'étudier l'alimentation électrique du tramway de Ouargla.

Dans le premier chapitre, on va donner un aperçu général sur le tramway et les deux principaux types d'alimentation : alimentation par les lignes aériennes de contact et l'alimentation par le sol, ainsi que la sous-station de redressement et le matériel roulant et la chaîne de traction. Et à la fin on va présenter les améliorations possible d'un réseau d'alimentation de tramway.

Dans le deuxième chapitre, on va étudier l'alimentation électrique du tramway de Ouargla, au début le type du tramway et le type des bogies utilisé. Ensuite, on va expliquer la production d'énergie de traction à partir du poste haute tension jusque aux les sous-station de redressement et la distribution du réseau DC, à la fin on va détailler les convertisseurs et le moteur de la chaîne de traction du tramway de Ouargla .

Dans le troisième chapitre, on va exposer les principes des contrôles directs de couple comme un méthode proposer pour la commande des moteurs du tramway. Tout d'abord on va savoir la conception de l'onduleur triphasé à deux niveaux et le moteur asynchrone et leurs équations. Ensuite on va voir d'une manière détaillée le principe de contrôle du couple électromagnétique et du flux statorique. Et à la fin on va présenter le système de gestion de la trajectoire de vitesse et la structure générale de la commande direct du couple des moteurs de tramway.

Dans le quatrième chapitre, on va réaliser un modélisation et simulation du réseaux d'alimentation électrique et de la chaîne de traction du tramway de Ouargla sous le logiciel MATLAB-SIMULINK, et on va donner une interprétation des résultats.

Enfin, on va terminer ce mémoire par une conclusion générale qui résume tout le travail réalisé dans ce projet et les améliorations qui peuvent être envisagées.

Chapitre I

Les réseaux électriques des tramways

I.1 Introduction

Les transports en commun sont une solution pour limiter la consommation énergétique et les dépenses liées au transport. C'est tout particulièrement le cas du tramway qui est devenu un moyen de transport que plusieurs villes adoptent de nos jours. C'est un moyen de transport écologique qui offre une alternative intéressante notamment pour désengorger les centres villes[1].

Dans ce premier chapitre on va présenter les structures ,les composants et les équipements principaux de l'alimentation électrique de tramway.

I.2 Historique

Les premiers tramways se sont montrés aux USA durant le début du 19ème 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.

En Algérie, le premier tramway d'Alger a été mis en service en 2011, le tramway de Constantine en 2013 , le tramway de Oran en 2013,le tramway de Sidi Bel Abbés en 2017,le tramway de 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]

I.3 Le structure du réseaux d'alimentation de tramway

Cette section présente différents moyens de distribution de l'énergie électrique pour les applications du transport électrique urbain tramway. Notamment, les variantes aux Lignes Aériennes de Contact (LAC) rendues viables grâce aux avancées technologiques ainsi que les différentes méthodes d'alimentation par le sol. (APS)

Les niveaux de tension des transports électriques ferroviaires sont fixés grâce à la norme EN 50163 (Annexe C 1).Généralement et majoritairement des tramways sont alimentés par une tension de 750 V DC (Etas unis, Europe, Asie, Afrique). Comme il y'a des tramways alimentés par 1500 V DC (Kyoto, Monterrey et Bursa), et d'autre alimentés par 600 V DC (en Allemagne, Suisse, Russie et dans les pays de l'Est).[3]

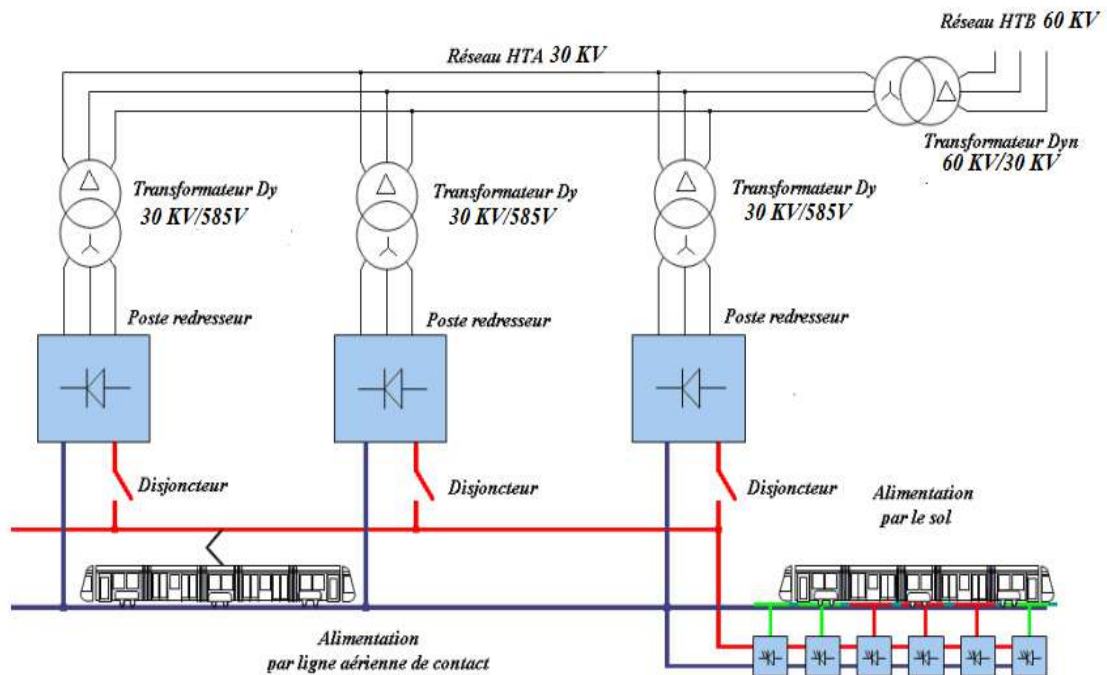


FIGURE I.1 – Illustration d'un réseau de tramway[2]

I.3.1 Ligne aérienne de contact

L'alimentation par ligne aérienne de contact est le mode universel à cause de sa simplicité, sa fiabilité, sa facilité et son coût de mise en œuvre réduit. La ligne aérienne simple, à ne pas confondre avec la caténaire, est constituée d'un fil en cuivre électrolytique. Sa section, de 102 à 150 mm² suivant la valeur des courants prévus dans les conditions les plus défavorables, a une section ronde ou ovale et comporte, dans sa partie supérieure, un talon, formé à la tréfilerie, permettant au fil d'être pris dans une pince de suspension. Celle-ci est fixée à un câble transversal, en acier galvanisé, en parafil ou en kevlar (matériaux synthétiques légers et résistants), perpendiculaire à la ligne aérienne et ancré, de part et d'autre de la voie, à des crochets apposés sur les façades des immeubles ou sur des poteaux pouvant servir à l'éclairage.[3][4]

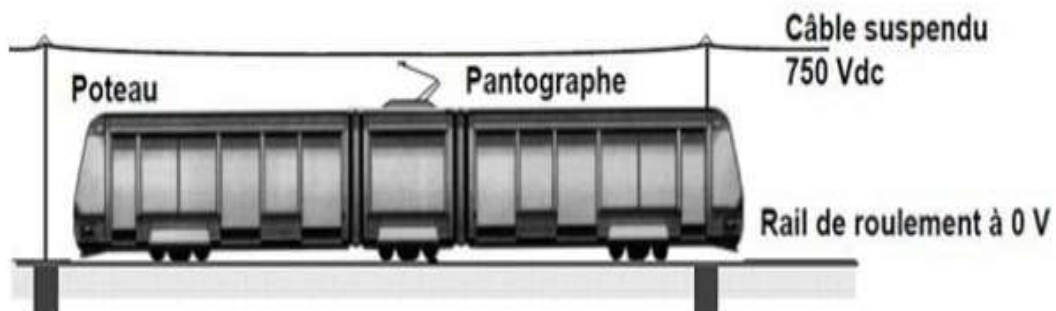


FIGURE I.2 – Principe de la ligne aérienne de contact (LAC)[1]

Grâce à un appareil de prise de courant (pantographe, perche), les engins de traction captent la tension entre, d'un côté, un ou deux fils de contact suspendus et, de l'autre côté, les rails[5].

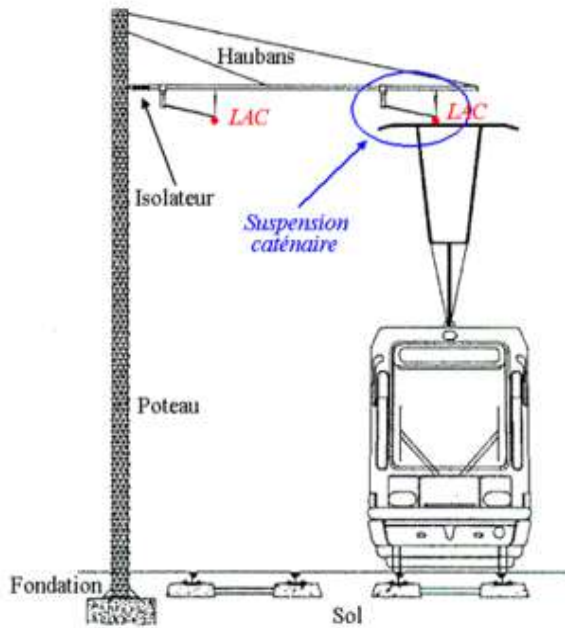


FIGURE I.3 – Support latéral d’une ligne aérienne de contact[3]

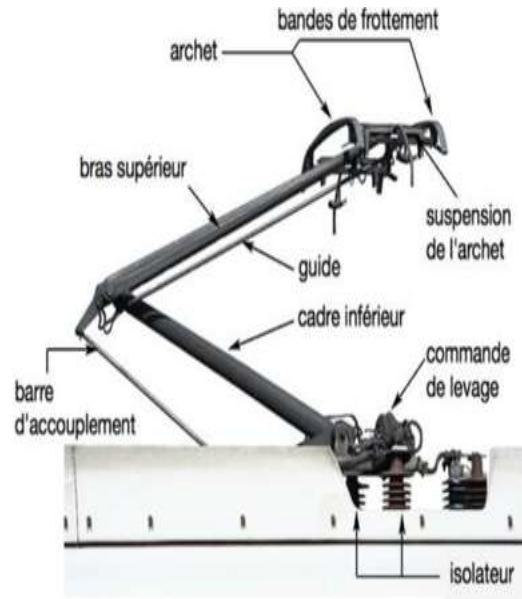


FIGURE I.4 – Pantographe[5]

I.3.2 Alimentation par le sol

Le principe de l'alimentation par le sol (APS) consiste à poser dans l'axe de la voie une suite de sections de profilés, de longueur limitée à 11 m, isolés électriquement entre eux et par rapport au sol. Chaque section comprend, sur sa partie supérieure, un profilé conducteur de 8 m alternant avec un profilé de 3 m de long en matériau isolant chaque profilé conducteur est relié, en dérivation, à un feeder 750 V et à un coffret de commande, en castré dans la chaussée, comprenant une électronique de contrôle et de commande ainsi que des contacteurs permettant de mettre sous tension le profilé se trouvant sous le tram et hors tension, avec mise à la terre, les profilés extérieurs au tram. Chaque coffret, disposé à 22 m du précédent et du suivant, contrôle et commande la mise sous tension ou hors tension de 2 coffrets. Des boîtiers d'isolement font la jonction mécanique et électrique entre chaque profilé. Chaque rame est équipée de 2 frotteurs de prise de courant, munis de semelles en carbone et montés sur un bogie central, qui captent le courant depuis le profilé de surface lorsque celui-ci est sous tension.

Lorsqu'aucune rame n'est en circulation dans le secteur, la suite de profilés centraux est entièrement hors tension et mise à la terre. La transition d'un secteur de ligne équipé de ligne aérienne à un secteur pourvu de l'APS se situe généralement au niveau d'une station. Lorsque la rame est en mouvement, une antenne, disposée à proximité des frotteurs, envoie au prochain coffret un signal radio qui commande la fermeture des contacteurs de telle manière que, lorsque les frotteurs arrivent sur le profilé suivant ils trouvent ce dernier sous tension tandis que le fait, pour le frotteur arrière, de quitter un secteur sous tension met ce dernier, automatiquement hors tension et à la terre. L'alimentation par le sol est, dans sa configuration actuelle, une technologie compliquée et très coûteuse en investissement et en maintenance [4].

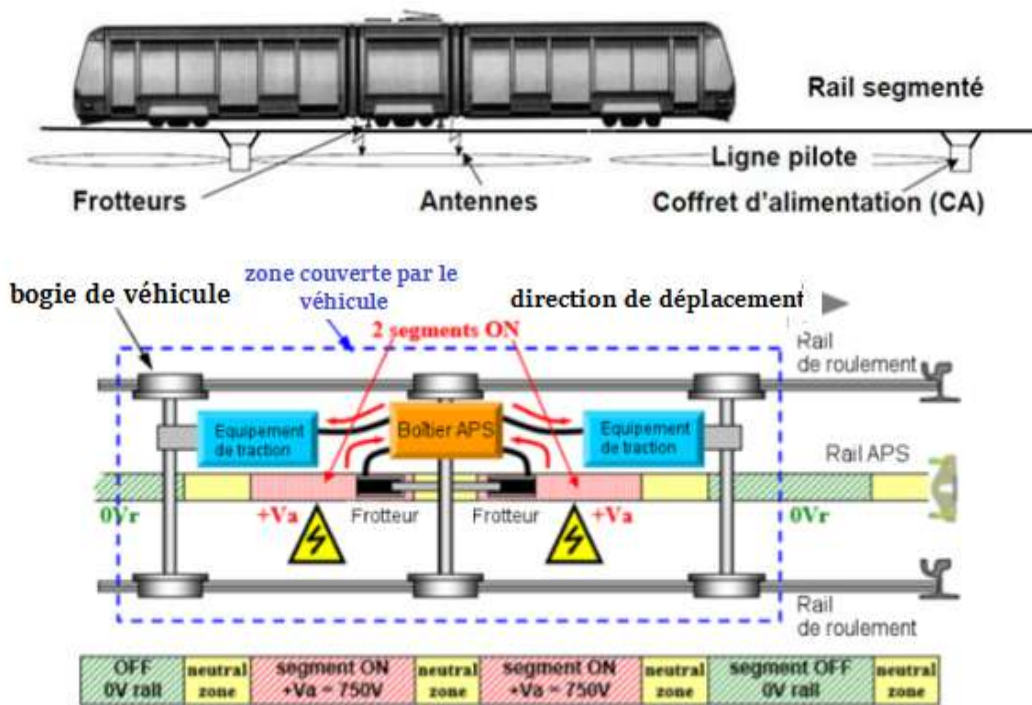


FIGURE I.5 – Principe d'alimentation par sol l'APS[1]

Le tramway de Bordeaux est alimenté de deux manières, une alimentation classique avec des lignes aériennes de contact (LAC), et une alimentation par le sol(APS).



FIGURE I.6 – Tramway de Bordeaux : changement d'alimentation LAC/APS [6]

I.4 La sous-station de redressement

Une sous-station de redressement ou de traction est la liaison entre le réseau HTA local (30 kV) et le réseau continu à 750 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.[5]

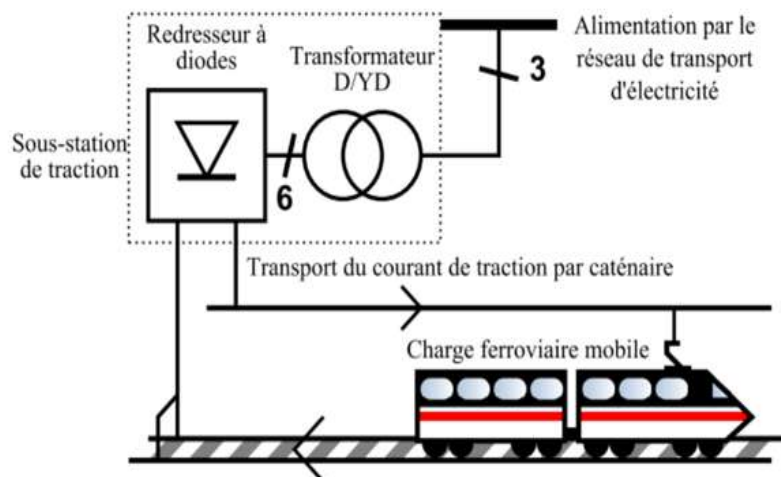


FIGURE I.7 – Le rôle de la sous-station de redressement[5]

Les sous-stations sont réparties le long des lignes en fonction des exigences de l'exploitant. Ces exigences sont dictées par les performances souhaitées pour la gestion de son exploitation (adéquation entre les grilles horaires et les puissances à installer), mais aussi par les contraintes d'implantation dans la ville.

En effet, les emplacements susceptibles d'accueillir les sous-stations dans une ville sont assez restreints. La distance entre les sous-stations se révèle être un facteur à mettre en adéquation avec la structure utilisée pour le transport et la distribution du courant continu. Les tensions de lignes minimales acceptables en fonctionnement normal et dégradé (disjonction d'une sous-station par exemple) sont primordiales. En exploitation normale, par exemple, la tension minimale généralement acceptable sur une ligne de tramway est de 500 V DC. La puissance d'une sous-station mon groupe redresseur est généralement de 900 kW, débitant ainsi 1200 A sous 750 V. Le calcul des chutes de tension en ligne en fonction des caractéristiques de la ligne et du trafic assuré permet de déterminer les intervalles entre sous-stations pour respecter les minima de tension acceptés par le moteur électrique.

Il existe une redondance entre les sources d'alimentation, ce qui permet, pour des opérations de maintenance, d'isoler une sous-station sans que le programme d'exploitation n'en souffre. La gestion des sous-stations est assurée par un automate programmable qui transmet les données à un poste de commandes centralisées (PCC). [3] Une sous-station de traction est constituée principalement des éléments suivants :

I.4.1 Tableau haute tension

Il est constitué de [4] :

- Une cellule arrivée HT.
- Une cellule de comptage.
- Une cellule de protection du transformateur de puissance
- Une cellule de protection interrupteur fusible d'alimentation du transformateur HTA/BT auxiliaire (ITRA)

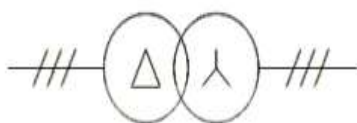
I.4.2 Les transformateurs

Une sous-station de traction peut être équipée des transformateurs suivants :

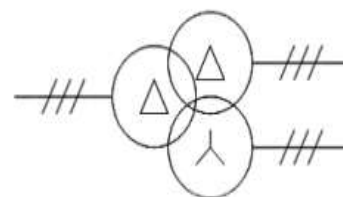
I.4.2.1 Transformateur de traction

Un transformateur principal de traction soit transformateur triphasés traditionnel Dyn, ou transformateur équipés de deux secondaires triphasés Ddyn[3]

- Les tensions d’entrées sont : 10 ou 30 kV
- La tension de sortie sont : 585 V



(a) Dyn



(b) Ddyn

FIGURE I.8 – Les types des transformateurs de traction[2]

I.4.2.2 Transformateur de services auxiliaires

Un transformateur à huile, il est équipé d’un enroulement primaire couplé en triangle et d’un enroulement secondaire couplé en étoile avec le neutre à la terre. il sert à alimenter les services auxiliaires[5] :

- Les tensions d’entrées sont : 10 ou 30 kV
- La tension de sortie sont : 410 V+N

I.4.3 L’ensemble redresseur SIA

La majorité des sous-stations utilisent à l’heure actuelle un simple redresseur à diodes pour assurer la conversion en courant continu. Ces redresseurs sont source d’une pollution harmonique assez élevée et basse fréquence. Une solution pour réduire cette pollution, et l’ondulation résiduelle sur le réseau DC, est d’utiliser un redresseur dodécaphasé. Un transformateur à deux enroulements de sortie étoile/triangle va ainsi créer deux systèmes de tensions triphasés décalés de $\pi/3$. Un redresseur est alors placé à la sortie de chaque enroulement[7].

Généralement d’une puissance de 900KW. Il sert à alimenter les tramways avec une tension continue généralement de 750 V[3]. Le sectionneur d’isolement automatique (SIA) a pour fonction d’isoler le groupe transformateur /redresseur de la distribution du courant de traction[5]

I.4.4 Le disjoncteur DC ultrarapide :

Un disjoncteur DC ultrarapide (durée d’ouverture inférieure à 20 ms) se positionne en sortie du groupe redresseur[3].

I.4.5 Le tableau général basse tension

Les TGBT des sous-stations sont alimentés par les transformateurs auxiliaires, ils assurent la distribution et l'alimentation des équipements de la sous-station : équipements système, des stations, des locaux en ligne (signalisation ferroviaire et d'exploitation)[5]

I.4.6 L'alimentation sans interruption (ASI)

En cas de panne dans le réseau d'alimentation. Il faut assurer l'alimentation des capteurs et les services auxiliaires (l'éclairage...) et le système de commande des Appareils motorisé (disjoncteurs SIA). En temps normal, les batteries est maintenue en charge, mais l'énergie est produite par le réseau via le redresseur et l'onduleur, dans le cas de panne l'énergie est produit par les batteries via l'onduleur.

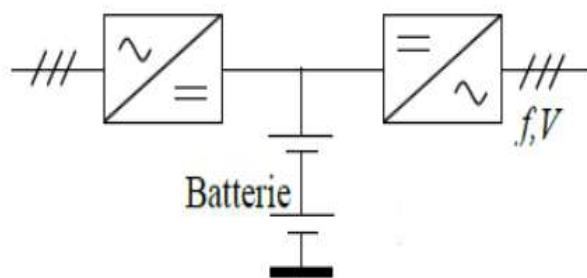


FIGURE I.9 – Schéma d'une alimentation sans interruption[2]

I.4.7 Les pertes en ligne

Nous avons vu qu'un réseau à courant continu présente des pertes en ligne plus importantes. La cause principale provient du transport en basse tension. Ce problème existe sur les grandes lignes, mais il est encore plus marqué sur les réseaux de tramways où la tension nominale est de 750V. Fort heureusement, les réseaux de tramways sont moins étendus, ce qui limite les pertes. Pour réduire ces pertes, plusieurs solutions peuvent être envisagées en gardant la structure classique. Augmenter la tension d'alimentation permet ainsi de réduire efficacement les pertes. Cependant cette tension doit rester dans une plage de tension bien définie et normalisée pour des raisons de sécurité. De plus cette solution n'est efficace que durant les phases de traction.

Une deuxième piste d'amélioration consiste à diminuer la résistance de la LAC. Deux solutions sont possibles pour y parvenir : diminuer la résistance linéique de la LAC ou réduire l'espacement entre les sous-stations. Pour diminuer la résistance linéique, il suffit d'augmenter la section de la LAC. Cela peut se faire directement en ajoutant une deuxième ligne en parallèle. Une autre solution consiste à connecter à intervalles réguliers les LAC des deux voies d'une ligne de tramway.[7]

I.5 Le matériel roulant

Le matériel roulant ferroviaire est l'ensemble des véhicules moteurs ou remorqués, élaborés pour se déplacer sur une voie ferrée et qui évolue toujours avec le temps. Afin de répondre aux attentes des usagers et des exploitants des réseaux de tramway.[3]

I.5.1 La motorisation des tramways

Comme son grand frère le train, le tramway a connu une évolution semblable de la motorisation. Jusqu'au début des années 1990, le moteur de traction a été la machine à courant continu tétrapolaire avec excitation série. Encore une fois, la machine à courant continu souffrait de son collecteur fragile et de sa densité de puissance faible. C'est ce moteur qui équipa les premiers tramways dits TSF (Tramway Français Standard).

Depuis l'avènement de l'onduleur à IGBT, la motorisation à machine à courant alternatif s'est massivement imposée sur le tramway[7].

I.5.2 Les bogies

L'élément principal de l'ensemble du matériel roulant est le bogie qui est un chariot situé sous un véhicule ferroviaire sur lequel sont fixés les essieux (les roues). Il est mobile par rapport au châssis du véhicule (locomotive par exemple) et destiné à s'orienter convenablement dans les courbes. Outre son rôle de liaison entre les essieux et la caisse, le bogie assure les rôles de freinage, d'interface entre la signalisation sur voie et la caisse, de suspension de l'ensemble du tramway. On distingue donc deux grandes familles de bogies[2]

I.5.2.1 Les bogies moteurs

Il est utilisé dans le cas d'une traction directe ou indirecte et aussi pour le freinage. Les tramways Citadis™ actuels sont équipés de bogie moteur Arpège avec un moteur asynchrone refroidi par eau, cela permet de disposer d'un moteur plus compact à puissance équivalente qu'un moteur refroidi par air. En revanche, une boucle à eau spécifique doit être mise en œuvre, elle se nomme « GRF » (groupe de refroidissement) et se situe en toiture. En toiture, nous retrouvons aussi les modules de puissance qui sont quant à eux refroidis par une circulation d'air forcée[8].

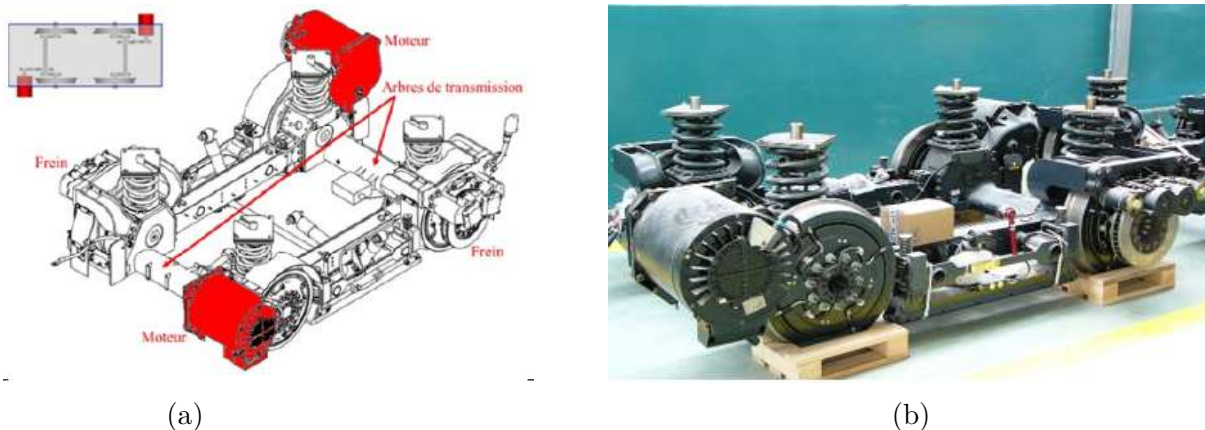


FIGURE I.10 – Bogie moteur Arpège équipant les tramways Citadis™[8]

Plus récemment, un nouveau bogie a été conçu (2008), il s'agit du bogie moteur Ixège équipé de moteurs synchrones à aimants permanents refroidi par air, en circuit fermé. Ce moteur présente l'avantage de garder un volume similaire à celui refroidi par eau à puissance équivalente et évite l'ajout d'un GRF[8].



FIGURE I.11 – Bogie moteur Ixège pour les tramways Citadis™ [9]

I.5.2.2 Les bogies porteurs

Le bogie porteur est généralement utilisé pour le freinage et assure la répartition des charges et le guidage.

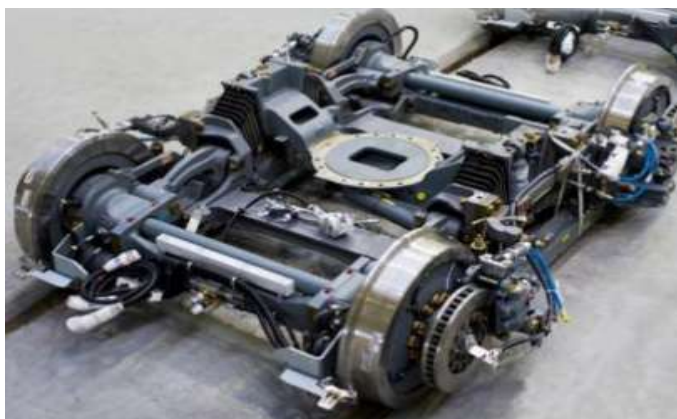


FIGURE I.12 – Bogie porteur [10]

I.5.3 Les types de freinage :

Les rames de tramway sont équipées de différents systèmes de freinage :

I.5.3.1 Les freins électrodynamiques

Le freinage de tramway est essentiellement assurée par les freins électrodynamiques qui agissent sur les essieux moteurs (chaque essieu contient deux roues).

Il est également du type à récupération d'énergie en fonction de la capacité récupératrice de la ligne d'alimentation HT. Cependant lorsque la ligne HT n'est pas récupératrice il y a mise en application de freins rhéostatiques. ONIX gère automatiquement la répartition entre les deux[11].

I.5.3.2 Les freins mécaniques (freins à friction)

Les freins mécaniques sont aussi appelés freins à friction. Ils équipent tous les essieux des bogies moteurs et les roues des bogies porteurs. Ces freins sont mis en œuvre à l'aide d'un dispositif hydraulique agissant sur un ensemble étriers du disque de freins[11].

I.5.3.3 Les freins électromagnétiques

Ce type de freins est réalisé par l'intermédiaire de six patins magnétiques par élément de rame. Une paire de patin magnétique est montée sur chaque bogie ils se plaquent sur les rails lorsqu'ils sont alimentés afin de faire ralentir ou arrêter le véhicule suivant les cas d'utilisation. Chaque patin magnétique est suspendu au longeron de châssis-pont du bogie.[11]

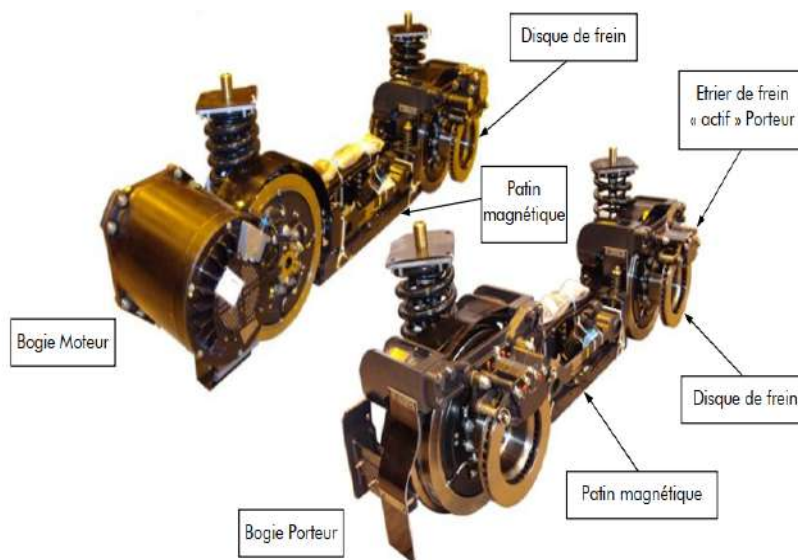


FIGURE I.13 – Les Outils de freinages[12]

IL y a d'autres types de freinages :

- Freinage de service.
- Freinage d'urgence.
- Freinage de secours ou de sécurité.
- Freinage d'immobilisation.
- Freinage de parking (ou de stationnement).

I.5.4 Les courants vagabonds

Dans le cadre d'un roulement fer, les rails de roulement jouent un double rôle. Le premier sert de guidage mécanique lors de l'évolution du matériel roulant. Le second assure le retour de courant aux sous-stations de traction. Pour les tramways roulant sur pneus, le retour de courant peut se faire via un contact frotteur sur un troisième rail.

Le sol représente aussi involontairement un chemin de retour. Les rails de roulement ou l'éventuel troisième rail ne sont qu'imparfaitement isolés du sol, et permettent de ce fait une circulation partielle du courant de traction dans le sol. Ces courants circulant à travers le sol sont appelés 'courants vagabonds'. Ils sont particulièrement néfastes au bon vieillissement des installations, car ils participent grandement à la corrosion des structures métalliques enterrées à proximité des voies et des sous-stations de traction.

Une meilleure isolation des rails du sol réduit les courants vagabonds, mais peut conduire à l'apparition de potentiels électriques de contact dangereux pour les personnes.

Pour assurer la protection du public et du personnel, les potentiels électriques des rails de roulement ne doivent pas dépasser les limites imposées dans la norme EN 50122-1 (Annexe C 2) (120 V). La tension rail-sol sera ainsi surveillée et des contacteurs de mise à la terre automatisés seront placés au droit des sous-stations, à proximité des stations de passagers ou à tout autre endroit identifié par les simulations électriques (détection de potentiel rail-sol élevé en fonction du point kilométrique) [3].

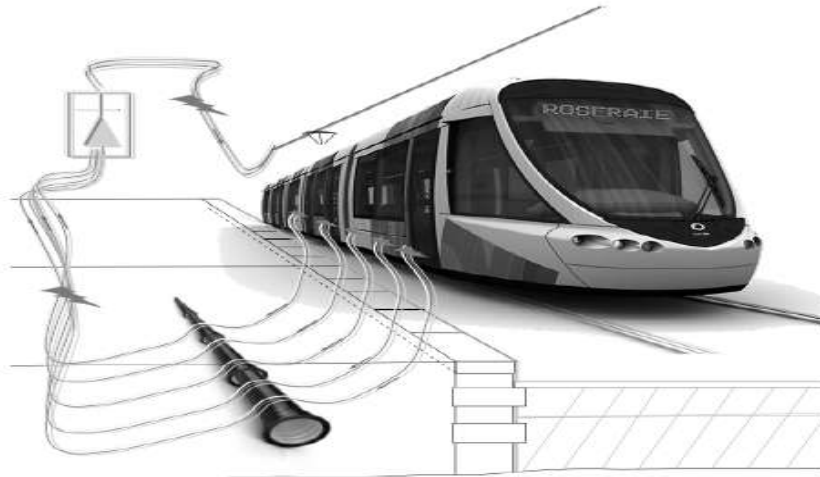


FIGURE I.14 – Principe de circulation des courants vagabonds[13]

I.6 La Chaîne de traction

Une chaîne de traction des tramways est constituée des éléments suivants :

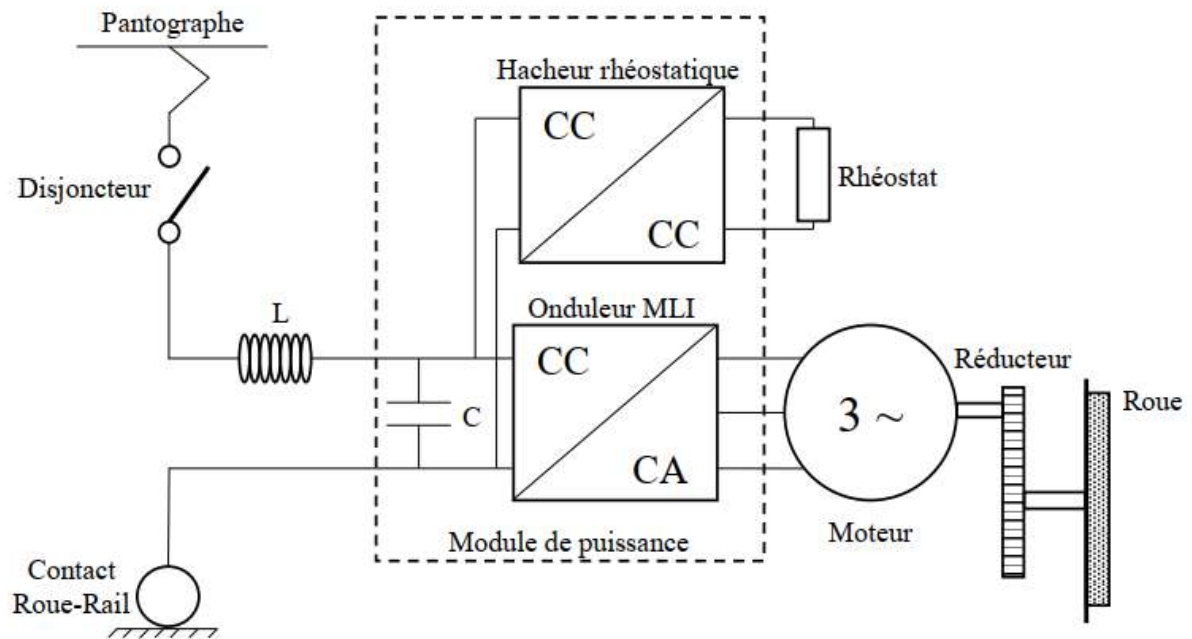


FIGURE I.15 – Schéma de principe d'une chaîne de traction de tramway [14]

I.6.1 L'appareil de protection

Le disjoncteur, qui protège l'équipement en cas de surintensité ou de court-circuit [8]. La fermeture du disjoncteur est commandée, lorsque celui ci détecte la présence de tension et peut être ouvert en cas de défaut des coffres de traction ou par la perte de la présence tension [15].

I.6.2 Le filtre d'entrée

Constitué d'une inductance de ligne et d'un condensateur de filtrage, qui permet d'assurer la stabilité du bus continu pour le bon fonctionnement de l'onduleur, de garantir une impédance minimale de l'engin vis-à-vis du réseau, de limiter le courant absorbé à la caténaire dans la bande de fréquence autorisée et ainsi de respecter les gabarits harmoniques de courants notamment pour ne pas perturber les circuits de voie[5].

I.6.3 Les convertisseurs de traction

Un ou de plusieurs convertisseurs d'énergie électrique. Dans notre cas, avec une alimentation continue, il s'agit d'un module de puissance onduleur, qui transforme la tension continue à son entrée en une tension alternative triphasée d'amplitude et de fréquence variables destinée à alimenter le moteur de traction[8].

I.6.4 Les moteurs

Un ou plusieurs moteurs de traction qui convertissent l'énergie électrique en énergie mécanique appliquées aux roues. Le moteur absorbe de l'énergie en mode traction et devient générateur électrique en mode freinage [8].

I.6.5 Les convertisseurs auxiliaires

Les convertisseurs auxiliaires sont l'ensemble des éléments électriques ne servant pas directement à la traction de l'engin. Nous pouvons séparer ces auxiliaires en deux catégories : les auxiliaires de confort et les auxiliaires de traction, Les auxiliaires de confort concernent notamment la ventilation, la climatisation et l'éclairage. Les auxiliaires de traction concernent les moto-ventilateurs (pour refroidir les convertisseurs)[8].

I.6.6 Le maintien du plan de tension

Le maintien du plan de tension est le critère de dimensionnement le plus important. Cette tension de LAC doit ainsi être comprise entre 500 V et 900 V.

I.6.6.1 Durant les phases de traction

Lors des phases de traction, le tramway consomme du courant. Ce courant est fourni par les sous-stations ou d'autres tramways en phase de freinage. Il arrive au tramway via la LAC. Cette circulation de courant va entraîner une chute de tension et les sous-stations doivent être disposées de manière à garantir le respect de la tension minimale dans le pire cas. En cas d'impossibilité, il faudra doubler la LAC [7].

I.6.6.2 Durant les phases de freinage

Lorsqu'un tramway freine, il utilise majoritairement le freinage par récupération. Les moteurs vont alors fonctionner en alternateur et renvoyer de l'énergie sur le réseau. La résistance de la LAC va alors entraîner une élévation de sa tension ; La tension maximale en régime permanent est fixée à 900 V. Pour ne pas dépasser cette tension, les tramways sont équipés en toiture d'un rhéostat de freinage. Ce rhéostat est connecté au bus continu par l'intermédiaire d'un hacheur. Si la tension du bus dépasse 900 V, le rhéostat de freinage se déclenche et dévie une partie du courant de freinage. La tension du bus se régule alors autour de 900 V. Lors du déclenchement du rhéostat de freinage, l'énergie est perdue[7].

I.6.7 Échanges entre les tramways

Lorsqu'un tramway freine, l'énergie est renvoyée sur le réseau. Cette énergie peut alors être consommée par d'autres véhicules situés à proximité et en phase de traction. Grâce à cet échange, l'efficacité du réseau de tramways augmente significativement. Il faut cependant que les tramways soient suffisamment proches. En effet, dans le cas contraire, la tension du bus de tramway en phase de freinage peut dépasser la tension de déclenchement du rhéostat de freinage et l'énergie est dissipée par effet Joule. Pour favoriser les échanges entre véhicules sans dépendre du carrousel de véhicules, il faut donc diminuer la résistance et la tension de la LAC. Une diminution de la tension est favorable durant le freinage, mais se révèle préjudiciable lors des phases d'accélération[7].

I.7 Limitations et améliorations possibles d'un réseau classique de tramways

I.7.1 Architecture électrique classique d'un réseau de tramways

Le schéma simplifié d'une architecture de tramways est tracé sur figure (I.16) .

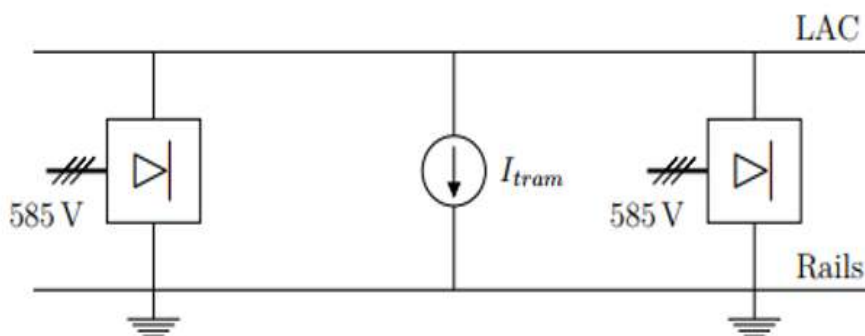


FIGURE I.16 – Alimentation classique d'un réseau de tramways.[7]

Sur ce schéma sont représentées deux sous-stations à diodes alimentées par le réseau alternatif. Ces sous-stations vont alimenter la LAC sous 750V. Le tramway est représenté par une source de courant (I_{tram}). Un réseau complet comprend évidemment plus de sous-stations. La LAC est découpée en tronçons isolés les uns des autres. Des sectionneurs permettent de relier ces différentes parties lorsque le réseau est sain, et autorisent une marche dégradée lors de l'apparition d'un défaut. Ce schéma unifilaire ne fait apparaître les filtres et autres dispositifs de protection[7].

I.7.2 Nouvelles architectures d'alimentation(Transformateur centralisé)

Cette solution propose,comme la précédente,de limiter le nombre de points de raccordement. Encore une fois, un feeder court le long de la ligne, la distribution se fait en basse tension alternatif. La figure (I.17) illustre cette stratégie :

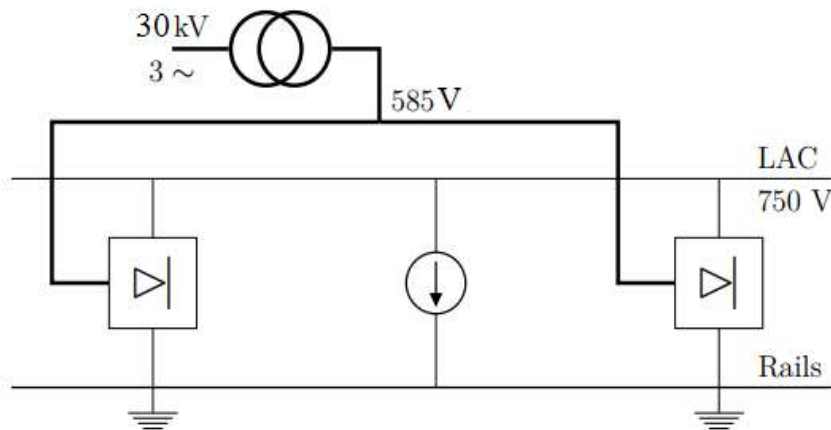


FIGURE I.17 – Nouvelles architectures d'alimentations.[7]

Ce feeder sous 585 Vac permet de supprimer le volumineux transformateur des sous-stations. En plus de limiter le nombre de points de raccordement, ces nouvelles sous-stations allégées peuvent trouver plus facilement leur place en centre-ville. Cette solution possède plusieurs inconvénients. Tout d'abord, la distribution se faisant en basse tension, les pertes dans le réseau alternatif seront plus élevées que dans le cas précédent[7].

I.7.3 La réversibilité des sous-stations

L'échange énergétique entre véhicules permet des gains énergétiques importants. Cependant, lorsqu'il y a plus de puissance produite que de puissance consommée, on peut alors s'interroger sur la possibilité de réinjecter la puissance sur le réseau de distribution.

Cependant, il ne faut pas perdre de vue que les sous-stations classiques sont construites sur la base d'un pont de diodes non réversible. Le courant ne peut donc pas être renvoyé sur le réseau entraînant un déclenchement des rhéostats. Lorsque la puissance fournie diminue, les sous-stations se débloquent, et reprennent leur rôle normal. Une sous-station réversible consiste à récupérer l'énergie de freinage de tramway via le pantographe et la renvoyer au réseau HTA.

Les caractéristiques de cette énergie doivent être compatibles avec celles du réseau, d'où la nécessité de l'ajout d'un onduleur et d'un transformateur.[5]

La sous-station fonctionne en deux modes :

- Mode de traction : le redresseur alimente la LAC.
- Mode de récupération : l'onduleur envoie l'énergie récupérée au réseau HTA.

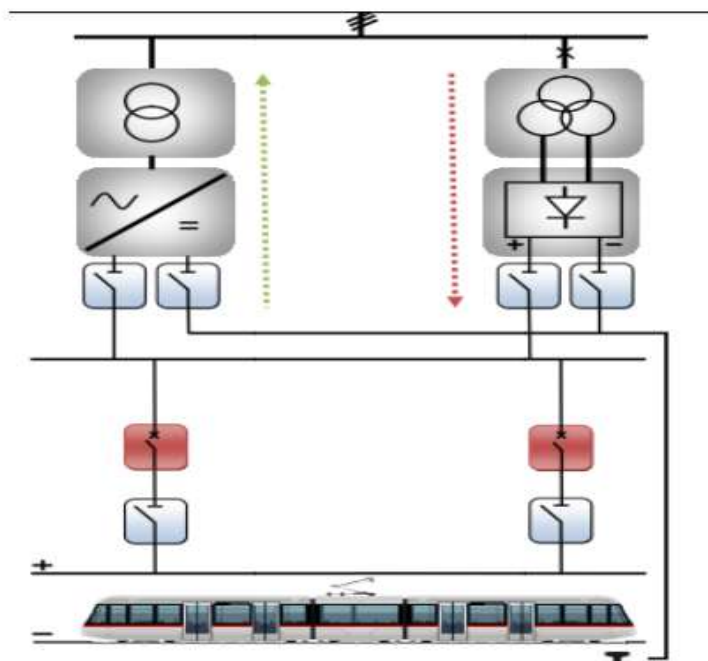


FIGURE I.18 – Une sous-station réversible [5]

I.8 Conclusion

Nous avons parlé dans ce chapitre de la structure du réseau d'alimentation de tramway globalement, on a conclu que l'alimentation par les lignes aériennes de contact sont le plus utilisé par rapport à l'alimentation par le sol. Aussi que l'utilisation des moteurs synchrones serait une bonne alternative aux moteurs asynchrone pour les nouvelles générations.. Enfin, nous avons vu l'amélioration de la sous-station de redressement et leurs réversibilités pour récupérer l'énergie pendant le freinage et la renvoyer au réseau au lieu de la perdre sous forme de chaleur.

Chapitre II

L'alimentation électrique du tramway de Ouargla

II.1 Introduction

Mise en service le 20 Mars 2018, le tramway de Ouargla est le tout premier tramway du désert, conçu pour résister aux conditions climatiques extrêmes liées à la proximité du désert. La ligne de tramway de Ouargla relie les terminus Sid Rouhou et Chenine Kadour en passant par la nouvelle ville ainsi que la nouvelle gare routière, faisant du tramway une ligne centrale du transport au sein de la ville [16].

Dans ce chapitre on va présenté les systèmes, conception et les équipements d'alimentation électrique de la ligne du tramway de Ouargla.

II.2 La ligne du tramway de Ouargla

La longueur de la ligne fait 9,6Km avec 16 stations, un parc relais et deux agences commerciales[16].

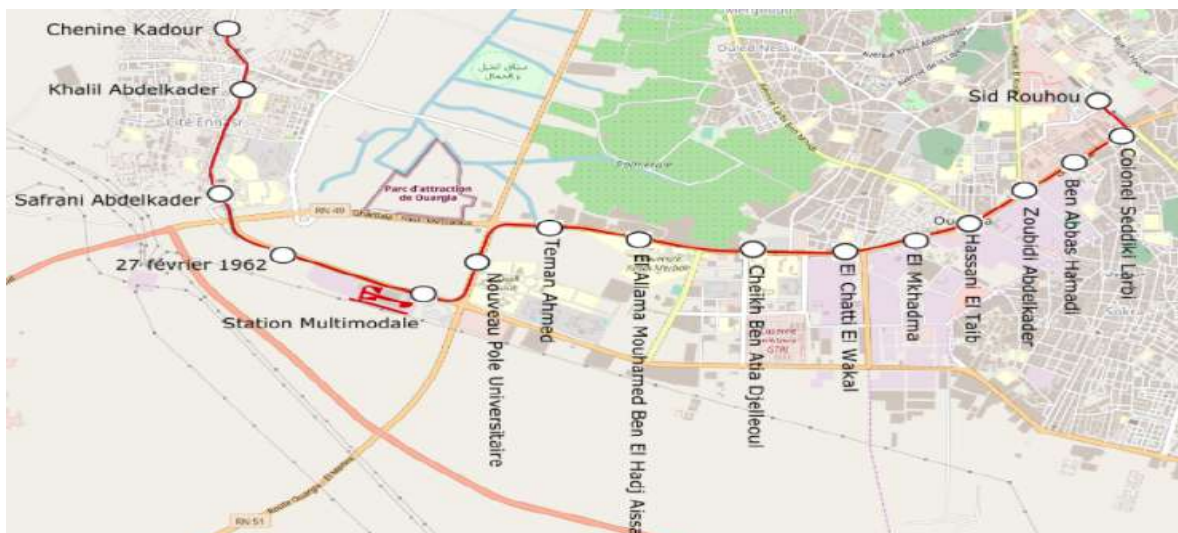


FIGURE II.1 – La ligne de tramway de Ouargla.[17]

Le tramway de Ouargla est desservi par une flotte de 23 rames type Citadis 402. Chaque tramway fonctionne à une vitesse moyenne de 20,6 km / h et parcourt la distance entre l'origine et la destination en 34 minutes[1].

II.3 Matériel roulant du tramway de Ouargla

Les caisses sont en aluminium boulonnées sur un châssis. Les parties des châssis à proximité des bogies, du fait des contraintes qui s'y exercent, sont en acier. La construction est modulaire et standardisée. Les caisses sont l'assemblage par boulonnage de plusieurs éléments montés indépendamment à plat (sol, parois, toiture...). Les deux nez de chacune des rames, rapportés avec les cabines de conduite sur la structure du module par boulonnage, sont habillés par des carrosseries polyester armé de fibres de verre. Cet habillage masque les boucliers d'absorption de choc. Les cabines de conduite sont équipées de pare-brises panoramiques légèrement bombé qui intègrent en partie haute une girouette à diodes électroluminescentes et de vitres latérales. Juste derrière les postes de conduite, en hauteur, est disposée dans un renflement de la carrosserie, de chaque côté de la rame, une caméra permettant d'en visualiser les flancs en direction de la nacelle porteuse[18].



FIGURE II.2 – Tramway de Ouargla.[16]

Longueur hors-tout	43 760 mm
Largeur de caisse	2 400 mm
Hauteur maxi au dessus du rail	3 321 mm
Hauteur du plancher au dessus du rail	350 mm
Distance entre pivots des bogies	11 142 mm
Empattement des bogies	1 600 mm
Masse à vide en ordre de marche	54,92 t
Masse en charge normale	75,92 t
Nombre de bogies moteurs	3
Nombre de bogies porteurs	1
Nombre de places assises	71
Charge normale	287 passagers
Charge maximale	395 passagers
Vitesse maximale	70 km/h
Puissance maximale à la jante (traction)	880 kW
Tension d'alimentation	750 V Courant Continu
Rayon de courbure minimal	25 m

TABLE II.1 – Caractéristiques d'une rame de tramway de Ouargla(Citadis 402).[18]

Les rames sont composées de 7 modules articulés reposants sur 4 bogies dont 3 moteurs. Les bogies moteurs sont situés sous les caisses d'extrémité, dites motrices 1 et 2 (M1 et M2), et une caisse intermédiaire dite nacelle motrice (NM). Le bogie porteur est implanté sous une des caisses centrales dite nacelle porteuse (NP). Enfin, entre chaque motrice et nacelles (motrice et porteuse) s'intercalent des caisses suspendues. C1 du côté M1, caisse centrale (CC) entre NM et NP, et C2 du côté M2. La dissociation d'une rame n'est possible qu'en atelier, pour des opérations d'entretien très exceptionnelles (réparation lourde suite à un accident grave, par exemple). Les rames sont équipées à leurs deux extrémités de systèmes permettant d'installer une barre de remorquage. Ces systèmes ne sont utilisés que pour des secours ou des déplacements en atelier, assurés par un engin rail-route ou une autre rame[19].

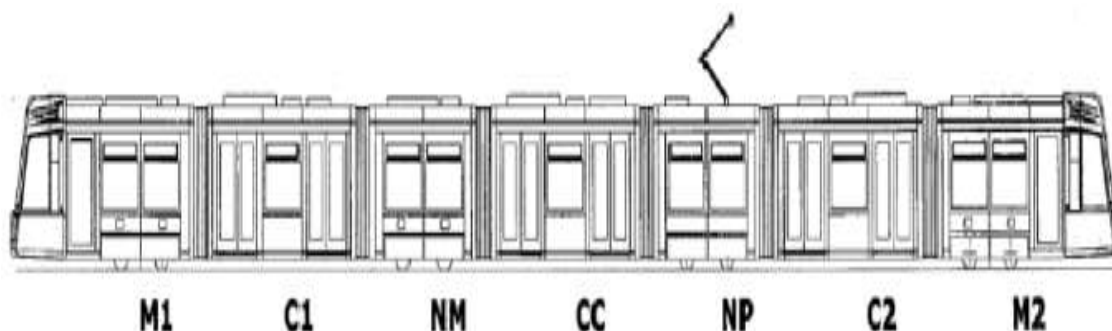


FIGURE II.3 – Schéma de tramway de Ouargla .[19]

Les tramways captent l'énergie électrique 750 Vcc produite en SSR et nécessaire à leur fonctionnement par un ou plusieurs pantographes en contact avec la LAC. Le retour du courant de traction se fait par les rails de roulement.

La conception du réseau d'alimentation tient compte des objectifs suivants [20] :

- Assurer une bonne continuité de service pour limiter les perturbations d'exploitation.
- Assurer la sécurité des voyageurs et du personnel.
- Faciliter les extensions ou modifications du réseau électrique ou du réseau de tramway.
- Optimiser la qualité et le coût du système.

II.3.1 Les bogies

Les bogies sont de type Alstom Arpège de type 350M (bogies moteurs) et 350P (bogie porteur) à cadre articulé en acier mécano-soudé. Leur empattement est de 1,6 mètre. Le diamètre des roues (neuves) est de 590 millimètres. Les essieux sont calés pour circuler sur une voie à l'écartement standard. La liaison caisse-bogies est assurée par des bielles et les 4 appuis de la suspension secondaire. La suspension primaire est assurée par des roues élastiques dont le rôle est aussi de réduire les bruits de roulement. La suspension secondaire est assurée par des ressorts hélicoïdaux. L'amortissement fait appel à des amortisseurs transversaux et verticaux entre la caisse et les bogies, ainsi qu'à des barres anti-roulis[18].

II.3.1.1 Les bogies moteur

Les trois bogies moteur sont équipés chacun de 2 moteurs asynchrones triphasés à refroidissement par eau d'une masse de 335 kg et d'une puissance de 180 kW [21]. Leur vitesse de rotation maximale est de 4550 tours par minute. La transmission de l'effort de traction est assurée par des engrenages et un pont moteur formant un essieu coudé virtuel. La lutte contre les phénomènes de patinage est assurée par des sablières qui disposent de tuyaux éjecteurs face à chaque roue du côté de l'extrémité du bogie. Seuls les éjecteurs à l'avant dans le sens de la marche sont actifs[18].



FIGURE II.4 – Bogies moteur du tramway de Ouargla.[22]

II.3.1.2 Le bogie porteur

Le bogie porteur est équipé d'un système de graisseur de rail destiné à limiter l'usure des boudins de roues dans les courbes. Il porte aussi l'antenne SAE et les capteurs de vitesse et de mesure de la charge de la rame[19].



FIGURE II.5 – Bogie porteur du tramway de Ouargla.[22]

II.3.2 Le freinage

Le freinage est assuré par plusieurs dispositifs. Tout d'abord, on trouve sur les bogies moteurs le freinage électrodynamique à récupération et rhéostatique qui assure un effort de retenue de 3 675 daN par bogie. Le freinage rhéostatique se substitue automatiquement à la récupération en cas d'absence de tension dans la caténaire. Ensuite, chaque essieu est équipé d'un disque de freinage en fonte ventilée de 400 millimètres de diamètre et de 60 millimètres d'épaisseur sur lequel viennent appuyer des plaquettes en matériaux composites. Les plaquettes sont montées sur des étriers assurant le serrage des freins par ressort. En service, le desserrage est assuré par pression grâce à un circuit hydraulique. Ce freinage par friction assure un effort de retenu maximum de 3 410 daN sur les bogies moteurs et de 4 980 daN sur le bogie porteur. Enfin, chaque bogie est équipé de 2 patins

électromagnétiques pouvant venir s'appliquer sur les rails. En freinage de service, sont sollicités, à l'aide du manipulateur traction-freinage, les systèmes électrodynamique et mécanique avec une régulation des efforts en continu en fonction de la charge par un antienrayeur.

En freinage d'urgence, déclenché, soit par le passage du cran spécial du manipulateur, soit par la rupture de la boucle d'urgence, les trois systèmes de frein sont sollicités avec un réglage des efforts en continu. Enfin, en freinage de sécurité, commandé, soit par le coup-de-poing, soit par l'ouverture de la boucle de sécurité, le courant est coupé aux moteurs de traction empêchant tout freinage électrodynamique. Dans ce cas, le freinage mécanique et les patins électromagnétiques sont sollicités à leur maximum de puissance, sans régulation. [18].

II.4 Le centre de maintenance

Implanté à la limite sud de la route d'évitement et la gare multimodal terrain d'environ 10 hectares accueille l'ensemble nécessaire à l'exploitation et la maintenance de la ligne tel que le bâtiment de remisage maintenance incluant le bloc administratif et le poste de commandes centralisées (PCC), le bâtiment de lavage., le poste haute tension (PHT).



(a) Le bâtiment de remisage



(b) Le bâtiment de lavage



(c) Rail d'essai

FIGURE II.6 – Le centre de maintenance du tramway de Ouargla.[22]

II.4.1 Le poste de commandes centralisées

Le réseau est conçu pour être géré depuis les postes de commandes et de contrôles centralisés. Les appareils stratégiques sont alors télécommandés (disjoncteurs, interrupteurs, ventilation, etc.) et télé-surveillés (alarmes de température, surtension, fusion fusible, etc.) [20]



(a) Interface



(b) Système d'acquisition



(c) Salle de commandes

FIGURE II.7 – Le poste de commandes centralisées (PCC).[22]

II.4.2 Le poste haute tension

Le poste haute tension (PHT) du projet de tramway de Ouargla, est situé dans le centre de maintenance, il est constitué de 2 arrivées, la 1ere arrivée vient du poste GRTE 60 kV Said otba , et d'une 2eme arrivée du poste GRTE 60 kV Ouargla 2 qui n'est pas encore opérationnelle. Ce poste possède des parafoudres installés sur les pylônes d'arrivées de ligne plus des transformateurs de tension capacitif pour le comptage SONELGAZ et le central de mesure, ainsi qu'un sélecteur de ligne avec mise à la terre après se trouve disjoncteur 60KV qui assure la protection des transformateurs 60 KV/ 30 KV.

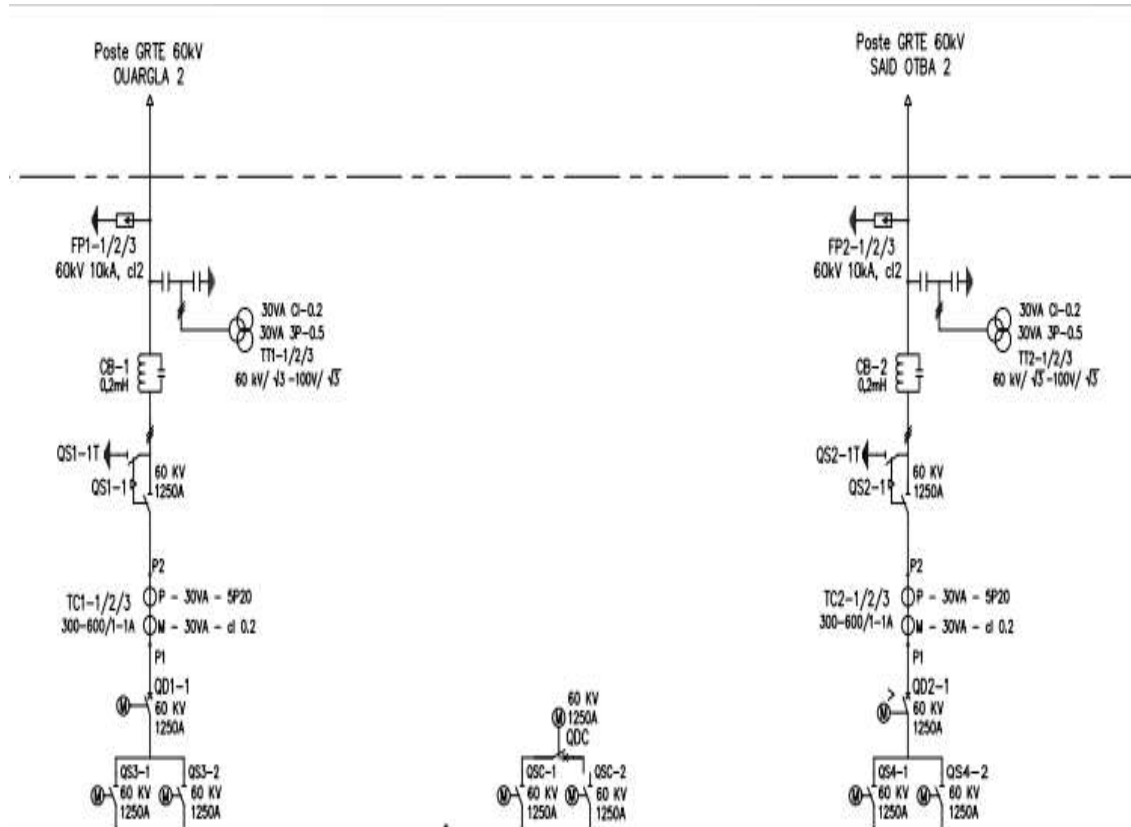


FIGURE II.8 – Les deux arrivées du poste haute tension de tramway de Ouargla.[22]



FIGURE II.9 – Le poste haute tension (PHT) de tramway de Ouargla.[22]

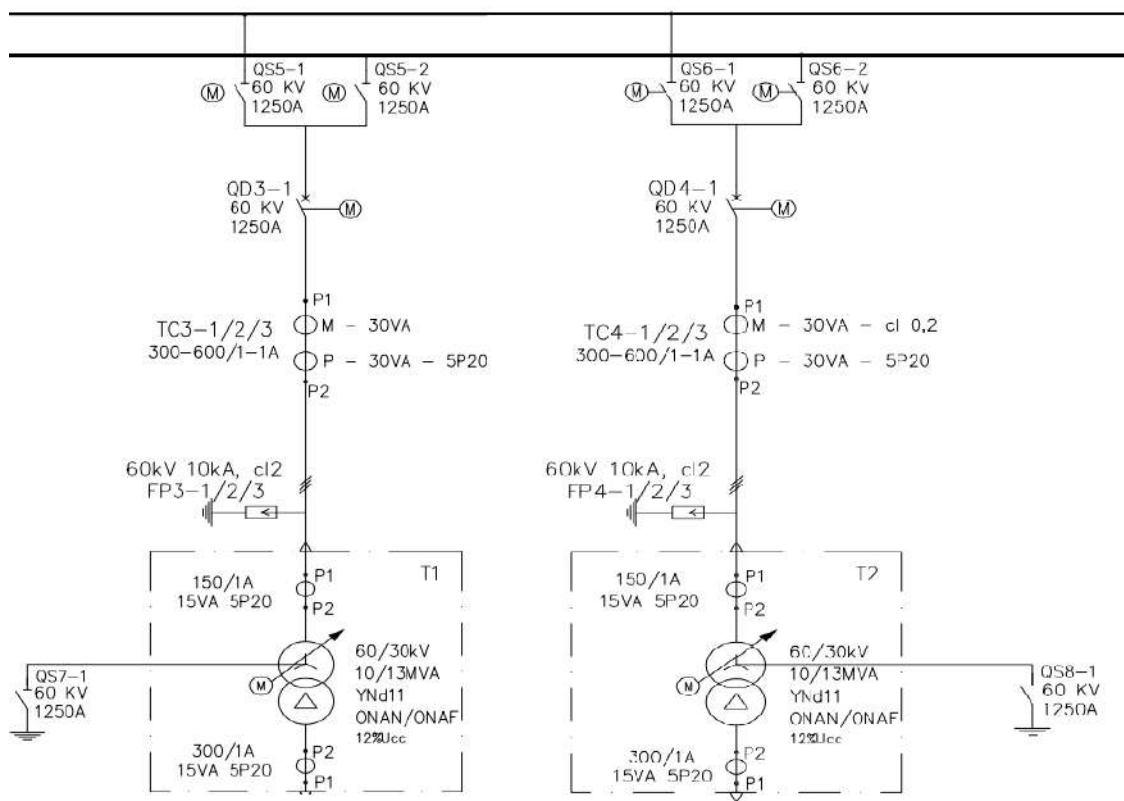


FIGURE II.10 – Schéma des deux transformateur de puissance 60 /30 KV. [22]

La Distribution en double dérivation est utilisé pour assurer une continuité de service optimale. En cas de défaut sur l'une des lignes, l'alimentation de l'abonné est permutée sur la seconde Les deux arrivées sont différentes mais peuvent être issues du même poste source[23].



FIGURE II.11 – Transformateur de puissance 60 /30 KV-13MVA. [22]

Le secondaire de transformateur(30KV) alimente un tableau haute tension,a partir de ce tableau la tension(30KV) est distribuée via un câble souterrain aux postes equipments force.

II.5 Les postes équipements force

Ces postes de transformation 30kV/400V situés dans chaque station, assurent l'alimentation des utilités, sécurités et circuits auxiliaires (éclairage, ventilation, escaliers mécaniques, épuisements, ...). Deux postes de transformation alimentent le tableau général basse tension (TGBT) de chaque poste PEF qui comporte deux jeux de barres[20], chaque deux PEF distribue un réseau 30 kV souterrain à une sous-station de redressement. .

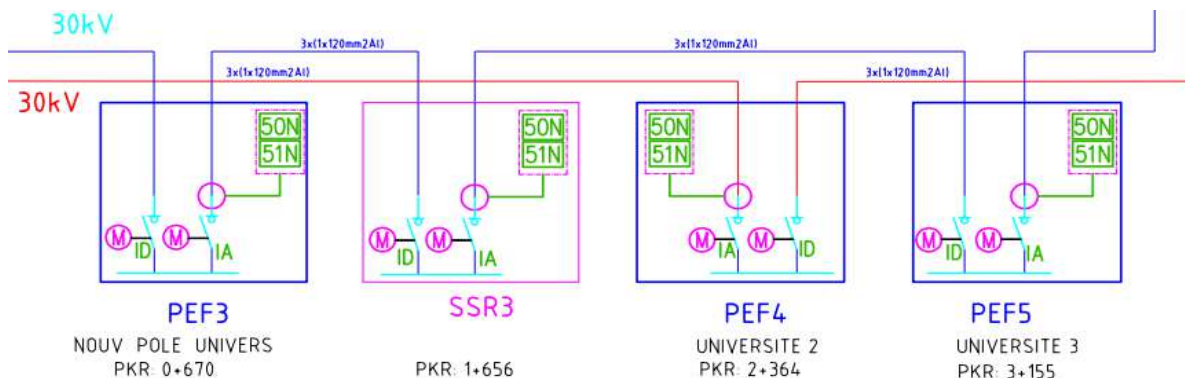


FIGURE II.12 – La distribution du réseau 30kV. [22]

II.6 La sous-station de redressement

Les SSR sont destinées essentiellement à la production de l'énergie de traction qui sera ensuite injectée dans la ligne de traction. L'alimentation des voies en énergie de traction est faite selon deux schémas possibles en « T » ou en « π » [14] [20].

- Une SSR est dite T si elle alimente une seule section électrique
- Une SSR est dite en π si elle en alimente deux section électrique.

La ligne du tramway de Ouargla comprend cinq SSR (quatre type π et un T) situé comme suit figure (II.13) :

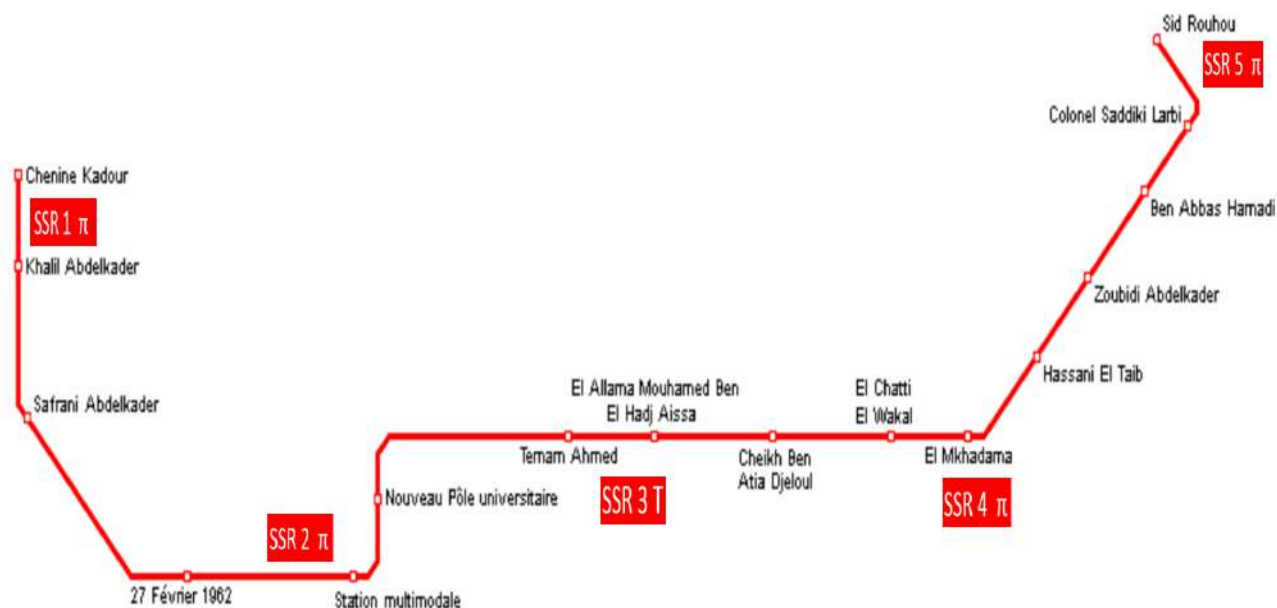


FIGURE II.13 – Localisation des sous-station de redressement. [24]

Il comporte dans chaque sous station de redressement du tramway de Ouargla les équipements suivants :

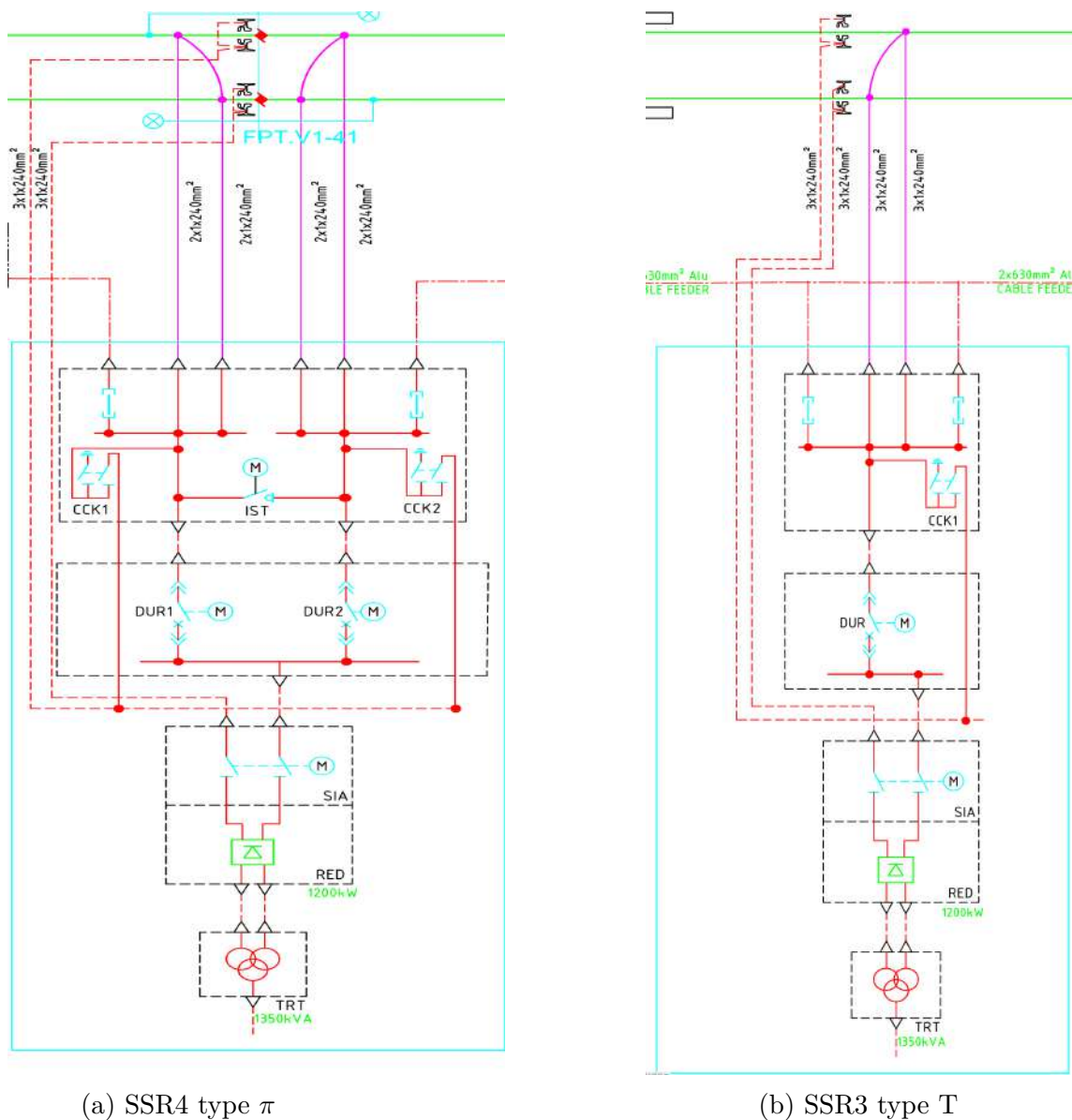


FIGURE II.14 – Schéma des deux types de sous station de redressement de la ligne de tramway de Ouargla.[22]

- Un transformateur de traction (TRT) puissance 1350 KW assurant la transformation de la tension 30 KV en 2×585 Vca.
- Un redresseur de traction de type dodecaphasé a diode (RED), assurant la transformation du 585 Vca en 750 Vcc.
- Un sélectionneur d'isolement automatique appelé SIA
- Un tableau de sortie de Groupe de Traction qui se compose de :
 - Un disjoncteur DC ultrarapide .
 - Interrupteur de Secours Télécommandé. IST
 - Court circuitneur CCK

II.7 Les lignes aériennes

Les lignes aériennes sont alimentées sous 750 V continu avec des variations admissibles comprises entre 500 V et 900 V à partir des équipements de distribution de l'énergie traction.

La ligne aérienne de contact (LAC) sera composée d'un conducteur en cuivre nu de section de 150 mm² par voie de circulation. Après quelques temps d'utilisation, les frottements du pantographe sur la LAC créent une usure de conducteur. Pour cette raison, on prend en compte une usure du câble maximaliste de 30 % [14].



FIGURE II.15 – Les lignes aériennes de tramway de Ouargla.[22]

II.7.1 Isolateurs de sections

Pour permettre l'entretien des différentes parties de la ligne aérienne, sans avoir la nécessité de la mise hors tension de l'ensemble du système, la ligne de contact est partagée en portions séparées électriquement appelées sections. Les sections correspondent souvent aux longueurs de tension maximales décrites ci-dessus. Le passage d'une section à l'autre est un point de sectionnement et il est conçu d'une manière que le pantographe de soit en contact continu avec le fil.



FIGURE II.16 – Isolateurs de sections. [22]

Ceci est réalisé en faisant passer deux fils de contact l'un au-dessus de l'autre sur une longueur d'environ quatre portées, le nouveau conducteur se baisse et l'ancien se lève jusqu'à ce que le pantographe passe en douceur de l'un à l'autre. Les deux fils ne se touchent jamais[14].

II.7.2 Coffrets de mise en parallèle

Ce type de coffret limite la chute de tension et assure une efficacité maximale pendant les fortes demandes de puissance soit par une ou plusieurs rames à la fois. Pour ce faire, Il crée un point d'alimentation intermédiaire au milieu de la section de ligne entre deux sous stations adjacentes ce qui va augmenter la section effective de la ligne de contact

Les coffrets CMP sont situés le long de la ligne à intervalle régulier (tous les 300 m environ). Ils permettent de mettre le feeder positif en parallèle avec la LAC, mais aussi d'isoler un ou plusieurs segments du feeder positif[14].

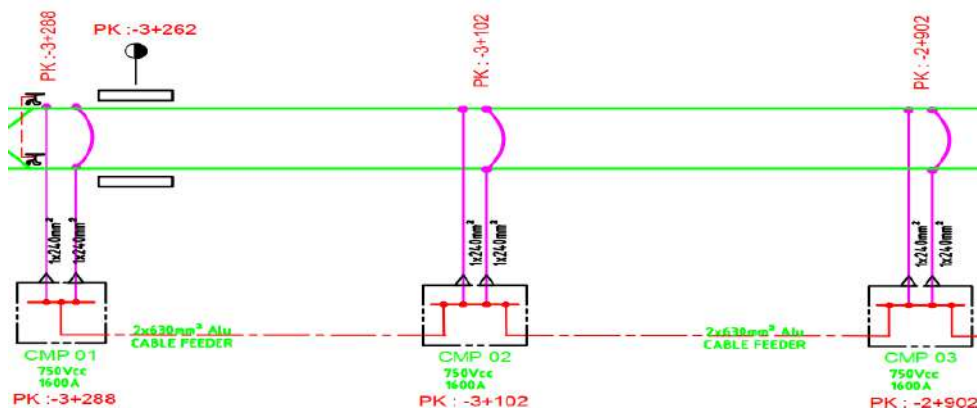


FIGURE II.17 – Distribution de câble feeder 750 Vcc.[22]

II.7.3 Les connexions de continuité.

Il est à noter que lorsque la voie est double, une mise en parallèle des deux fils de contact sera faite régulièrement (tous les 250m environ) pour doubler la section équivalente du circuit positif à travers des armoires en ligne alimenté par des feeders[14].



FIGURE II.18 – Connexion de continuité.[22]

II.7.4 Feux de présence tension

Les feux de présence tension Traction permettent de visualiser l'état électrique de la ligne aérienne et d'éviter aux conducteurs des rames de tramway de s'engager sur une zone hors tension, Les feux de présence tension sont pilotés à partir de platines recevant les relais de présence tension 750 V et le relayage fonctionnel. Ces platines sont implantées dans

les tableaux, armoires et coffrets des équipements traction du marché "énergie" (SSR, coffrets en ligne).

Ces feux de présence tension doivent être visibles par tous les temps et notamment lorsque ces derniers se trouvent face au rayonnement solaire.

Le fonctionnel des feux peut être le suivant :

- Feu allumé fixe = présence tension sur la ligne aérienne.
- Feu allumé clignotant = absence tension sur la ligne aérienne.
- Feu éteint = état indéterminé (panne d'un équipement)

Les feux de présence tension seront fixés systématiquement au droit des isolateurs de section sur les consoles ou sur les transversaux de portique souple afin d'informer le conducteur du tramway de l'état électrique de la section dans laquelle il va s'engager.

Dans certains cas particuliers (manque de visibilité, engagement dans un carrefour...), certains feux de présence tension peuvent être doublés en amont de la section électrique. Une étiquette repère associée à chaque feu de présence tension sera mise en place pour identifier le numéro de section ou sous-section électrique (découpage défini par le schéma unifilaire HT/Traction de la ligne), Les feux de présence tension devront être parfaitement clos à l'humidité et aux écoulements de pluie. Aucun trou ne pourra être laissé ouvert[20]



FIGURE II.19 – Feux de présence tension.[22]

II.8 La chaîne de traction

L'alimentation de la rame en courant 750 volts continu est assuré par un unique pantographe Schunk installé en toiture de la nacelle porteuse [18].



FIGURE II.20 – Pantographe de tramway de Ouargla .[22]

La chaîne de traction du tramway de Ouargla comprend :

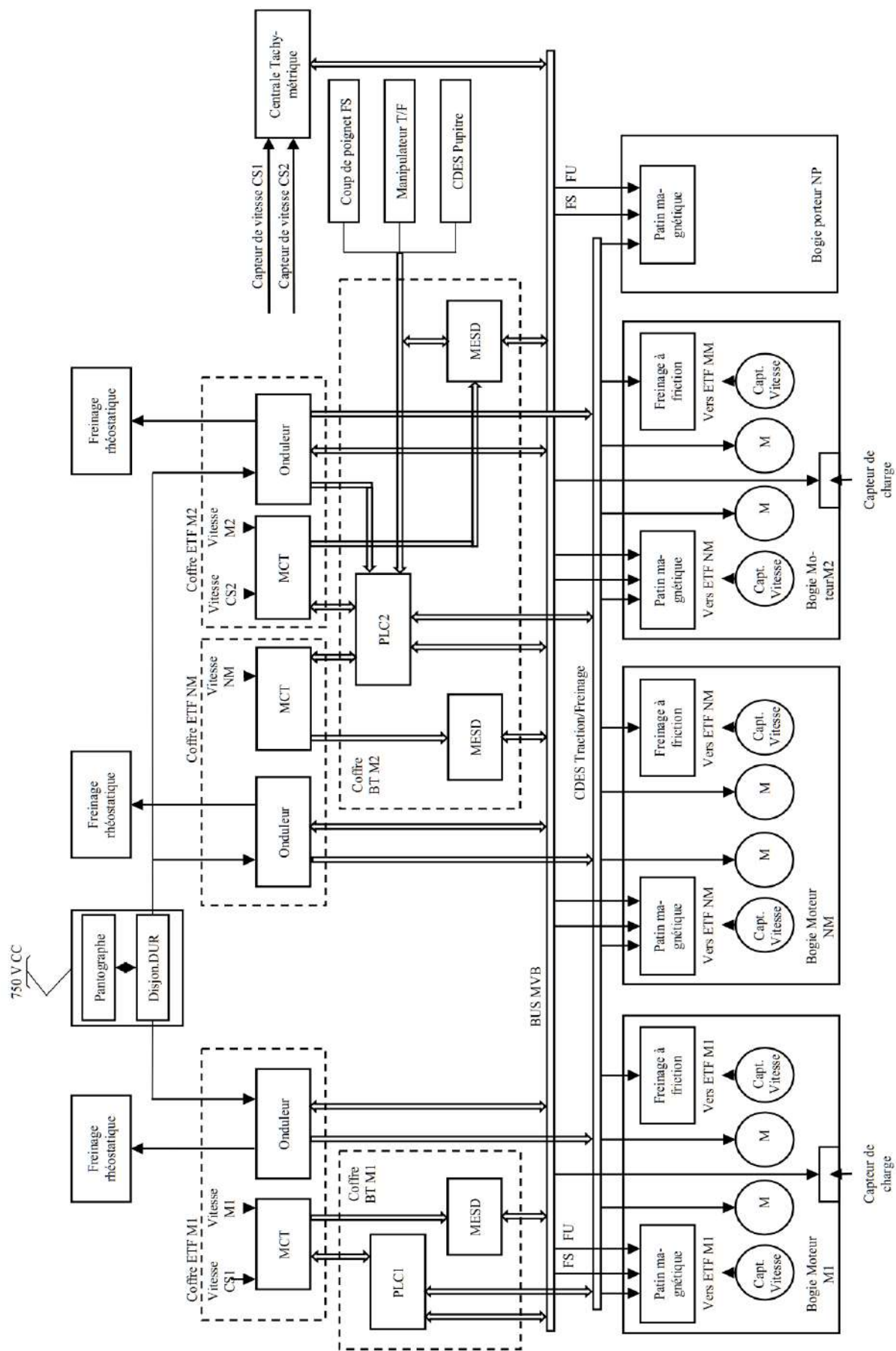


FIGURE II.21 – La chaîne de traction de tramway de Ouargla. [14]

- FU/FS : Frein d'urgence/Frein de secours.
- CDES : Commandes.
- T/F : Traction/Freinage.
- Bus MVB : Bus multifonction du véhicule (Multifunction vehicle bus).
- MCT : Module de commande traction.
- PLC : Automate (Courant porteur de ligne).
- Coffre ETF : Coffre électrique de traction ferroviaire.

En toiture le tramway de Ouargla (Citadis 402) regroupe tous les équipements électriques qui sont chargés à fournir l'effort de traction tout en assurant le confort des passagers. Chaque module motorisé dispose d'un convertisseur de traction et d'un groupe de refroidissement (GRF 5) qui préserve les moteurs de traction du surchauffement. Trois groupes de climatisation de salle (GCS) assurent le chauffage et la ventilation de toute la rame, sauf pour les deux unités motrices qui sont équipées de leurs propres groupes de climatisation de cabine de conducteur (GCC). Plusieurs convertisseurs auxiliaires assurent la charge des batteries et l'alimentation des appareils fonctionnant en courant alternatif. Un rhéostat de freinage est installé dans chaque caisse (CC, C1 et C2)[14].

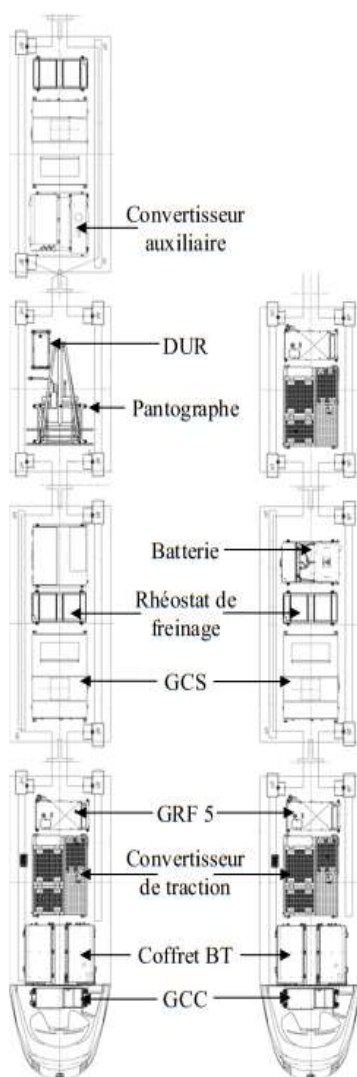


FIGURE II.22 – Les équipements en toiture du matériel roulant du Citadis 402.[14]

II.8.1 Coffre de traction

Se compose de quatre compartiments permettant d'accueillir : les appareillages, les inductances de filtrage, le module de commande et le module de puissance[8].

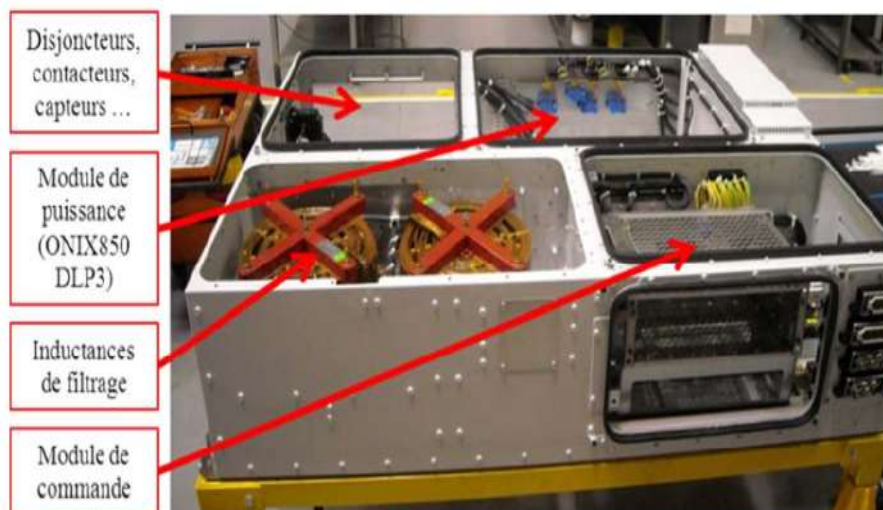


FIGURE II.23 – Coffre de traction.[8]

Un autre compartiment du coffre du tramway contient les inductances de filtrage . Il s'agit de deux inductances, une inductance par onduleur triphasé, d'une valeur de 2mH avec un courant nominal de 207A_{eff} et une résistance série inférieure à 67mΩ. L'ensemble des deux inductances représente une masse maximale de 85kg. Le bruit n'excède pas 65dBA max à 3m de l'inductance dans les 3 axes et cela sur toute la plage de courant [8].

II.8.2 Le module de puissance (ONIX850DLP3)

Le module de puissance des tramways Citadis™ actuels comprend 2 onduleurs triphasés et 2 hacheurs rhéostatiques. Il est adapté à la tension de réseau de 750V DC[15].

- 3 packs IGBT 2×800A /1700V par onduleur triphasé.
- 1 pack IGBT 2×800A /1700V par bras rhéostatique.
- Tension DC maximale entre +HT/-HT : 1000V max ≤ 5min.
- Tension DC minimale entre +HT/-HT : 500V.
- Fréquence de découpage maximum : onduleur, 1500Hz, hacheur 800Hz.
- Temps minimum de conduction de l'interrupteur, temps minimum de blocage de l'interrupteur et temps mort entre deux interrupteurs d'un même bras(de la cellule de commutation) de 10μs chacun.
- Retard à l'amorçage entre l'ordre de commande et la tension de grille $Td_{on} = 1,4\mu s$.
- Retard au blocage entre l'ordre de commande et la tension de grille $Td_{off} = 1,4\mu s$.
- Retard à l'amorçage entre l'ordre de commande et le début de la commutation de l'IGBT $Tr_{on} = 3\mu s$.
- Retard au blocage entre l'ordre de commande et le début de la commutation de l'IGBT $Tr_{off} = 4\mu s$.

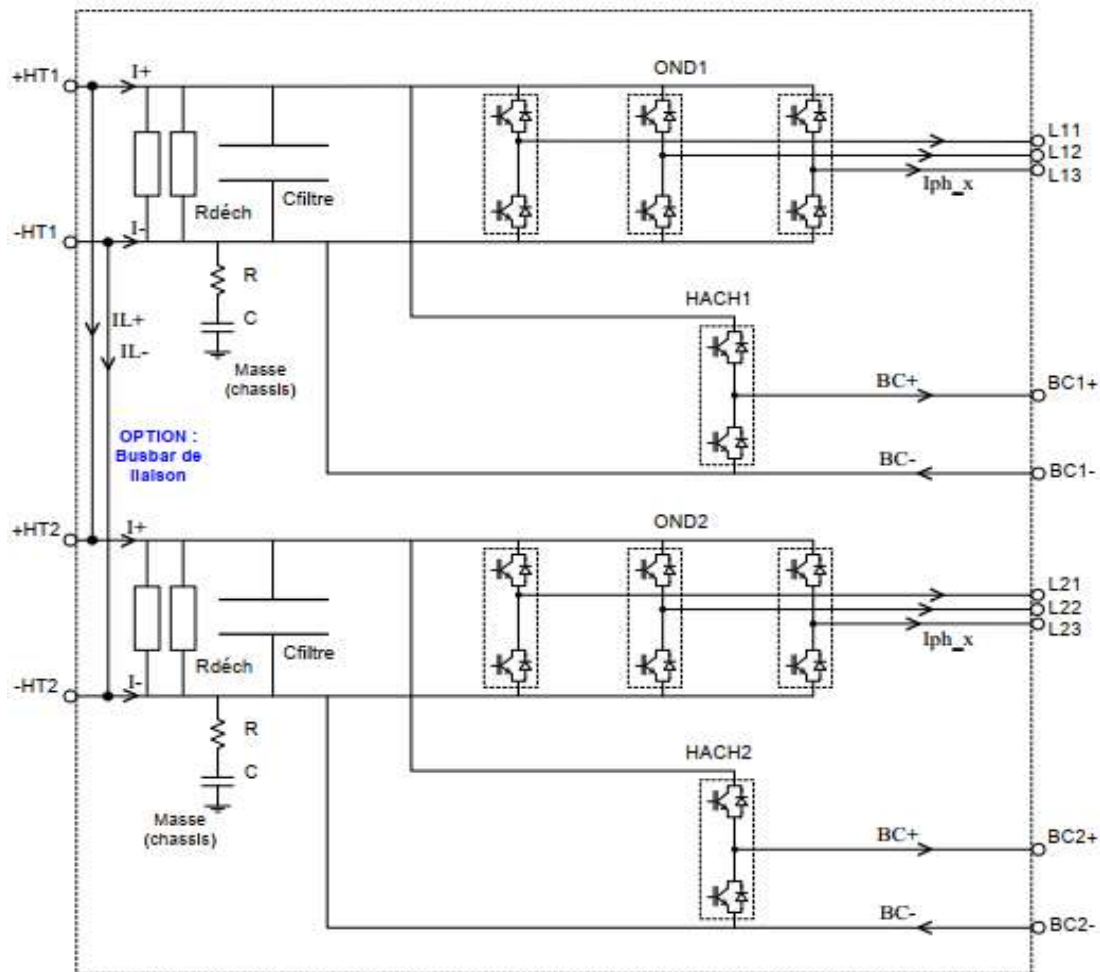


FIGURE II.24 – Schéma du module de puissance ONIX850DLP3.[14]

II.8.2.1 Le module de commande(AGATE)

Cet appareil réalise les différentes boucles de régulation nécessaires au commande de la motorisation qui assurent le pilotage et la surveillance des différents convertisseurs de chaque essieu : onduleur, hacheur de freinage.[8]



FIGURE II.25 – Le régulateur AGATE.[15]

II.8.3 Moteur de traction (4HGA1433)

Ce modèle occupe la deuxième génération de la gamme Citadis d'Alstom (202, 302, 402, 502). C'est un moteur asynchrone triphasé à deux paires de pôles fonctionnant sous une fréquence variable [21].



FIGURE II.26 – Moteur 4HGA1433.[15]

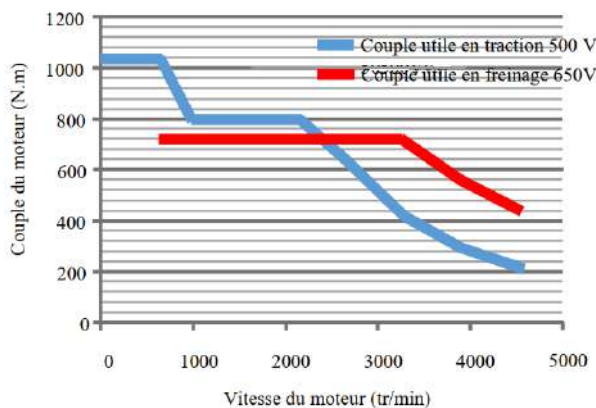


FIGURE II.27 – Profil couple- vitesse.[15]

Modèle	4 HGA 1433
Type	Asynchrone
Tension nominale de ligne	500 V
Courant nominal de ligne	281 A
Fréquence nominale	88 Hz
Puissance à l'arbre	180 kW
Vitesse de rotation nominale	2600 Rpm
Couple nominal	800 N.m

TABLE II.2 – Caractéristiques du moteur de traction.[14][21]

II.8.3.1 Commande du moteur

Il est relativement facile d'obtenir de la vitesse variable avec une machine à courant continu. En effet, une fois la machine fluxée grâce au circuit inducteur, la vitesse de rotation est directement reliée à la tension d'induit. Le courant d'induit proportionnel au couple influe sur cette loi en créant une chute de tension dans les enroulements statoriques rendant la loi de vitesse affine. Le coefficient de proportionnalité entre la vitesse et la f.e.m dépend uniquement du courant inducteur, si on néglige la réaction magnétique d'induit. Dans une machine asynchrone, la commande est beaucoup plus complexe, et piloter le moteur en vitesse variable requiert de contrôler la tension et la fréquence d'alimentation. De nombreuses technologies d'onduleur peuvent être utilisées en fonction des niveaux de tension, du besoin de filtrage, des problématiques CEM, etc.[7].

Depuis une trentaine d'années, plusieurs stratégies de commande ont été développées pour pouvoir réaliser un contrôle découplé de la machine à induction. Ces méthodes appelées 'commandes vectorielles' assurent des performances dynamiques équivalentes à celles obtenues par la machine à courant continu. Au cours des dernières années, le développement de nouvelles techniques de traitement des signaux ont permis la réalisation des

structures de commande beaucoup plus évoluée. Les plus récentes démarches dans cette direction sont celles regroupées sous le terme de commande directe du couple.[25]

II.8.4 Les convertisseurs auxiliaires

Le rôle de ces deux convertisseurs auxiliaires est de[14] :

- Produire une tension triphasée 50 Hz pour alimenter les groupes de refroidissement (GRF) des moteurs de traction et les deux climatiseurs de cabines.
- Produire une tension triphasée à fréquence variable afin d'alimenter les 3 groupes de climatisation des caisses passagers.
- Produire une tension continue de 24 V afin de charger les batteries

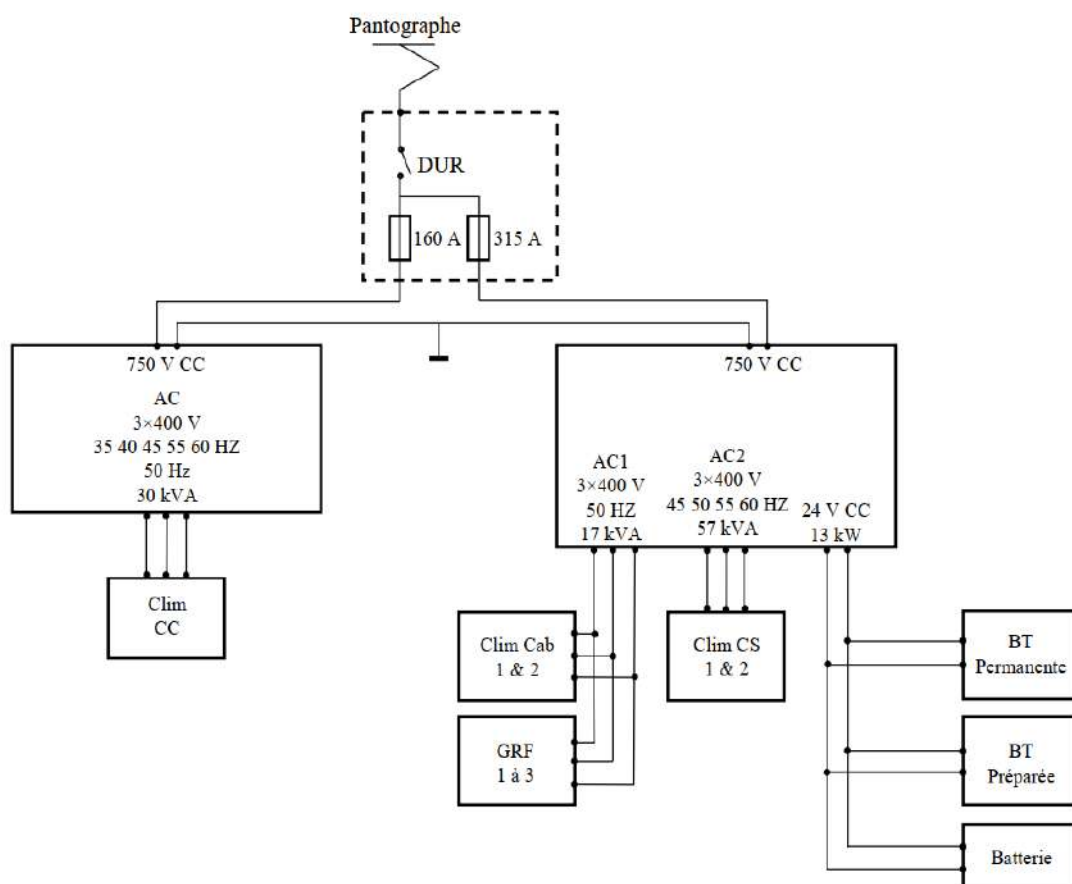


FIGURE II.28 – Alimentation des auxiliaires à travers des convertisseurs.[11]

II.9 Conclusion

Dans le deuxième chapitre, nous avons illustré spécifiquement l'alimentation électrique du tramway de Ouargla modèle Citadis 402 conçu pour résister aux conditions climatiques du sud, ce dernier utilise six moteurs asynchrones distribués aux trois bogies moteur. La production de l'énergie de traction est assurée par cinq sous-station isolés les uns des autres par les isolateurs des sections.

Chapitre III

Commande direct du couple des moteurs de tramway

III.1 Introduction

Pour contourner les problèmes de sensibilité aux variations paramétriques vécu par la commande vectorielle, on a considéré d'autres méthodes de commande dans lesquelles le flux et le couple électromagnétique sont estimés à partir des seules grandeurs électriques accessibles au stator et ceci sans le recours à des capteurs mécaniques, parmi ces méthodes, la commande directe du couple.[26]

La commande directe du couple est apparue dans la deuxième moitié des années 80 par Takahashi comme concurrentielle des méthodes classiques, basées sur l'alimentation par modulation de largeur d'impulsions MLI et sur le découplage du flux et du couple moteur par orientation du flux statorique. Ces dernières sont conçues au début pour des onduleurs à deux niveaux.

Aussi, cette technique offre, des avantages déjà bien connus par rapport aux autres techniques classiques présentés les points suivants :[27]

- Une excellente dynamique du couple.
- Une bonne robustesse vis-à-vis des variations des paramètres du rotor de la machine.
- Absence d'utilisation des transformations de Park et de son inverse.
- Absence des blocs de calculs de la modulation de tension MLI .
- Absence de découplage des courants par rapport aux tensions de commande,
- Absence de nécessité de connaître l'angle de position rotorique. Seul le secteur dans lequel se trouve le flux statorique est nécessaire.

Les inconvénients de la commande DTC peuvent être résumés par les points suivants :

- L'existence des ondulations souvent importantes de couple et de flux fréquence de commutation n'est pas contrôlée
- La nécessité d'utiliser des estimateurs de flux statorique et de couple
- Un fonctionnement mal contrôlé à basse vitesse
- Les courants statoriques sont mal contrôlés en régimes transitoires

Dans ce chapitre on va exposer les principes des contrôles directs de couple comme une méthode proposée pour la commande des moteurs du tramway .

III.2 Les onduleurs

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu alternatif. Alimenté par une source continue, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie pour obtenir à la sortie une tension et un courant alternatif. La structure d'un onduleur dépend essentiellement de la nature des sources entre les quelles il est monté.

Comme il faut respecter l'alternance des sources à ses accès, on distinguera donc[28] :

- Les onduleurs de tension reliant une source de tension continue à une source de courant alternatif.
- Les onduleurs de courant placés entre une source de courant continu et une source de tension alternative.

La nature des sources est définie du point de vue des commutations.

La fréquence des grandeurs de sortie d'un onduleur peut, suivant l'application, être fixe ou variable, être librement imposée ou dépendre des caractéristiques de la source alternative alimentée. Les onduleurs de tension à fréquence fixe sont principalement utilisés :

- Pour réaliser des alimentations de sécurité délivrant une tension sinusoïdale de fréquence constante.
- Pour relier au réseau industriel des générateurs à courant continu

Les onduleurs de tension à fréquence variable servent à réaliser des entraînements à vitesse variable avec moteurs à courant alternatif.

III.2.1 L'onduleur triphasé à deux niveaux

L'onduleur triphasé de tension à trois bras se compose 02 interrupteurs par chaque bras ont particularité d'être bidirectionnels et entièrement commandables à l'ouverture et à la fermeture. Pour assurer la circulation du courant dans les deux sens, l'interrupteur doit être placé en antiparallèle avec une diode.[29]

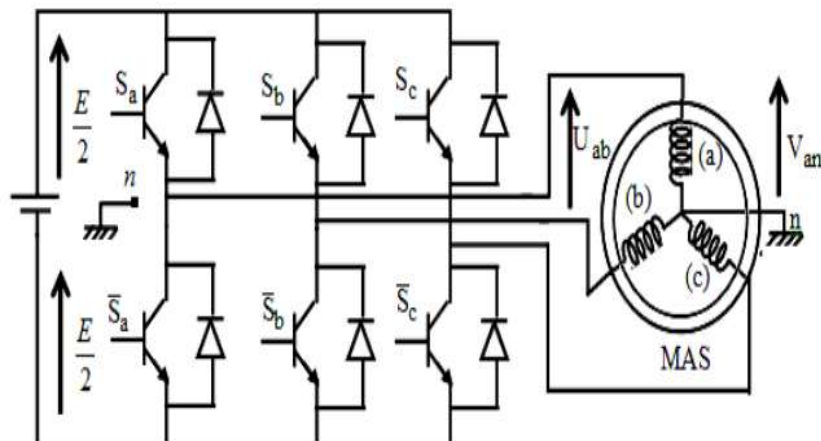


FIGURE III.1 – Structure d'un onduleur triphasé à deux niveaux.[25]

Les six interrupteurs de l'onduleur sont commandes de manière complémentaire deux à deux, ce qui confère trois degrés de liberté à cet onduleur, ayant chacun deux états : fermé (1) ou ouvert (0).

La figure (III.2) fait le lien entre les différentes séquences, les vecteurs de tension et l'état des interrupteurs formant l'onduleur.

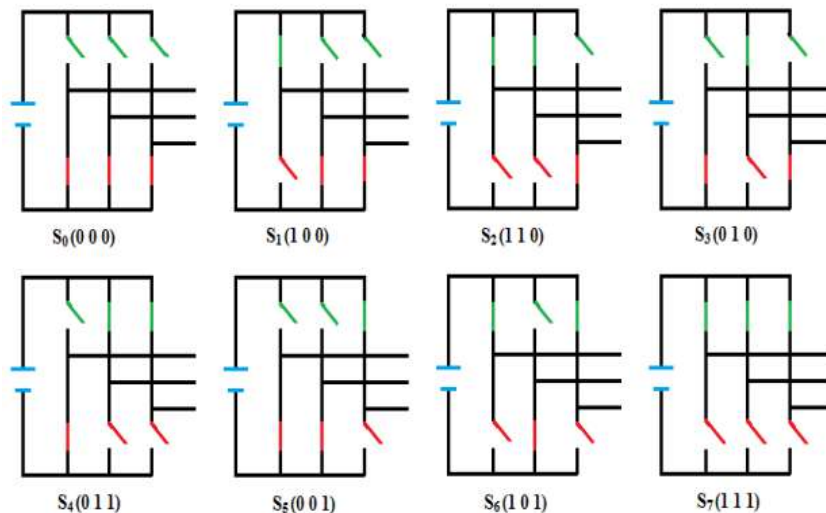


FIGURE III.2 – Etats des interrupteurs pour chaque vecteur de tension.[29]

Les tensions de ligne sont donc exprimées par[2] :

$$\begin{cases} U_{ab} = (V_{an} - V_{bn}) = E(S_a - S_b) \\ U_{bc} = (V_{bn} - V_{cn}) = E(S_b - S_a) \\ U_{ca} = (V_{cn} - V_{an}) = E(S_c - S_a) \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Dans l'hypothèse nous avons les tensions V_{an} , V_{bn} , V_{cn} forment un système de tension triphasé équilibré , donc de III.1 on obtient [27] :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{E}{3}(2S_a - S_b - S_c) \\ V_{bn} = \frac{E}{3}(2S_b - S_a - S_c) \\ V_{cn} = \frac{E}{3}(2S_c - S_a - S_b) \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Ainsi l'onduleur peut être modélisé par une matrice symétrique assurant le passage continu alternatif[27] :

$$\begin{bmatrix} V_{bn} \\ V_{an} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & -2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix}$$

Les composants de l'électronique de puissance sont déterminés par les niveaux de la puissance et la fréquence de commutation. En règle générale, plus les composants sont rapides, plus la puissance commutée est faible et inversement. A titre indicatif, les transistors MOSFET sont considérés comme des composants très rapides, mais de puissance relativement faible. Les transistors bipolaires sont moins rapides que les transistors MOSFET mais d'avantages plus puissants (quelques KHz à une dizaine de kW). Les transistors IGBT sont des composants de gamme standard (jusqu'à 20 KHz à une des dizaines de kW). Les thyristors GTO commutent très lentement les grandes puissances. Ces composants sus indiqués sont du type commandable à l'ouverture et à la fermeture, ce qui n'est pas le cas pour le thyristor classique.

Pour la commande des interrupteurs il existe plusieurs types, les plus souvent utilisés sont[2] :

- La commande 120° (décalée).
- La commande 180° (symétrique).
- La commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI)

III.3 La machine asynchrone

La machine asynchrone est une machine à courant alternatif, la vitesse du rotor et la vitesse du champ magnétique tournant ne sont pas égales à cause du glissement. Le rotor est toujours en retard par rapport au champ statorique, la machine asynchrone est dite (machine à induction) car l'énergie est transférée du stator au rotor ou inversement par induction électromagnétique[30].

III.3.1 Constitution de la machine asynchrone

La machine asynchrone est constituée des principaux éléments suivants :

III.3.1.1 Le stator

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[2].

III.3.1.2 Le rotor

Le rotor contient l'enroulement où les courants induits doivent circuler. Dans la pratique on trouve deux types de rotor [2] :

- 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.
- 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

III.3.2 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 :[2]

$$g = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (\text{III.3})$$

Avec :

N_s : vitesse de rotation de synchronisme du champ tournant.

N_r : vitesse de rotation du rotor.

La vitesse de rotation N_s du champ tournant d'origine statorique, rigidement liée à la fréquence f_s de tension triphasée d'alimentation :

$$N_s = \frac{60 f_s}{P} \quad (\text{III.4})$$

p : le nombre de paires des pôles de la machine.

III.3.3 Equations de la machine asynchrone généralisée

Le comportement de la MAS est défini par trois types d'équations à savoir :

III.3.3.1 Equations électriques

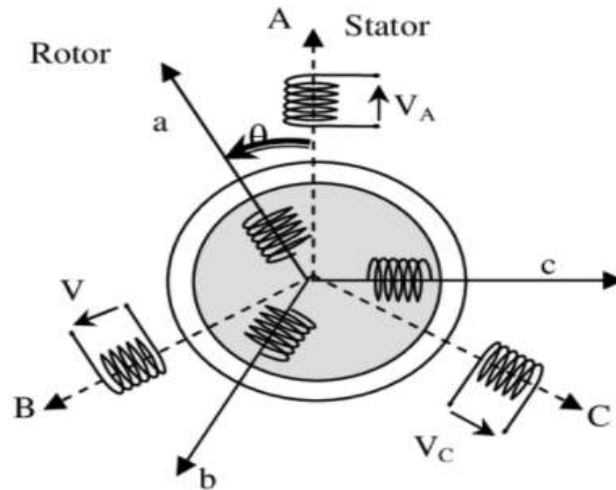


FIGURE III.3 – Représentation de la machine asynchrone triphasée dans l'espace électrique.[29]

En appliquant la loi d'Ohm généralisée à chaque phase de la figure (III.3), les équations des tensions des trois phases statoriques et rotoriques sont données respectivement par (III.5) et (III.6) :

$$\begin{cases} V_{as} = R_s \bar{i}_{as} + \frac{d\bar{\Phi}_{as}}{dt} \\ V_{bs} = R_s \bar{i}_{bs} + \frac{d\bar{\Phi}_{bs}}{dt} \\ V_{cs} = R_s \bar{i}_{cs} + \frac{d\bar{\Phi}_{cs}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

$$\begin{cases} V_{ar} = R_r \bar{i}_{ar} + \frac{d\bar{\Phi}_{ar}}{dt} \\ V_{br} = R_r \bar{i}_{br} + \frac{d\bar{\Phi}_{br}}{dt} \\ V_{cr} = R_r \bar{i}_{cr} + \frac{d\bar{\Phi}_{cr}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

Avec :

- $V_{as}, V_{bs}, V_{cs}, V_{ar}, V_{br}, V_{cr}$:Les trois tensions statoriques et rotoriques.
 $i_{as}, i_{bs}, i_{cs}, i_{ar}, i_{br}, i_{cr}$:Les trois courants statoriques et rotoriques.
 $\Phi_{as}, \Phi_{bs}, \Phi_{cs}, \Phi_{ar}, \Phi_{br}, \Phi_{cr}$:Les flux à travers les trois phases du stator et du rotor.

III.3.3.2 Equation magnétique

On peut écrire les expressions du flux des phases statoriques et rotoriques comme suit[30] :

$$\begin{cases} [\Phi_{abss}] = [L_{ss}][i_{abcs}] + [M_{sr}][i_{abcr}] \\ [\Phi_{absr}] = [L_{sr}][i_{abcr}] + [M_{rs}][i_{abcs}] \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Avec :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = m_{sr} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix} \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix}$$

- $l_s l_r$:Inductance propre d'une phase statorique et d'une phase rotorique.
 m_s :Inductance mutuelle entre phases statoriques.
 m_r :Inductance mutuelle entre phases rotoriques.
 M_{sr} :Représente la matrice des inductances mutuelles entre le stator et le rotor.
 m_{sr} :Représente la valeur maximale des inductances mutuelles entres phases statoriques et rotoriques.

III.3.3.3 Equation mécanique

L'équation mécanique de la machine est donnée par :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f \cdot \Omega \quad (\text{III.8})$$

Avec :

- C_{em} :Le couple électromagnétique.
 C_r :Le couple résistante.
 f :Coefficient de frottements.
 J :Moment d'inertie du rotor.

Les équations de la machine asynchrone sont données comme suit :

$$V_{sabs} = R_{sabs} \bar{I}_{as} + \frac{d}{dt} ([L_{ss}] \cdot [i_{sabs}] + [M_{sr}] \cdot [i_{rABC}]) \quad (\text{III.9})$$

$$V_{rabs} = R_{rabs} \bar{I}_{rs} + \frac{d}{dt} ([L_{rr}] \cdot [i_{rabs}] + [M_{rs}] \cdot [i_{sABC}]) \quad (\text{III.10})$$

Cette présentation de la modélisation triphasée présente un inconvénient majeur pour notre application, les matrices $[M_{sr}]$ et $[M_{rs}]$ dépendent de l'angle de rotation mécanique θ et nécessitent donc d'être recalculées à chaque pas d'échantillonnage . Pour remédier à ce problème, on effectue des transformations[30].

III.3.4 Les changements de référentiels

En régime transitoire, les équations primitives décrivant le fonctionnement des machines électriques tournantes, sont des équations différentielles à coefficient variables (contenant des termes périodiques). ces coefficients périodiques ($\sin(\theta)$, $\cos(\theta)$) sont fonction de l'angle (θ), qui provient du mouvement relatif entre les bobinages statoriques et rotoriques. L'étude analytique du comportement des convertisseurs tournants devient alors relativement lourde, vu le grand nombre de variables. la solution numérique est possible, mais demeure compliquée et demande un temps de calcul très important pour la résolution des équations différentielles primitives. On recourt alors à des transformations mathématiques permettant de décrire le comportement des machines électriques par des équations différentielles à coefficients constants. En général on utilise les transformations qui conservent la puissance instantanée ainsi que la réciprocité des inductances mutuelles[28].

Dans cette considération, on choisit le système d'axe (α, β) , c'est-à-dire le système d'axe biphasé est immobile par rapport au système d'axe triphasé, la vitesse de rotation des axes (α, β) est donc nulle ($\omega_a=0$)[30].

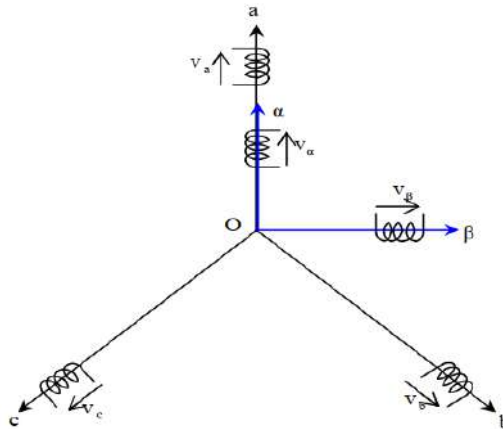


FIGURE III.4 – Transformation de Concordia.[28]

Ce qui permet de réduire la complexité des équations (III.9 et III.10). Le passage du système triphasé au système biphasé est assuré par la matrice de Concordia[30], cette transformation conserve la puissance et non pas les amplitudes.[28]

III.3.4.1 La matrice de Concordia

La matrice de Concordia est normée par conséquent, son inverse est égal à sa transposée. La transformation de Concordia est utilisée pour toute grandeur d'espace (flux, courants...). Si le système des tensions est équilibré, la matrice de Concordia et Concordia inverse, sont données respectivement comme suit[28] :

$$[C_{32}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [C_{23}] = [C_{32}]^{-1} = [C_{32}]^T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

III.3.4.2 Equation de la machine dans le repère (α, β) lié au stator

Et en appliquant la transformation de Concordia, on obtient[25] :

$$\begin{cases} V_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + \frac{d\Phi_{s\alpha}}{dt} \\ V_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + \frac{d\Phi_{s\beta}}{dt} \\ V_{r\alpha} = 0 = R_r i_{r\alpha} + \frac{d\Phi_{r\alpha}}{dt} + \omega_r \Phi_{r\beta} \\ V_{r\beta} = 0 = R_r i_{r\beta} + \frac{d\Phi_{r\beta}}{dt} - \omega_r \Phi_{r\alpha} \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

Avec :

$$\begin{cases} \Phi_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + M i_{r\alpha} \\ \Phi_{s\beta} = L_s i_{s\beta} + M i_{r\beta} \\ \Phi_{r\alpha} = L_r i_{r\alpha} + M i_{s\alpha} \\ \Phi_{r\beta} = L_r i_{r\beta} + M i_{s\beta} \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

L'équation du couple sera donnée par :

$$C_{em} = P(\Phi_{s\alpha} i_{s\beta} - \Phi_{s\beta} i_{s\alpha}) \quad (\text{III.13})$$

L'équation de mouvement s'écrit alors :

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J}(C_{em} - C_r - f\Omega) \quad (\text{III.14})$$

III.4 Principe de la commande directe du couple

Le principe de la commande DTC est basé sur la régulation directe du couple électromagnétique de la machine, par l'application de différents vecteurs de tensions sur l'onduleur bien choisi. Les grandeurs contrôlées sont le flux statorique et le couple électromagnétique, généralement sont commandés par des régulateurs à bandes hystérésis de deux à plusieurs niveaux, afin de maintenir ces grandeurs à l'intérieur de ses bandes et pour déterminer les évolutions exactes de ces grandeurs contrôlées.

Les sorties de ces régulateurs, et l'angle qui représente la position du flux statorique, ils sont tout déterminés le vecteur de tension de l'onduleur optimal à appliquer dans chaque instant de commutation.

Dans une commande DTC, il est conseillé de travailler avec des fréquences de calcul plus élevées pour avoir des réductions dans les oscillations du couple générées par les régulateurs à hystérésis. Les propriétés générales de la commande directe du couple sont représentées dans les points suivants[31] :

- Une commande directe du couple et du flux à partir de la sélection des vecteurs optimaux.
- Une commande indirecte des courants et des tensions statoriques.
- Une estimation du couple et de flux à partir des grandeurs électriques.
- L'obtention des flux et des courants statoriques proches de formes sinusoïdales.
- Une réponse dynamique de la machine très rapide.
- L'existence des oscillations du couple qui dépend, entre autres, des facteurs de la largeur des bandes des régulateurs à hystérésis.
- La fréquence de commutation de l'onduleur dépend de l'amplitude de ces bandes.
- Une trajectoire circulaire du flux statorique dans le plan biphasé.

III.5 La théorie de la commande directe du couple

III.5.1 Le contrôle vectoriel du couple

On utilise les expressions vectorielles de la machine dans le référentiel lié au stator[31] :

$$\begin{cases} \bar{V}_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\Phi}_s}{dt} \\ \bar{V}_r = 0 = R_r \bar{i}_r + \frac{d\bar{\Phi}_r}{dt} - j\sigma \bar{\Phi}_r \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

Alors le courant stator s'écrit :

$$\bar{V}_s = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{\bar{\phi}_r}{L_r} - \frac{L_m}{L_r L_s} \bar{\Phi}_s \right) \quad (\text{III.16})$$

Avec :

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s} \quad (\text{III.17})$$

Les équations deviennent :

$$\begin{cases} \bar{V}_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\Phi}_s}{dt} \\ \frac{d\bar{\Phi}_r}{dt} + \left(\frac{1}{\sigma \delta_r} j\omega \right) \bar{\Phi}_r = \frac{L_m}{L_s} \frac{1}{\sigma \delta_r} \bar{\Phi}_s \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

Ces relations montrent que :

- Le vecteur $\bar{\Phi}_s$ peut être contrôlé à partir du vecteur \bar{V}_s à la chute de tension $R_s \bar{I}_s$ prés.
- Le flux $\bar{\Phi}_s$ suit les variations de $\bar{\phi}_s$ avec une constante de temps $\sigma \delta_r$, le rotor agit comme un filtre de constante de temps $\sigma \delta_r$ entre les flux $\bar{\Phi}_r$ et $\bar{\Phi}_s$.

De plus $\bar{\Phi}_r$ atteint en régime permanent :

$$\bar{\Phi}_r = \frac{L_m}{L_s} \frac{\bar{\Phi}_s}{1 + j\omega_r \sigma \delta_r} \quad (\text{III.19})$$

En posant $\gamma = \bar{\Phi}_r \bar{\Phi}_s$ le couple s'exprime par :

$$C_{em} = P \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \Phi_s \Phi_r \sin \gamma = K \|\Phi_s\| \|\Phi_r\| \sin \gamma = K \|\Phi_s\| \|\Phi_r\| \sin \gamma \quad (\text{III.20})$$

On constate donc que le couple dépend de l'amplitude des deux vecteurs $\bar{\Phi}_r$ et $\bar{\Phi}_s$ et de leur position relative. si l'on parvient à contrôler parfaitement le flux Φ_s (à partir de V_s) en module et en position, on peut donc contrôler l'amplitude et la position relative de Φ_s et Φ_r , donc le couple. Ceci est bien sur possible si la période de commande T_e de la tension V_s est telle que $T_e \ll T_r$ [31].

L'équation (III.20) permet donc de conclure que la seule manière de faire varier la composante du couple électromagnétique à l'échelle de la période d'échantillonnage est d'agir sur l'angle γ entre les vecteurs flux statorique et rotorique.[31]

La figure (III.5) représente la composante du couple produite en fonction des deux vecteurs $\bar{\Phi}_s$ et $\bar{\Phi}_r$ et elle montre aussi qu'afin d'augmenter rapidement l'angle γ et donc le couple, donc il est indésirable de faire avancer le vecteur flux statorique dans le sens de rotation considéré. positif. L'application d'un vecteur de tension nul peut également permettre de maintenir la valeur du couple.[31]

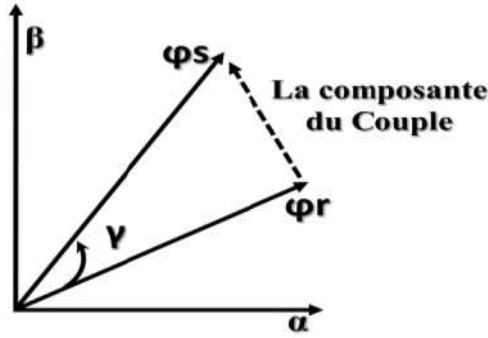


FIGURE III.5 – Le couple produit en fonction des flux $\bar{\phi}_s$ et $\bar{\phi}_r$. [31]

III.5.2 Contrôle du vecteur flux statorique

Le contrôle direct du couple est basé sur l'orientation du flux statorique. L'expression du flux statorique dans le référentiel lié au stator de la machine est obtenue par l'équation suivante [30] :

$$\Phi_s(t) = \int_0^t (V_s - R_s i_s) dt + \Phi_{s0} \quad (III.21)$$

Dans le cas où on appliqué un vecteur de tension non nul pendant un intervalle de temps $[0, T_e]$, on aura : $V_s \gg R_s I_s$. Donc (II.1) peut s'écrire :

$$\Phi_s(t) = \Phi_s(0) + V_s T_e \quad (III.22)$$

Donc

$$\Delta\Phi_s = \Phi_s - \Phi_{ss}(0) = V_s T_e \quad (III.23)$$

L'équation (III.23) implique que l'extrémité du vecteur flux statorique Φ_s se déplace sur une droite dont la direction est donnée par le vecteur tension appliquée V_s , comme il est illustré par la figure (III.6).

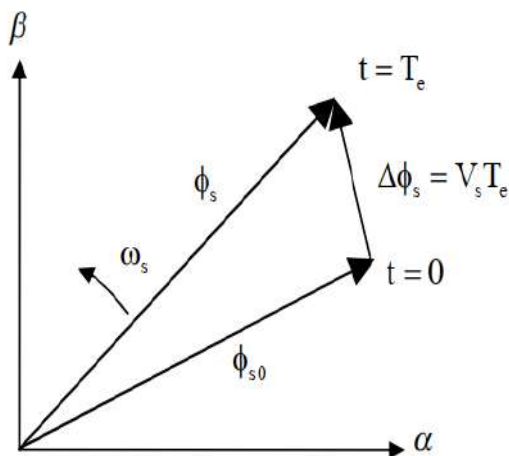


FIGURE III.6 – Évolution du vecteur flux statorique dans le plan (α, β) . [30]

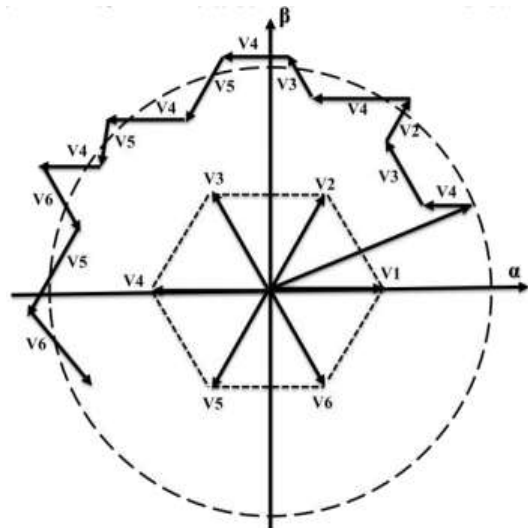


FIGURE III.7 – Pilotage du vecteur flux statorique à l'aide des vecteurs tension fournis par un onduleur de deux niveaux. [31]

La figure (III.6) montre que l'amplitude du vecteur flux statorique ou bien la magnétisation de la machine peut être augmentée (respectivement diminuée) en appliquant un vecteur de tension ayant une forte composante colinéaire avec le vecteur flux statorique et il est de même sens (respectivement de sens inverse). Par contre, l'application d'un vecteur de tension en quadrature aura un effet négligeable sur la variation de son amplitude.

La figure (III.7) montre qu'il est possible de déplacer le vecteur du flux statorique dans le plan (α, β) à partir des vecteurs de tension fournis par un onduleur de deux niveaux selon six directions déterminées. En commutant d'un vecteur de tension bien sélectionné, permet de faire déplacer le vecteur flux statorique sur le plan (α, β) et suivre une trajectoire généralement d'une forme circulaire. [31]

III.6 Présentation de la structure de contrôle

III.6.1 Sélection du vecteur tension V_s

L'objectif du contrôle du flux étant de garder le module de ce dernier constant, la meilleure façon de le faire sera de piéger sa trajectoire de référence de telle sorte qu'elle reste dans les limites des deux cercles concentriques de rayon très proches. La largeur $\Delta\Phi_s$ de cet anneau circulaire dépend de la fréquence de commutation des interrupteurs de l'onduleur. Le choix de V_s ne porte pas uniquement sur l'erreur du module mais sur le sens de rotation de Φ_s le secteur dans lequel se trouve le vecteur flux. A cet effet, le plan complexe (α, β) fixe au stator est subdivisé en six secteurs, figure (III.8). Lorsque le flux Φ_s se trouve dans la section i , le contrôle du flux et du couple peut être assuré en sélectionnant l'un des huit vecteurs tensions, selon la manière suivante [31] :

- Si V_{i+1} est sélectionné alors Φ_s croît et C_e croît.
- Si V_{i-1} est sélectionné alors Φ_s croît et C_e décroît .
- Si V_{i+2} est sélectionné alors Φ_s décroît et C_e croît.
- Si V_{i-2} est sélectionné alors Φ_s décroît et C_e décroît .
- Si V_0 ou V_7 est sélectionné, la rotation de Φ_s est arrêtée, d'où une décroissance du couple alors que le module du couple reste inchangé.

Le niveau d'efficacité des vecteurs de tension appliqués dépend également de la position du vecteur flux dans la zone i . En effet, au début de la zone, les vecteurs V_{i+1} et V_{i-2} sont perpendiculaires à Φ_s d'où une évolution rapide du couple mais une évolution lente de l'amplitude du flux Φ , alors qu'en fin de zone, l'évolution est inverse. Avec les vecteurs V_{i-1} et V_{i+2} , correspond une évolution lente du couple et rapide de l'amplitude de Φ_s au début de la zone, alors qu'en fin de la zone c'est le contraire qui se produit. Quel que soit le sens d'évolution du flux ou du couple, dans la zone i , les deux vecteurs V_i et V_{i+3} ne sont jamais utilisés. En effet, ces deux vecteurs provoquent une forte croissance du flux mais son effet sur le couple dépend de la zone, avec un effet nul en milieu de zone. Le vecteur tension statorique V_s à la sortie de l'onduleur est déduit des écarts du couple et du flux estimés par rapport à leurs références, ainsi que de la position du vecteur Φ_s . Un estimateur de Φ_s en module et en position ainsi qu'un estimateur de couple sont donc nécessaires [31].

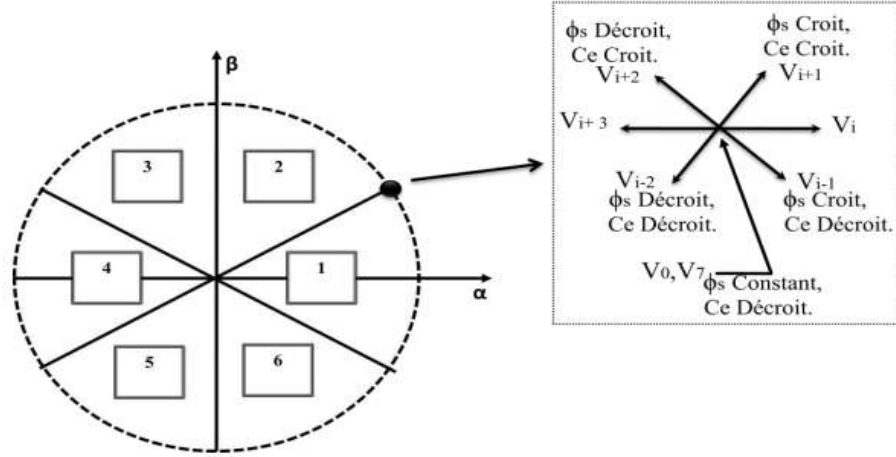


FIGURE III.8 – Evolution du flux et du couple pour les différents vecteurs de tensions possibles.[31]

III.6.2 Estimation du flux statorique

La commande DTC se base sur une estimation du couple de la machine, ainsi que sur une estimation du flux statorique de la machine, la tension au stator est définie par l'équation (III.15), le flux statorique est donc donné par[26] :

$$\Phi_s(t) = \int_0^t (V_s - R_s i_s) dt \quad (\text{III.24})$$

On obtient les composantes α, β du vecteur Φ_s :

$$\Phi_s(t) = \Phi_{s\alpha} + \Phi_{s\beta} \quad (\text{III.25})$$

Avec :

$$\begin{cases} \Phi_{s\alpha}(t) = \int_0^t (V_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) dt \\ \Phi_{s\beta}(t) = \int_0^t (V_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) dt \end{cases} \quad (\text{III.26})$$

Les composantes ($i_{s\beta}, i_{s\alpha}$) du vecteur courant sont obtenues par l'application de la transformation de Concordia aux courants mesurés I_{sa} , et I_{sc} soit :

$$\begin{cases} i_{s\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} i_{sa} \\ i_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} (i_{sb} - i_{sc}) \end{cases} \quad (\text{III.27})$$

On reconstruit les composantes du vecteur tension à partir de la mesure de la tension d'entrée de l'onduleur, des états des interrupteurs S_a, S_b, S_c , et en appliquant la transformation de Concordia[32] :

$$\begin{cases} V_{s\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_0 (S_a - \frac{1}{2}(S_b + S_c)) \\ V_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_0 (S_b - S_c) \end{cases} \quad (\text{III.28})$$

Le secteur dans lequel se trouve le vecteur Φ_s est déterminé à partir des composantes $\Phi_{s\beta}$ et $\Phi_{s\alpha}$. L'angle θ_s détermine la position du vecteur Φ_s est égale à[31] :

$$\theta_s = \arctg \frac{\Phi_{s\beta}}{\Phi_{s\alpha}} \quad (\text{III.29})$$

III.6.3 Estimation du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique peut être estimé à partir des grandeurs estimées du flux $\Phi_{s\alpha}, \Phi_{s\beta}$ et les grandeurs calculées du courant $I_{s\alpha}, I_{s\beta}$ [26] :

$$C_{em} = P(\Phi_{s\alpha} i_{s\beta} - \Phi_{s\beta} i_{s\alpha}) \quad (\text{III.30})$$

De cette équation, on peut remarquer que l'exactitude du module du couple électromagnétique dépend de la qualité de l'estimation du flux et de la précision de la mesure des courants statoriques. [32]

III.7 Elaboration du vecteur de commande

III.7.1 Correcteur du flux de la DTC à deux niveaux

L'objectif de cette correction est de conserver l'amplitude du flux statorique dans une bande et de maintenir ainsi l'extrémité de ce dernier dans une couronne circulaire comme le montre la figure (III.9).

La sortie du correcteur doit indiquer le sens d'évolution du module du flux. Les deux seuils du comparateur sont choisis suivant l'ondulation tolérée par le flux statorique. On peut écrire alors [30] :

$$\begin{cases} Si \ \Delta\Phi_s > \varepsilon_\Phi & \text{alors } C_{lfx} = 1 \\ Si \ 0 \leq \Delta\Phi_s \leq \varepsilon_\Phi \ \text{et} \ \frac{d\Delta\Phi_s}{dt} > 0 & \text{alors } C_{lfx} = 0 \\ Si \ 0 \leq \Delta\Phi_s \leq \varepsilon_\Phi \ \text{et} \ \frac{d\Delta\Phi_s}{dt} < 0 & \text{alors } C_{lfx} = 1 \\ Si \ \Delta\Phi_s < -\varepsilon_\Phi & \text{alors } C_{lfx} = 0 \end{cases}$$

$C_{lfx} = 0$ Signifie qu'il faut réduire le flux.

$C_{lfx} = 1$ Signifie qu'il faut augmenter le flux.

Ce régulateur à hystérésis à deux niveaux convient parfaitement pour avoir des bonnes performances dynamiques.

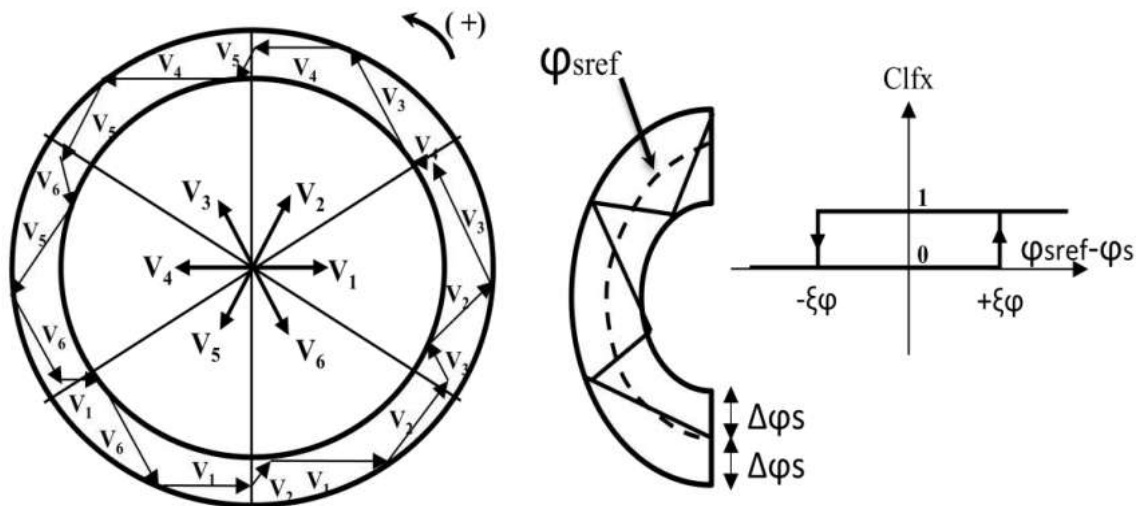


FIGURE III.9 – Contrôleur à hystérésis à deux niveaux et sélection des tensions correspondant. [31]

On suppose que le vecteur flux statorique est située dans le secteur 1 et tournant dans la sens positif, on peut constater que :

- Pour augmenter l'amplitude du flux statorique, on peut appliquer les vecteurs de tension V_1 , V_2 ou V_6 .
- Pour diminuer l'amplitude du flux statorique, on peut appliquer l'un des trois vecteurs V_3 , V_4 ou V_5 .

Les vecteurs (V_1 , V_2 , V_6) possèdent une composante V_s positive, par conséquent, ils contribuent à l'augmentation du module du flux. Par contre, les vecteurs (V_3 , V_4 , V_5) possèdent une composante V_s négative permettant de diminuer le module de flux. Le tableau (III.1) illustre les vecteurs de tension à appliquer pour augmenter ou diminuer l'amplitude de flux statorique dans chaque secteur.

Secteur	Φ_s croit	Φ_s décroît
N1	$V_1 V_2 V_6$	$V_3 V_4 V_5$
N2	$V_1 V_2 V_3$	$V_4 V_5 V_6$
N3	$V_2 V_3 V_4$	$V_1 V_5 V_6$
N4	$V_3 V_4 V_5$	$V_1 V_2 V_6$
N5	$V_4 V_5 V_6$	$V_1 V_2 V_3$
N6	$V_1 V_5 V_6$	$V_2 V_3 V_4$

TABLE III.1 – Table de contrôle de flux.[31]

III.7.2 Correcteur du couple de la DTC à trois niveaux

Le correcteur de couple a pour but de maintenir le couple dans sa bande d'hystérésis et d'imposer ainsi l'amplitude des ondulations du couple.

Pour mieux contrôler le couple dans les quatre cadrans de fonctionnement sans intervention sur la structure 'Takahashi' a proposé un correcteur à hystérésis à trois niveaux.

Ce correcteur permet de commander la machine dans les deux sens de rotation avec un couple positif ou négatif, ce comparateur est modélisé par l'algorithme suivant[30][31] :

$$\left\{ \begin{array}{ll}
 Si \ \Delta C_e > \varepsilon_{ce} & \text{alors } C_{cpl} = 1 \\
 Si \ 0 \leq \Delta C_e \leq \varepsilon_{ce} \ \text{et} \ \frac{d\Delta C_e}{dt} > 0 & \text{alors } C_{cpl} = 0 \\
 Si \ 0 \leq \Delta C_e \leq \varepsilon_{ce} \ \text{et} \ \frac{d\Delta C_e}{dt} < 0 & \text{alors } C_{cpl} = 1 \\
 Si \ \Delta C_e < -\varepsilon_{ce} & \text{alors } C_{cpl} = -1 \\
 Si \ -\varepsilon_{ce} \leq \Delta C_e \leq 0 \ \text{et} \ \frac{d\Delta C_e}{dt} > 0 & \text{alors } C_{cpl} = 0 \\
 Si \ -\varepsilon_{ce} \leq \Delta C_e \leq 0 \ \text{et} \ \frac{d\Delta C_e}{dt} < 0 & \text{alors } C_{cpl} = -1
 \end{array} \right.$$

- $C_{cpl}=-1$ signifie que le couple est inférieur à la limite inférieure de la bande et il faut donc l'augmenter.
- $C_{cpl}=0$ signifie que le couple est à l'intérieur de la bande et il faut donc le maintenir.
- $C_{cpl}=1$ signifie que le couple est supérieur à la limite supérieure de la bande et il faut le diminuer.

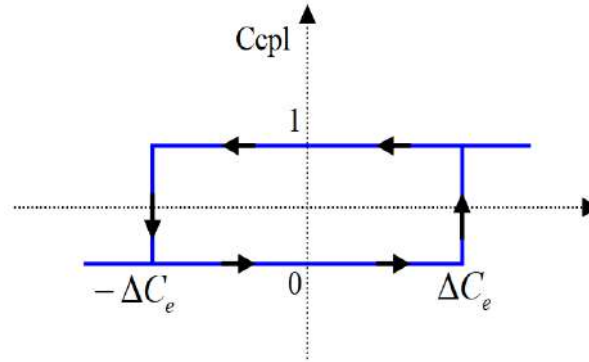


FIGURE III.10 – Contrôle du couple électromagnétique à l'aide d'un comparateur à hystérésis à trois niveaux.[25]

On note aussi que l'utilisation d'un correcteur à deux niveaux est possible, mais il n'autorise le contrôle du couple que dans un seul sens de rotation.

Avec ce correcteur, pour inverser le sens de rotation de la machine il est nécessaire de croiser deux phases de la machine.

Cependant ce correcteur est plus simple à implanter. De plus en sélectionnant correctement les vecteurs nuls suivant les zones N_i , on s'aperçoit que pour chaque zone i , il y a un bras de l'onduleur qui ne commute pas, et permet ainsi de diminuer la fréquence moyenne de commutation des interrupteurs et par conséquent, on diminue les pertes par commutation au niveau de l'onduleur.

Le tableau(III.2) illustre les vecteurs de tension à appliquer pour augmenter ou diminuer le couple électromagnétique dans chaque secteur[31].

Secteur	C_{em} croit	C_{em} décroît
N1	$V_2 V_3$	$V_5 V_6$
N2	$V_3 V_4$	$V_1 V_6$
N3	$V_4 V_5$	$V_1 V_2$
N4	$V_5 V_6$	$V_2 V_3$
N5	$V_1 V_6$	$V_3 V_4$
N6	$V_1 V_2$	$V_4 V_5$

TABLE III.2 – Table de commande du couple.[31]

III.7.3 Elaboration de la table de commande

En fonction du secteur et de l'évolution du flux et du couple on peut choisir le vecteur tension V_s à appliquer de manière à respecter la consigne de flux et de couple. La table de vérité permettant de choisir le vecteur adéquat est représentée dans tableau III.3.Ce dernier est élaboré en se basant sur les erreurs de flux $\Delta\Phi_s$ et de couple ΔC_e et selon la position du vecteur de flux statorique ($i=1,\dots,6$).

Le tableau conventionnel(III.3) des séquences ci-dessous, proposé par Takahashi pour contrôler le flux statorique et le couple électromagnétique de la machine asynchrone est le suivant[27] :

$\Delta\Phi_s$	ΔC_e	Secteur					
		S1	S2	S3	S4	S5	S6
1	1	V2(1,1,0)	V3(0,1,0)	V4(0,1,1)	V5(0,0,1)	V6(1,0,1)	V1(1,0,0)
	0	V7(1,1,1)	V0(0,0,0)	V7(1,1,1)	V0(0,0,0)	V7(1,1,1)	V0(0,0,0)
	-1	V6(1,0,1)	V1(1,0,0)	V2(1,1,0)	V3(0,1,0)	V4(0,1,1)	V5(0,0,1)
0	1	V3(0,1,0)	V4(0,1,1)	V5(0,0,1)	V6(1,0,1)	V1(1,0,0)	V2(1,1,0)
	0	V0(0,0,0)	V7(1,1,1)	V0(0,0,0)	V7(1,1,1)	V0(0,0,0)	V7(1,1,1)
	-1	V5(0,0,1)	V6(1,0,1)	V1(1,0,0)	V2(1,1,0)	V3(0,1,0)	V4(0,1,1)

TABLE III.3 – Tableau de la DTC conventionnelle définissant les séquences d'un onduleur.[25]

Les séquences nulles V0 et V7, sont indépendantes de l'état du flux, elles sont liées uniquement à l'écart ΔC_e . Ces séquences sont appliquées lorsqu'on souhaite maintenir le couple dans sa bande : $\varepsilon_{ce} \leq \Delta C_e \leq \varepsilon_{ce}$.

III.8 Gestion de la trajectoire de vitesse du tramway

Pour connaître l'évolution de la position du tramway, il ne reste qu'un élément à déterminer, qui aura une importance majeure : la position du manipulateur de traction/freinage le conducteur de tramway dispose à bord de son engin d'un manipulateur de traction-freinage, En position neutre, l'effort est nul et le tramway marche sur l'erre, c'est-à-dire qu'il profite de l'énergie cinétique qu'il a accumulé pour continuer à avancer. En poussant le manipulateur, le tramway accélérera alors qu'en le tirant vers lui, le tramway freinera.

Durant les phases d'accélération, le conducteur va chercher à prendre de la vitesse, mais plusieurs paramètres vont limiter cette accélération :

- Le couple maximal de traction du moteur, lui même lié à la vitesse et à la tension.
- La résistance à l'avancement.
- La vitesse maximale autorisée sur le canton V_{max} .
- La vitesse de rotation maximale du moteur Ω_{max} .
- Les paramètres limites de confort :
 - Accélération maximale au démarrage $a_{d\ max}=1.3\ m.s^{-2}$.
 - Décélération maximale au freinage $a_{f\ max}=-2\ m.s^{-2}$.

Pour l'aider dans sa tâche, le système de gestion de la trajectoire de vitesse permet de calculer le couple de référence qui tient compte des conditions précédentes. un algorithme de commande va adapter la consigne du pilote pour s'assurer que les contraintes sont bien respectées.

III.9 Structure générale de la commande direct du couple des moteurs de tramway

La structure entière de la commande directe du couple appliquée aux onduleurs à deux niveaux pour les moteurs de tramway est représentée dans la figure (III.11). Après la détermination des cordonnées du vecteur flux statorique, par estimation en intégrant directement les tensions statoriques, on peut estimer le couple à l'aide de l'équation (III.30)

en mesurant les courants statoriques. L'erreur instantanée du couple est ensuite calculée et appliquée à un régulateur hystérésis à double bande, générant à sa sortie la variable ΔC_{em} à trois niveaux (-1, 0, 1), représentative du sens d'évolution souhaité pour le couple. De même, le module du vecteur flux statorique est calculé à partir des valeurs de ses coordonnées et l'erreur du flux statorique injectée dans un régulateur hystérésis à bande unique, générant à sa sortie la variable binaire $\Delta \Phi_s$ représentative de l'évolution souhaitée pour le flux. La variable Θ correspond à une discrétisation du plan de phase et identifie le secteur angulaire dans lequel se trouve le flux statorique[31].

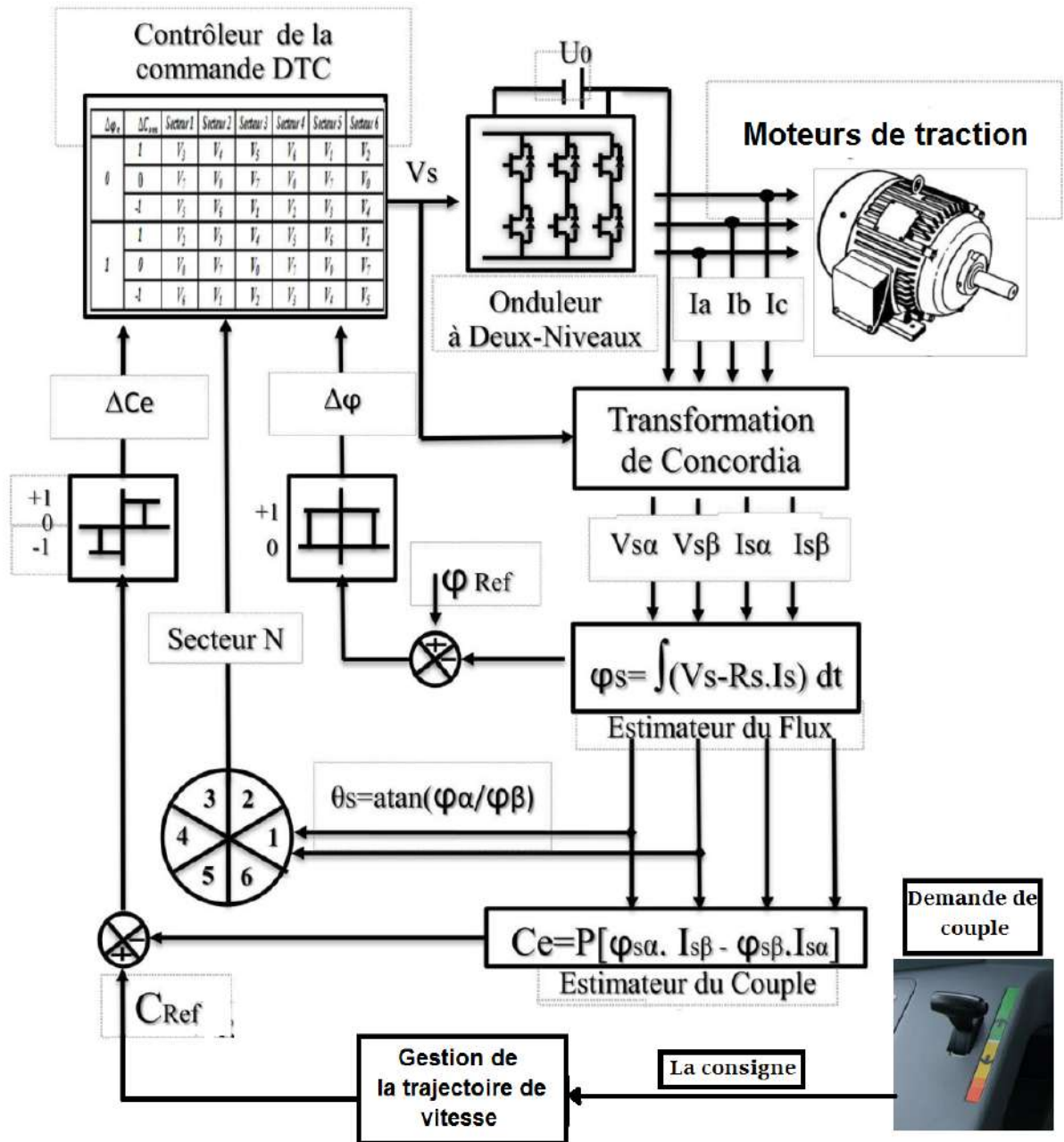


FIGURE III.11 – Schéma synoptique de la commande Direct du Couple des moteurs du tramway.

III.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principes de bases de la commande direct du couple appliquée sur les moteurs de tramway. on a conclu que cette commande se base sur l'orientation du vecteur flux statorique par l'action directe sur l'état des interrupteurs d'onduleur de tension. La détermination de la séquence de commande appliquée aux interrupteurs de l'onduleur est généralement basée sur l'utilisation de régulateurs à hystérésis dont la fonction est de contrôler l'état du système. Aussi que le couple de référence est calculé par le système de gestion de trajectoire de vitesse pour assurer le respect des contraintes de conduite.

Chapitre IV

Modélisation et simulation de l'alimentation électrique du tramway

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, on va faire dans la première partie, une simulation du réseau d'alimentation du tramway de Ouargla à partir de la première source GRTE 60 kV jusqu'à ce qu'il atteigne les lignes aériennes qui alimentent la chaîne de traction qu'on va modéliser et simuler dans la deuxième partie avec la commande direct du couple des moteurs du tramway.

On va obtenir les résultats de simulation sous l'environnement Matlab/Simulink, c'est un logiciel de modélisation d'un système multi-physique, Il peut effectuer la modélisation mathématique ainsi que la modélisation basée sur des composants réels.

IV.2 Simulation du réseaux de l'alimentation du tramway

IV.2.1 Le transformateur

Le transformateur est une machine électrique statique, appelé aussi convertisseur statique à induction, il est un convertisseur « alternatif-alternatif » qui permet de modifier la valeur d'une tension alternative en maintenant sa fréquence et sa forme inchangées[33].

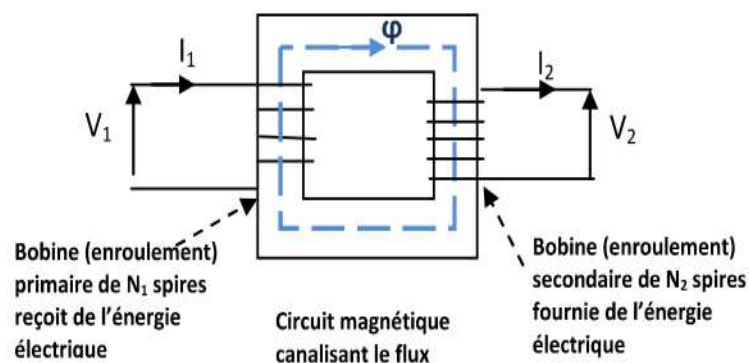


FIGURE IV.1 – Transformateur monophasé.[34]

Le transformateur est constitué de deux enroulements (ou plus) couplés sur un noyau magnétique, comme à la figure (IV.1). Le cote de la source est appelée le primaire, et

a N_1 enroulements de fils (tours). Le cote de la charge est appelé le secondaire et a N_2 enroulements. Le flux ϕ est le flux mutuel. Il faut remarquer qu'il n'existe aucune connexion électrique entre le primaire et le secondaire. Tout le couplage entre les deux enroulements est magnétique[35].

Lorsqu'on applique une tension alternative à la source, ceci crée un flux alternatif dans le noyau magnétique. Selon la loi de Faraday, ce flux crée des forces électromotrices dans les bobines. La force électromotrice induite est proportionnelle au nombre de tours dans la bobine et au taux de variation du flux. Selon le rapport du nombre de tours entre le primaire et le secondaire, le secondaire alimente la charge avec une tension différentes de celle de la source. Le rapport de transformation d'un transformateur, symbolisé par "m", se définit comme [34] :

$$m = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (\text{IV.1})$$

IV.2.1.1 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(Y), en triangle(D) ou en zigzag(Z)[2].

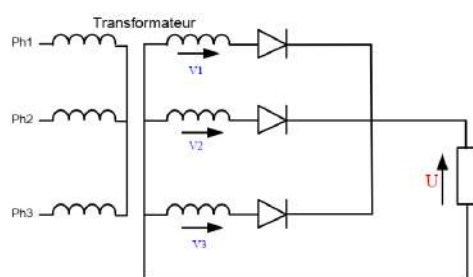
IV.2.1.2 Les Transformateurs triphasé à deux secondaires

Transformateur comportant un circuit primaire doté de trois bobines primaires disposées selon une configuration en étoile(Y), ou triangle(D) et un circuit secondaire comportant trois premières bobines secondaires et trois secondes bobines secondaires distinctes des premières bobines secondaires[36].

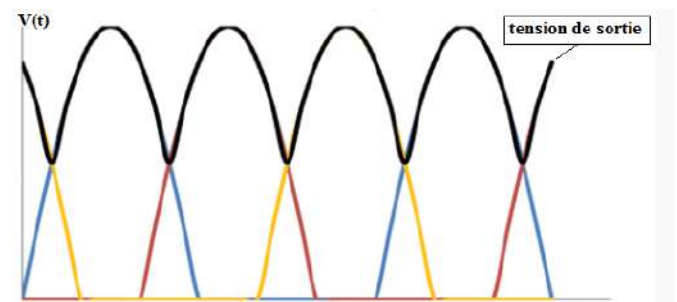
IV.2.2 Le redresseur

Un redresseur, également appelé convertisseur alternatif/continu, est un convertisseur destiné à alimenter une charge qui nécessite de l'être par une tension ou un courant continu à partir d'une source alternative. L'alimentation est, la plupart du temps, un générateur de tension[37].

IV.2.2.1 Le redressement triphasé simple alternance (P3)



(a) Redresseur demi-pont



(b) La tension de sortie

FIGURE IV.2 – Redressement triphasé simple alternance.[38]

La figure (IV.2a) montre le schéma d'un redresseur demi-onde triphasé utilisant des diodes et alimenté par un secondaire configuré en étoile d'un transformateur. Cela produit la forme représentée sur la figure (IV.2b) [38]. La valeur moyenne de tension est :

$$U_{moy} = \frac{3\sqrt{3}V}{2\pi} \quad (IV.2)$$

IV.2.2.2 Le redressement triphasé double alternance (PD3)

Le pont triphasé ou redresseur Graetz est représenté sur figure (IV.3a). Le pont peut être alimenté à partir d'un secondaire en étoile ou en triangle. Le redresseur produit une forme d'onde à 6 impulsions du type illustré sur la figure(IV.3b)[38].

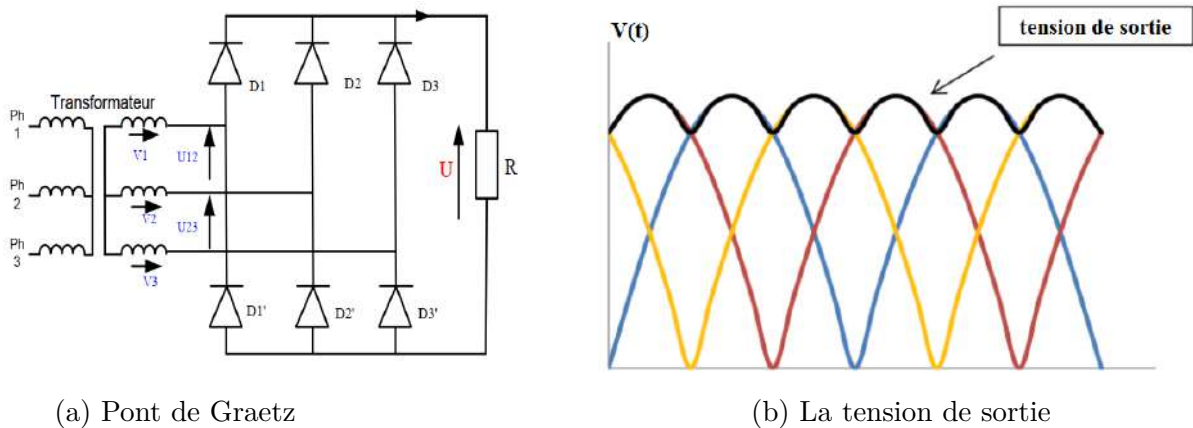


FIGURE IV.3 – Redressement triphasé double alternance.[38]

La valeur moyenne de tension de sortie est :

$$U_{moy} = \frac{3\sqrt{3}\hat{U}}{\pi} \quad (IV.3)$$

IV.2.2.3 Le redresseur dodécaphasé

Un redresseur dodécaphasé utilise un transformateur à double secondaire étoile triangle, selon le montage de la figure ci-dessous :

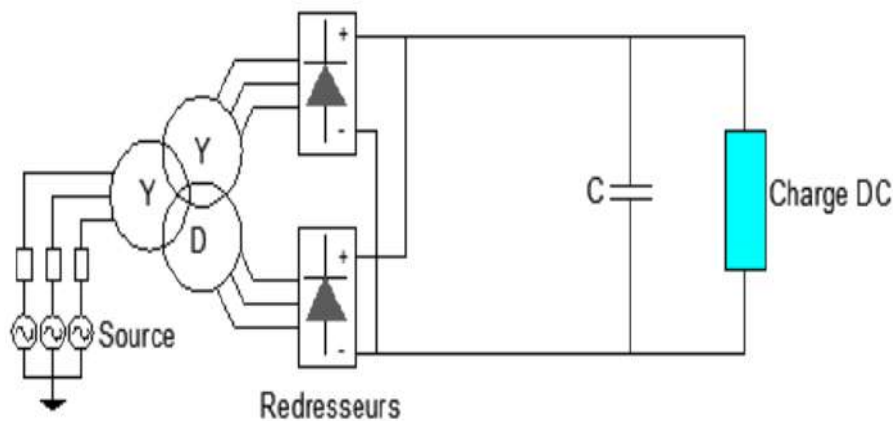


FIGURE IV.4 – Redresseur dodécaphasé.[39]

Les enroulements secondaires dans les configurations en étoile et en triangle sont connectés à des ponts triphasés et la sortie est connectée en parallèle ou en série. L'angle de phase entre les tensions secondaires étoile et triangle est de 30°. [38].

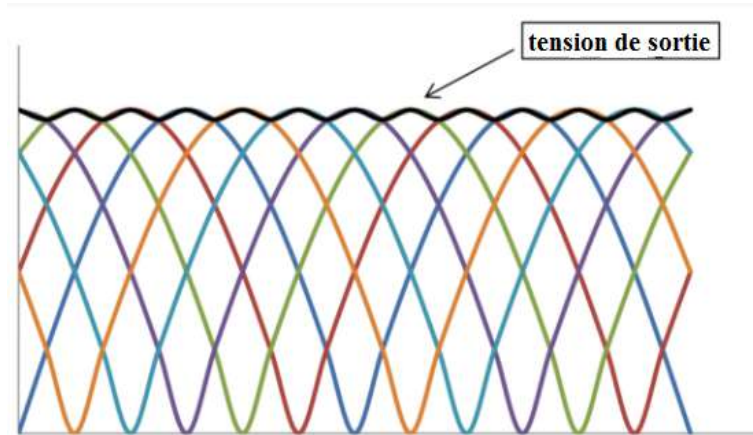


FIGURE IV.5 – Tension de sortie du redresseur dodécaphasé. [38]

La tension de sortie variera entre \hat{U} et $0,96\hat{U}$ donc la valeur moyenne de tension est : [38]

$$U_{moy} = \frac{1,96\hat{U}}{2} \quad (IV.4)$$

IV.2.3 Simulation du poste haute tension

Le poste haute tension se compose d'un transformateur triphasé traditionnel YNd11 assure la transformation de tension entre 60KV/30KV.

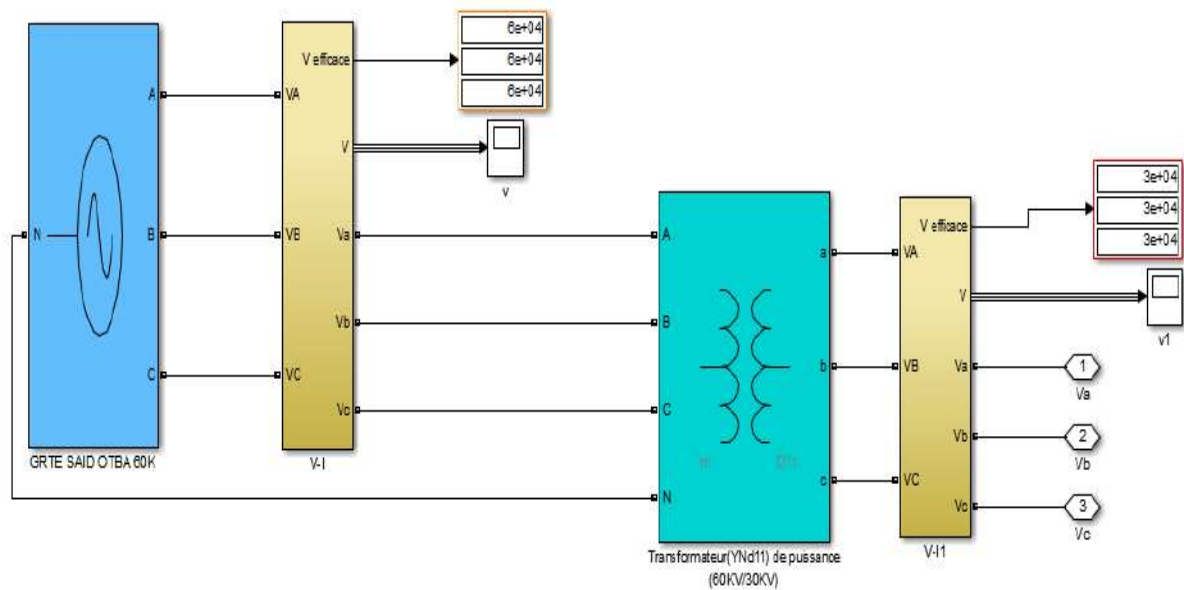
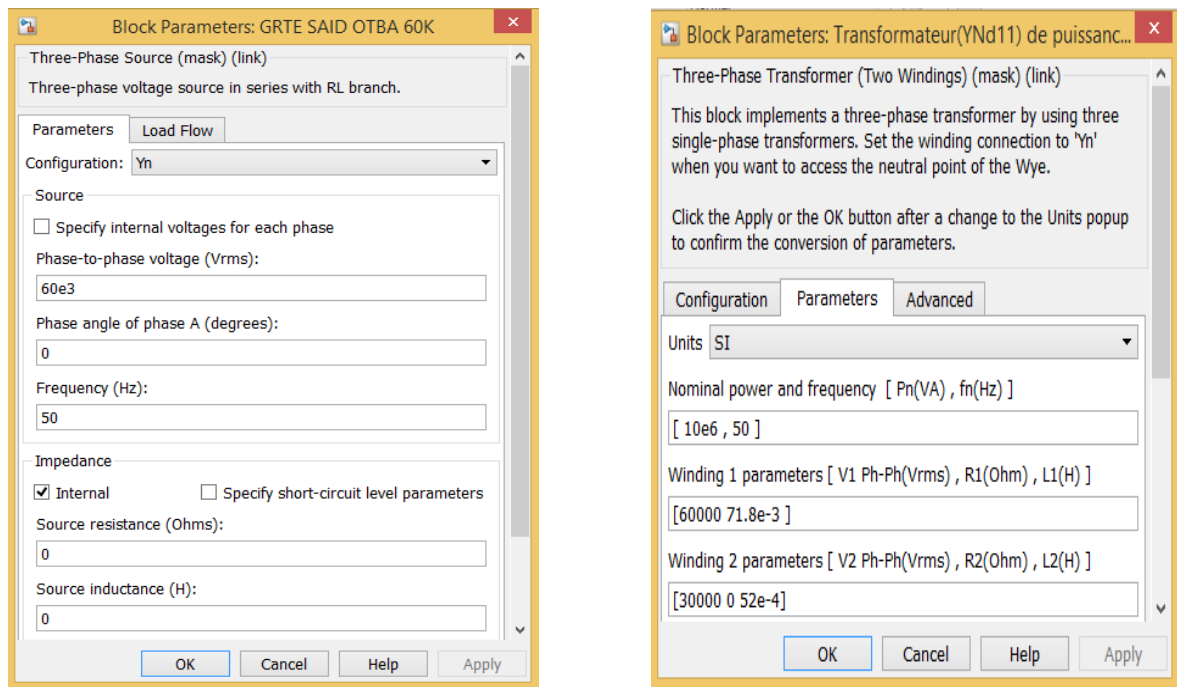


FIGURE IV.6 – Simulation du poste haute tension

La simulation a été réalisée avec les paramètres des blocs suivantes :



(a) La source triphasée

(b) Transformateurs triphasés

FIGURE IV.7 – Les paramètres des blocs

IV.2.4 Simulation de la sous-station

La sous-station se compose d'un transformateur de traction Ddyn assure la transformation de tension entre 30KV/(2×585)V.et un redresseur de traction de type dodecaphasé a diode.La sous-station est alimentée par 30 KV de la sortie de PHT .

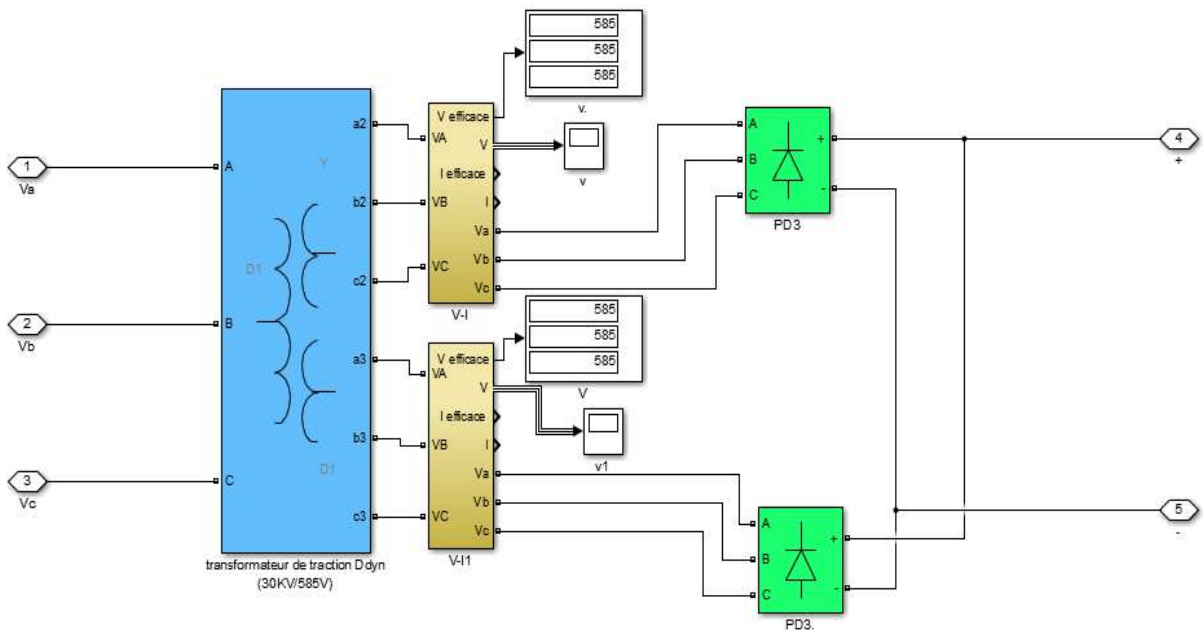
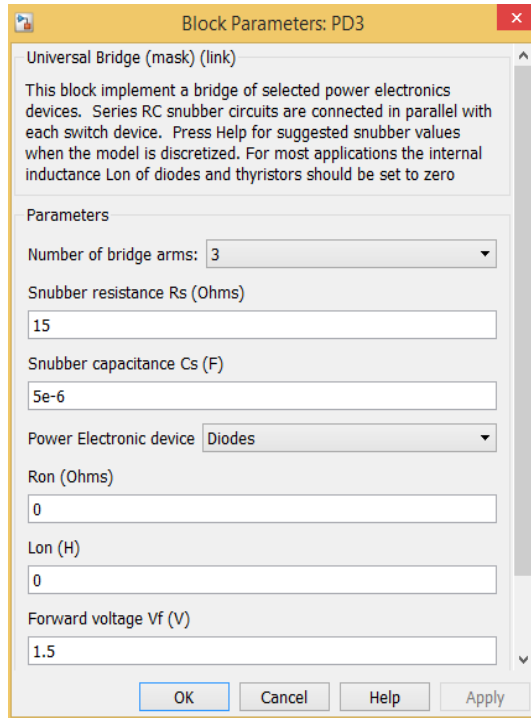
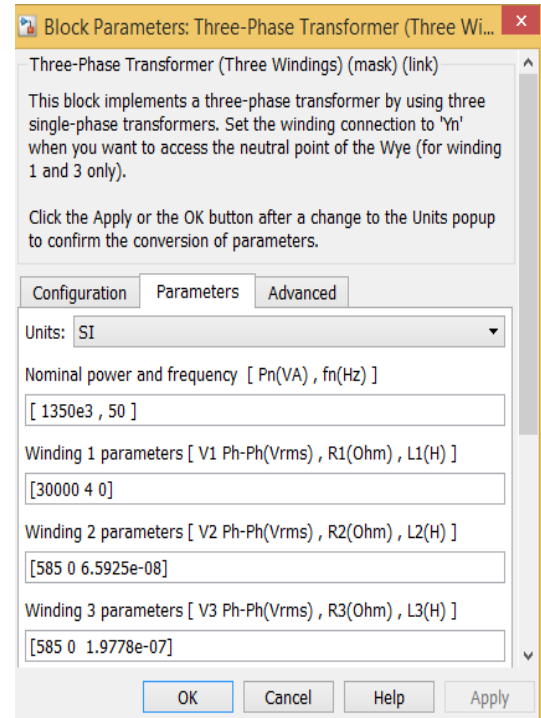


FIGURE IV.8 – Simulation de la sous-station

La simulation a été réalisée avec les paramètres des blocs suivantes :



(a) Pont de Graetz



(b) transformateur de traction Ddyn

FIGURE IV.9 – Les paramètres des blocs

IV.3 Modélisation et simulation de la chaîne de traction du tramway

IV.3.1 Modélisation de la chaîne cinématique

IV.3.1.1 Le réducteur

Chaque bogie moteur comporte 2 transmissions. La transmission du couple entre le moteur et les roues est assuré par un réducteur à 2 étages de réduction.[12].

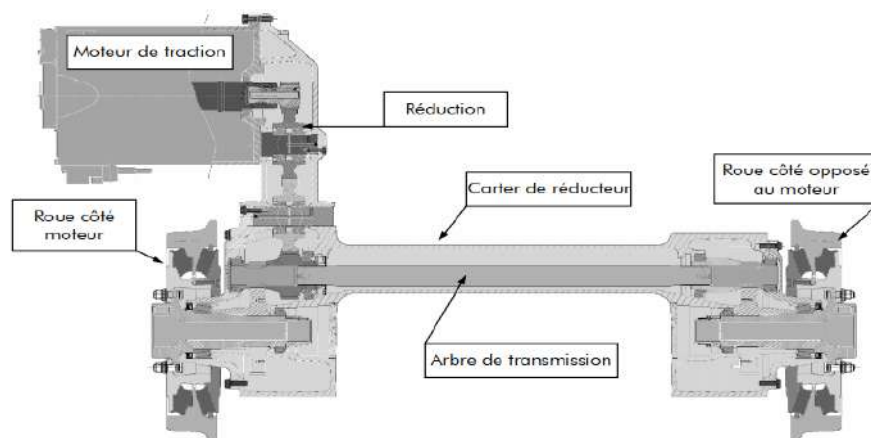


FIGURE IV.10 – La transmission du couple entre le moteur et les roues.[12]

Nous avons les équations suivantes, qui décrivent la transmission d'effort à travers le réducteur :

$$\begin{cases} \Omega_{\text{Roue}} = \Omega_{\text{moteur}} K_g \\ C_{\text{Roue}} = \frac{C_{\text{moteur}} \eta_g}{K_g} \end{cases} \quad (\text{IV.5})$$

La vitesse de déplacement en périphérie de la roue est liée à la vitesse de rotation de l'essieu par $V_r = r.\Omega_{\text{Roue}}$, où r représente le rayon de la roue. De même, le moment sur l'essieu est lié à la force sur la roue F_r par $C_e = F_r.r$.

pour le tramway de Ouargla le réducteur a un rendement $\eta_g = 96 \%$ et un rapport de réduction $kg = 0,1453$ avec le rayon de la roue $r=0.28 \text{ m}$, le moment d'inertie d'un groupe moteur-réducteur, ramené sur l'arbre de sortie du moteur 5.2 kg.m^2 .

Le modèle du réducteur illustré dans le figure ci-dessous :

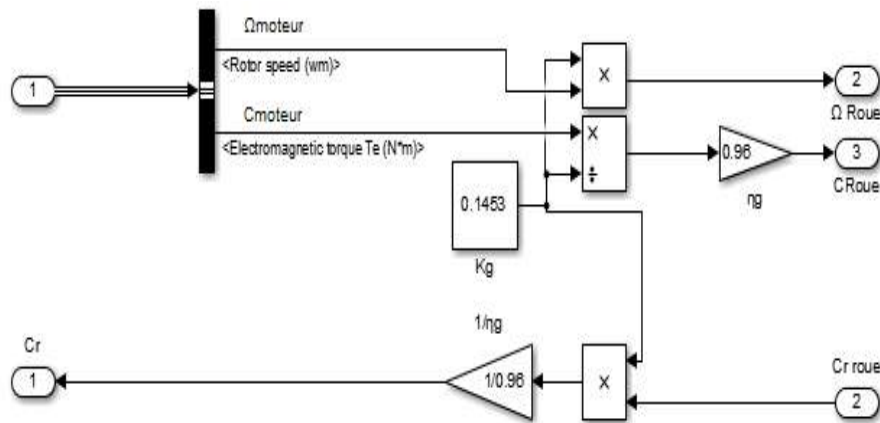


FIGURE IV.11 – Le modèle du réducteur

IV.3.1.2 Effort de résistance à l'avancement

Pour s'approcher plus de la réalité, nous donnerons dans cette partie des équations empiriques des forces qui s'opposent au mouvement du tramway. La force résistante est calculée à partir de la somme des forces suivantes [19] :

- Les frottements dus au mouvement du tramway.
- Force due aux déclivités.
- Force due aux courbures

IV.3.1.2.1 Les frottements dus au mouvement du tramway

Cette force de frottement est calculée grâce à la formule empirique suivante [7] :

$$F_t = A + BV_t + CV_t^2 \quad (\text{IV.6})$$

V_t : la vitesse de tramway(m/s)

Le terme A représente les frottements secs (loi de Coulomb), c'est à dire le roulement des roues sur les rails et les paliers; B ne prend en compte que la qualité de la voie et correspond un terme de frottements visqueux; C, enfin, représente les frottements aérodynamiques. Ces coefficients dépendent de la masse de tramway, de son nombre d'essieux et de son aérodynamisme. On supposera par la suite ces termes constants.

Pour le tramway de Ouargla(Citadis 402), ils sont donnés par le tableau (IV.1)

A	B	C
1552	40.32	8.0248

TABLE IV.1 – Coefficients de résistance à l'avancement pour une vitesse en m/s.[7]

IV.3.1.2.2 Force due aux déclivités

Elle représente la force tangentielle à la voie[7].

$$F_d = Mgsin(\alpha) \quad (IV.7)$$

Avec :

α :Représente l'angle d'inclinaison de la pente, défini positif lorsque le train gravit la ligne et négatif lorsqu'il la descend.

M :La masse de la rame.

IV.3.1.2.3 Force due aux courbures

Elle dépend du rayon de courbure et d'écartement de la voie[7].

$$F_c = Mg \frac{K_e}{r_v} \quad (IV.8)$$

Avec : ‘

K_e :Coefficient d'écartement dépendant de la largeur de la voie il est égal à 80 [m] pour un écartement de 1435

r_v :Le rayon de courbure de la ligne en [m]

Donc la force totale appliquée :

$$F_{res} = F_f + F_d + F_c \quad (IV.9)$$

Le couple résistant appliqué aux roues :

$$C_{res} = rF_{res} \quad (IV.10)$$

Le couple résistant est calculé à l'aide du modèle illustrée dans la figure ci-dessous :

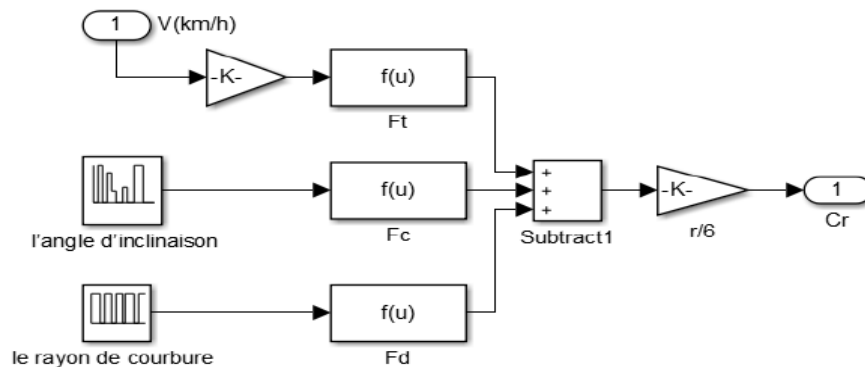


FIGURE IV.12 – Modèle du calcul du couple résistant

IV.3.2 Modélisation de la commande direct du couple

À partir des équations du chapitre III, on a modélisé la commande direct du couple par le modèle illustré dans les figures ci-dessous :

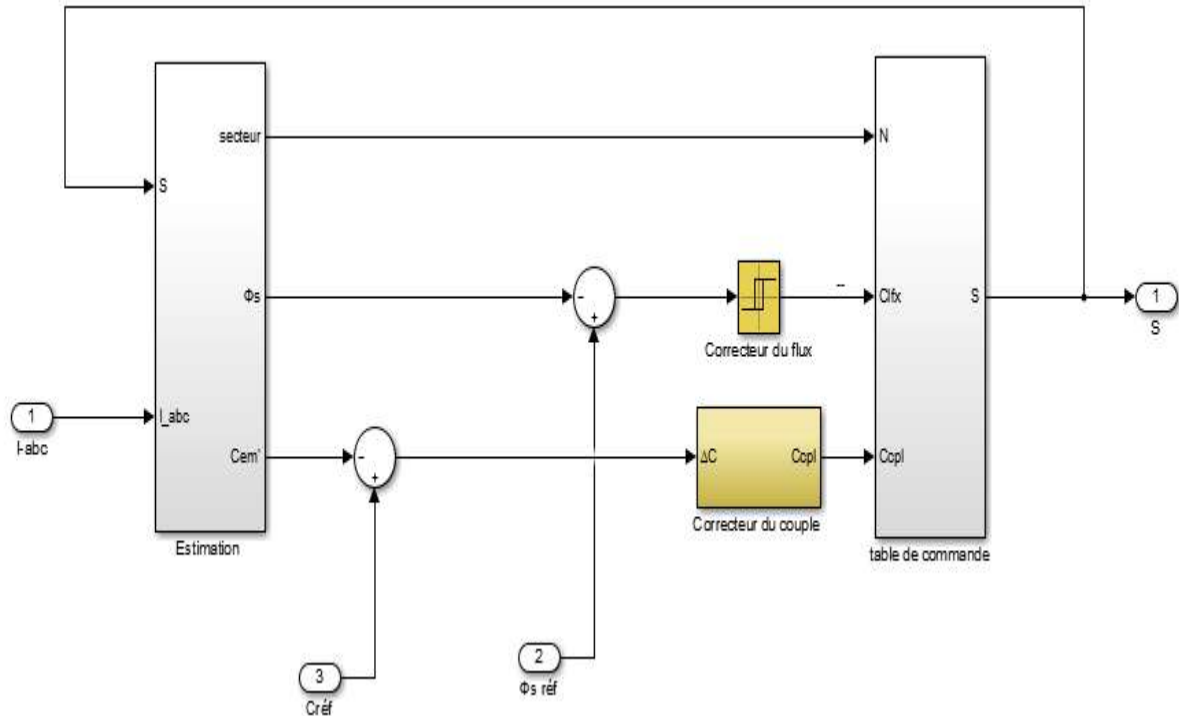


FIGURE IV.13 – La structure générale de DTC

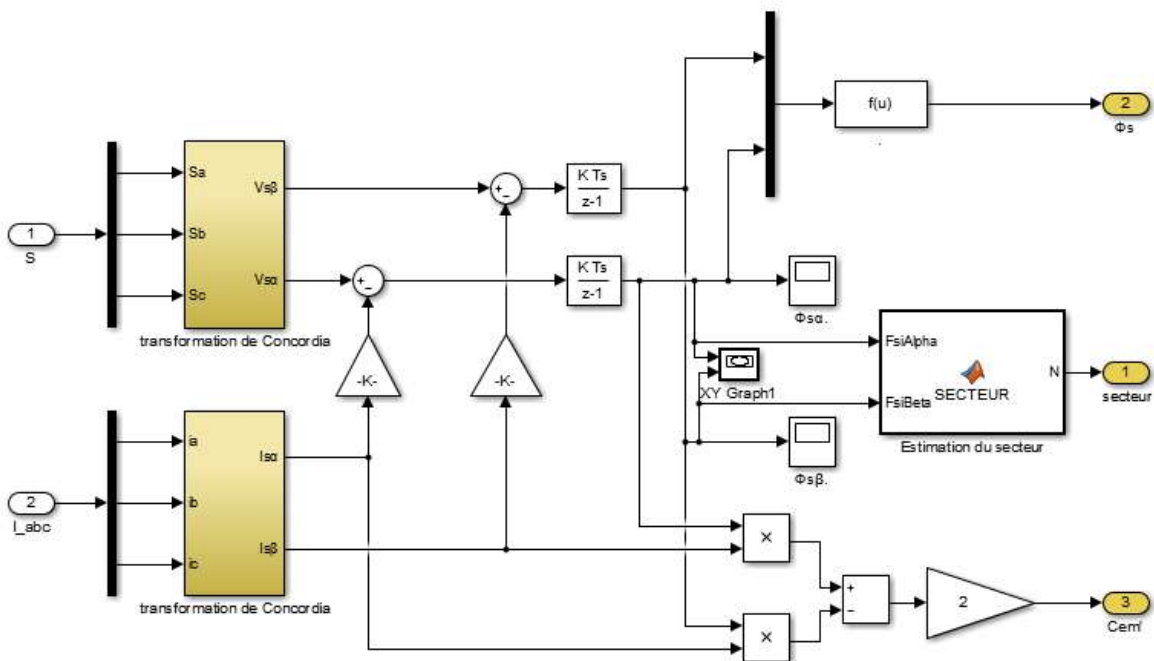


FIGURE IV.14 – Modèle d'estimateur

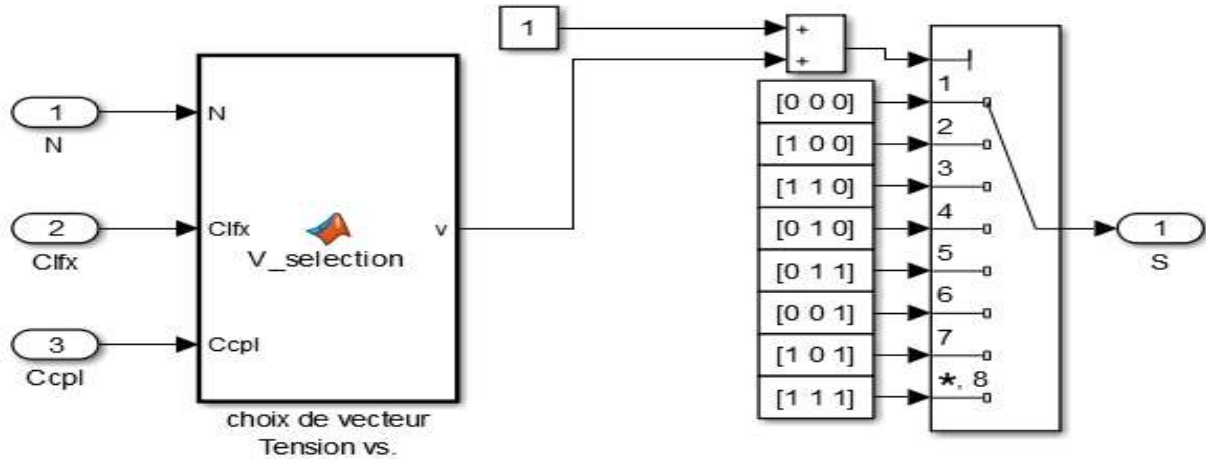


FIGURE IV.15 – Modèle du table de commande

IV.3.3 Modélisation de l'algorithme de gestion de la trajectoire de vitesse de tramway

On notera $\zeta \in [1, 1]$ l'image de la position du manipulateur. Ce terme représente l'action humaine de la conduite sur la rame, fixant les phases d'accélération et les phases de freinage. Le choix de ζ n'est pas anodin, en effet, le conducteur doit respecter les limitations de vitesse sur les différentes sections de la ligne, s'arrêter aux stations passagers, respecter les feux de signalisation, tout en respectant l'horaire qui lui est assigné et les limites de confort.

Pour le calcul du couple de référence l'algorithme est basé sur les étapes suivantes :

- Étape 1 : Détermination du couple demandé

$$C_a = \zeta \times C_{\max}$$

C_V : couple selon profil couple - vitesse.

$$C_d = \min(C_a, C_V)$$

- Étape 2 : Calcul de l'accélération.

$$a = \frac{C_d - C_r}{K.J} \quad (\text{K.J : Le moment d'inertie global ramené sur l'axe de la roue})$$

- Étape 3 : Vérification de l'accélération.

si $|a| \leq |a_{\max}|$ ($a_{d \max}$ ou $a_{f \max}$ selon la signe de ζ)

$$C_s = C_d$$

$$a_{\text{ref}} = a$$

sinon

$$C_s = a_{\max} \times K.J + C_r$$

$$a_{\text{ref}} = a_{\max}$$

- Étape 4 : Calcul de la vitesse .

$$V = V_{k-1} + a_{\text{ref}} \cdot dt$$

- Étape 5 : Calcul du couple de référence .

$$C_{\text{réf}} = C_s \times \text{signe}(\zeta)$$

Sur la base des étapes précédentes, nous avons fait le modèle suivant :

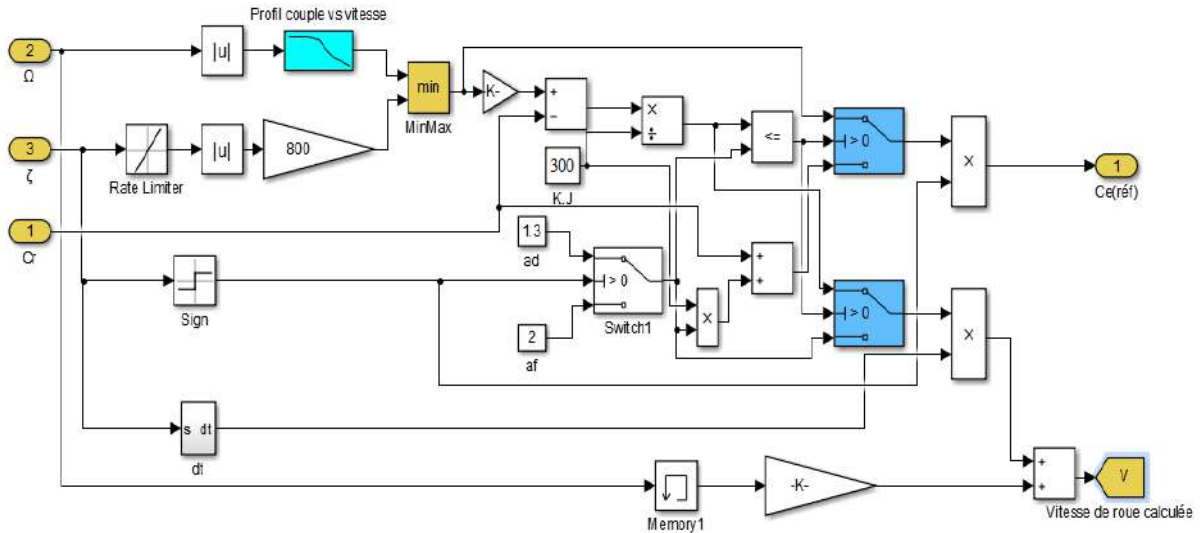


FIGURE IV.16 – Modèle de l'algorithme de gestion de la trajectoire de vitesse

IV.3.4 Simulation du bogie moteur

Le bogie moteur est contenu deux moteurs asynchrones triphasés type HGA1433, la transmission du couple entre le moteur et les roues est assurée par un réducteur, chaque moteur contient un capteur de vitesse, la vitesse des deux moteurs est comparée et la vitesse la plus basse est la vitesse du bogie.

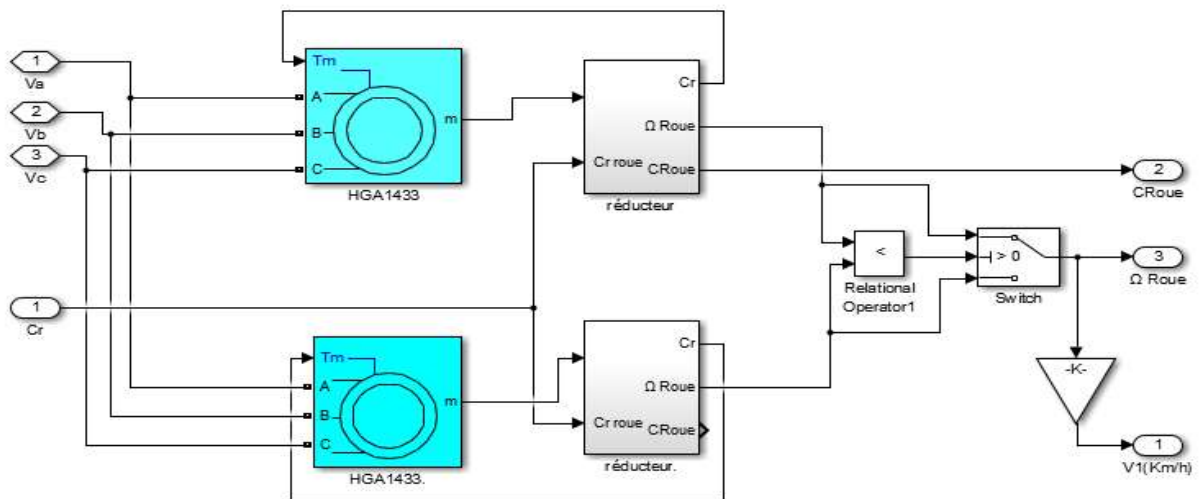


FIGURE IV.17 – Simulation du bogie moteur

Les paramètres du moteur sont illustrés dans le tableau ci-dessous :

$P_u(KW)$	$f(HZ)$	$U(V)$	P	$R_s(\Omega)$	$L_s(mH)$	$L_m(mH)$	$R_r(\Omega)$	$L_r(mH)$	$J(kg.m^2)$
180	88	500	2	0,0248	0,4563	8.5	0,0173	0,3042	6.2

TABLE IV.2 – Les paramètres du moteur asynchrone(HGA1433).[7]

IV.3.5 Simulation du hacheur de freinage

Les hacheurs opèrent une conversion continu-continu. placés entre un générateur et un récepteur, tous deux à courant continu, ils permettent de régler la tension appliquée au récepteur ou le courant qui y circule. entre le générateur et le récepteur.

Un hacheur de freinage est un interrupteur électrique qui limite la tension du bus CC en commutant l'énergie de freinage sur une résistance où l'énergie de freinage est convertie en chaleur. Les hacheurs de freinage sont automatiquement activés lorsque la tension réelle du bus CC dépasse 900V.

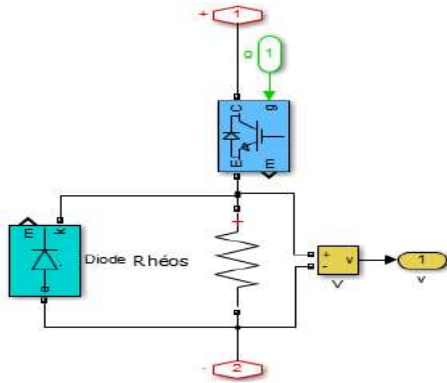


FIGURE IV.18 – Simulation du hacheur de freinage

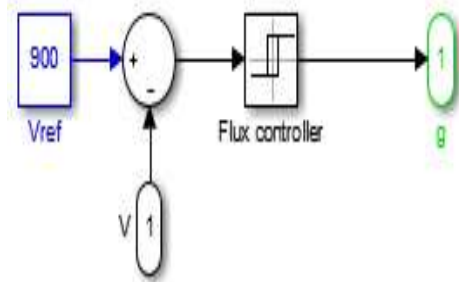


FIGURE IV.19 – La boucle de régulation de la tension du bus continu

IV.3.6 Simulation d'onduleur triphasé à deux niveaux

Nous avons simulé le onduleur avec des transistors IGBT. Pour réduire l'ondulation de la tension d'entrée, nous utilisons un filtre illustré sur la figure (IV.20). les Paramètres du filtre d'entrée sont illustrés dans le tableau ci-dessous :

C(mF)	L(mH)	r(mΩ)	Rdéch(Ω)
8.2	2	67	5000

TABLE IV.3 – Paramètres du filtre d'entrée

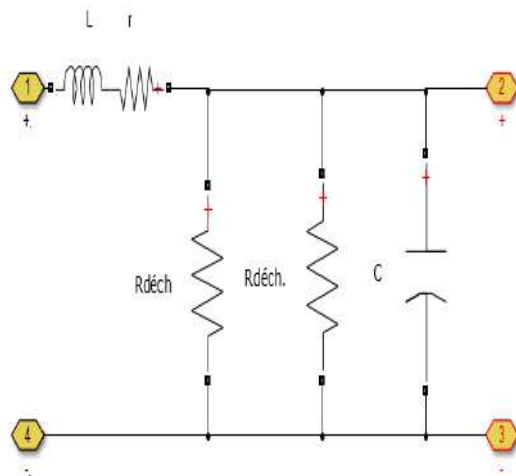


FIGURE IV.20 – Le filtre d'entrée

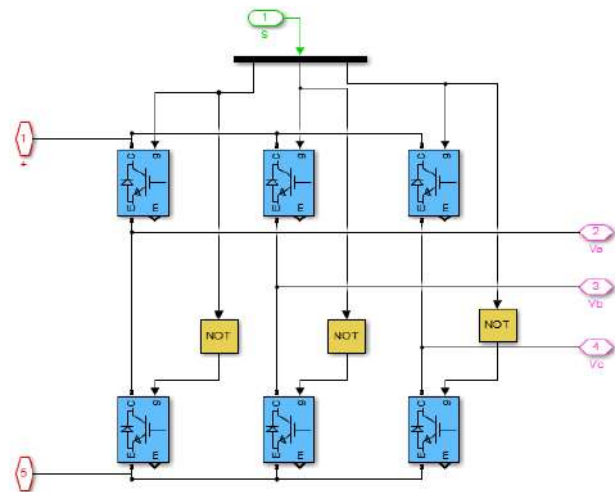


FIGURE IV.21 – Simulation d'onduleur

IV.3.7 Bloc de defluxage

Le bloc de defluxage permet de donner le flux de référence suivant la vitesse de rotation du moteur, en cas de survitesse le flux de référence doit diminuer, par rapport au flux max de la machine, qui va limiter le couple max de la machine donc on aura un fonctionnement à puissance constante. Si la valeur absolue de la vitesse de rotation du moteur est inférieure à la vitesse nominale le flux de référence est égale au flux max ce qui permet d'obtenir un couple nominal pour avoir des meilleurs dynamiques. Le bloc de defluxage est modélisé par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} si & |\Omega| \geq \Omega_{nominale} \\ \phi_{référence} = \frac{\Omega_{nominale}}{|\Omega|} \phi_{max} \\ si \text{ non} \\ \phi_{référence} = \phi_{max} \end{cases} \quad (IV.11)$$

pour le moteur de traction (4HGA1433) $\phi_{max} = 1 \text{ Wb}$.

IV.4 Les résultats de simulation du réseaux d'alimentation électrique du tramway

La simulation complète du réseaux d'alimentation électrique de tramway illustrée sur la figure ci-dessous :

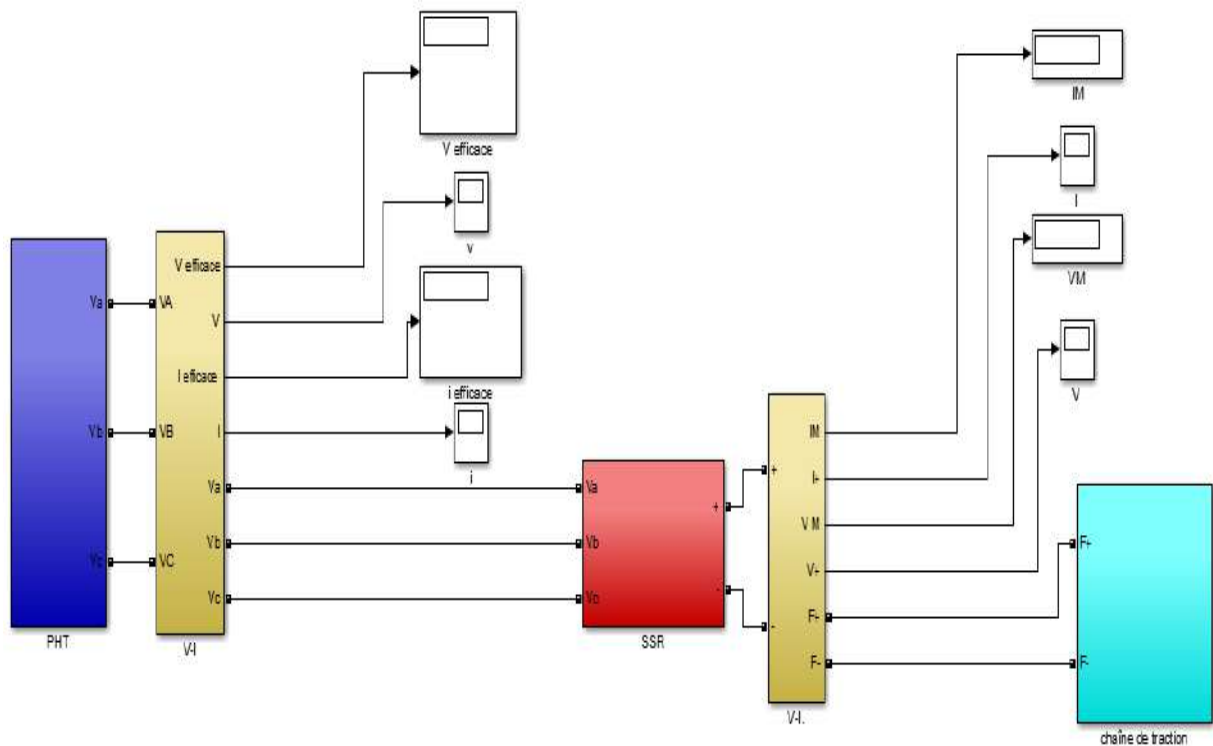
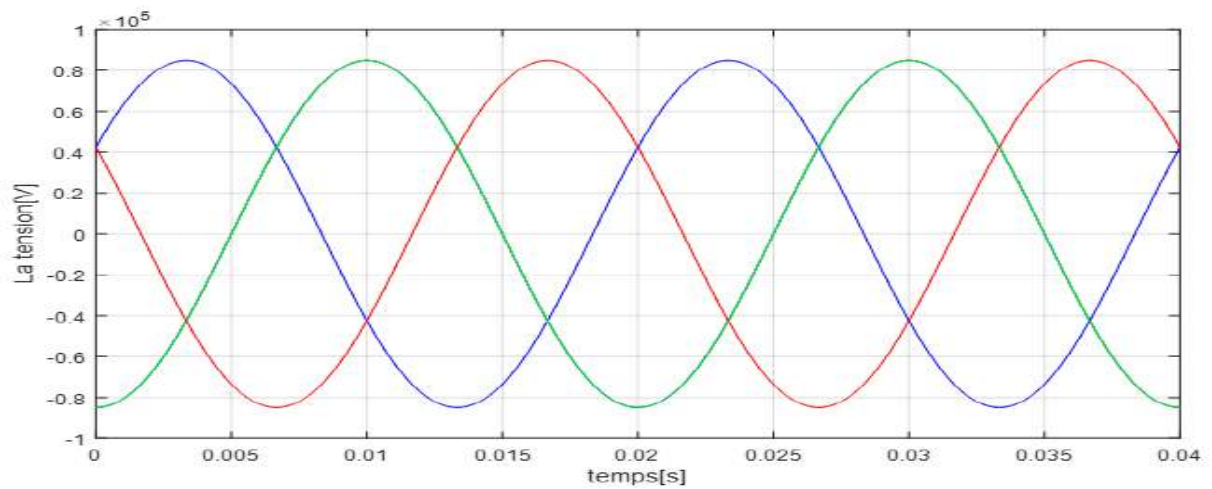
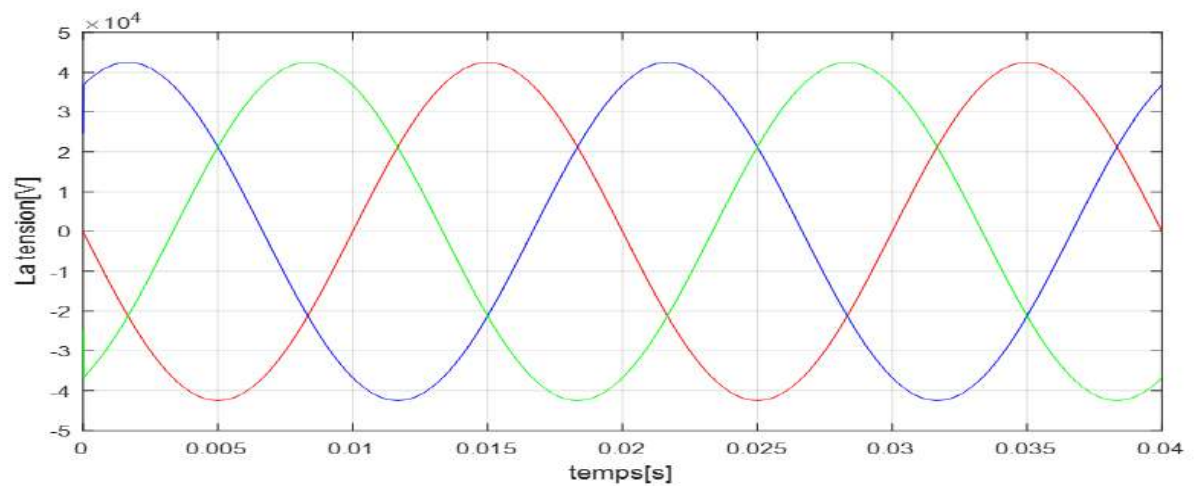


FIGURE IV.22 – La simulation complète du réseaux d'alimentation électrique de tramway

Après avoir lancer la simulation on obtient les résultats suivantes :



(a) La tension primaire du transformateur YNd11(l'arrivée de GRTE 60 kV)



(b) Tension secondaire du transformateur YNd11

FIGURE IV.23 – Les résultats de la simulation de PHT

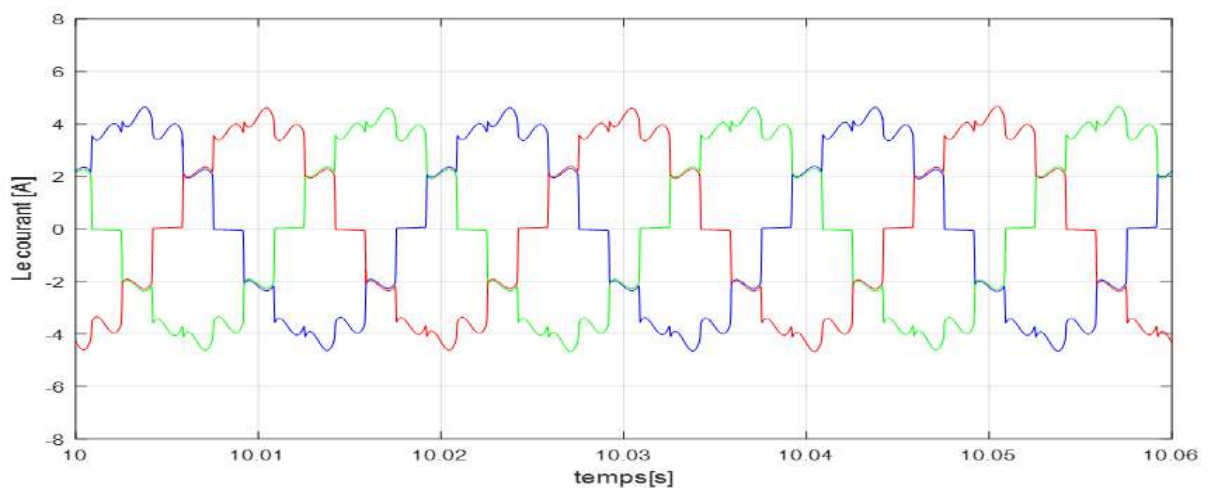
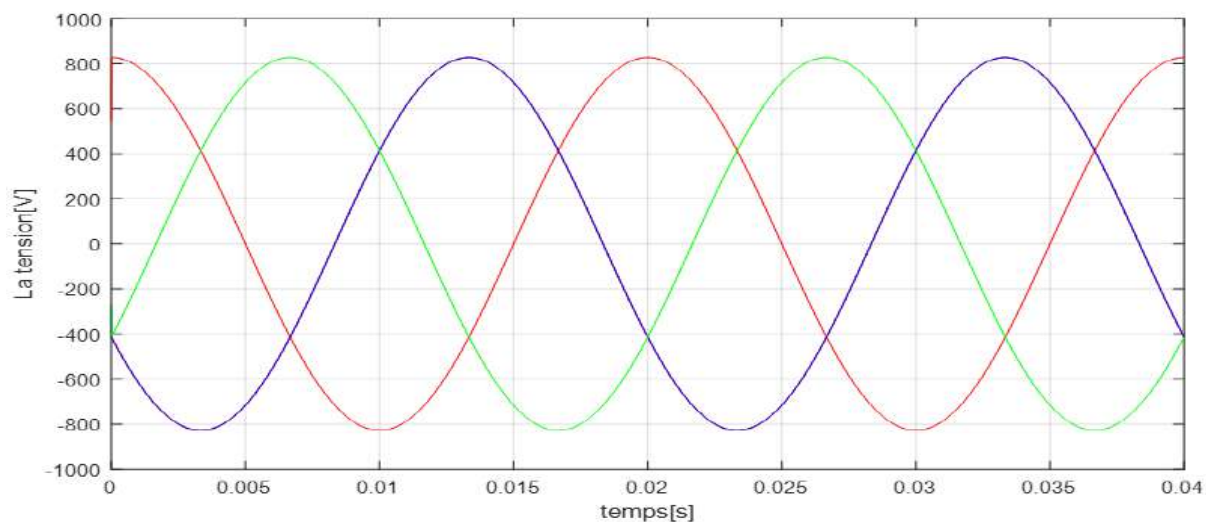
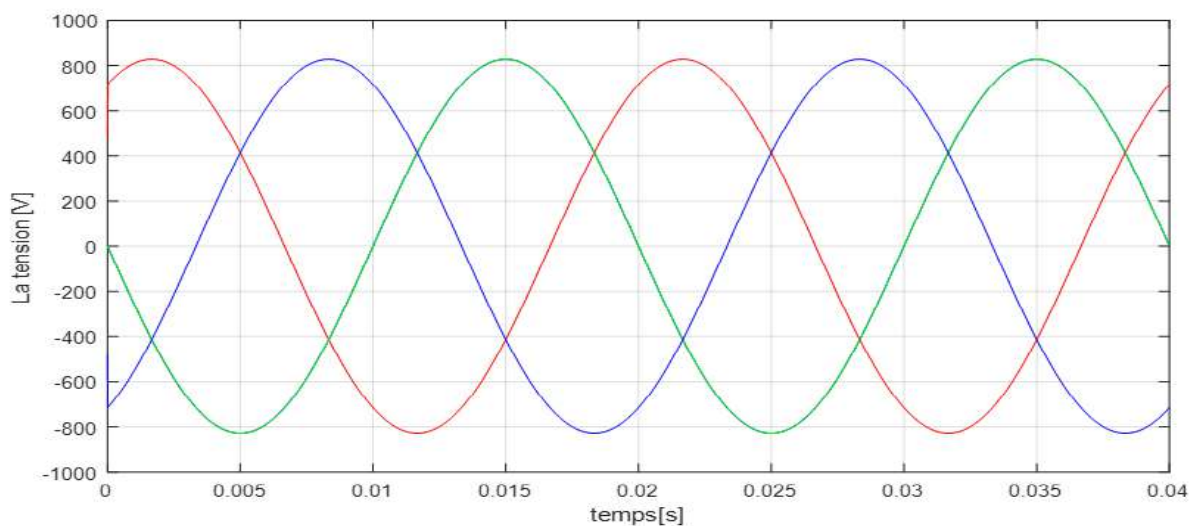


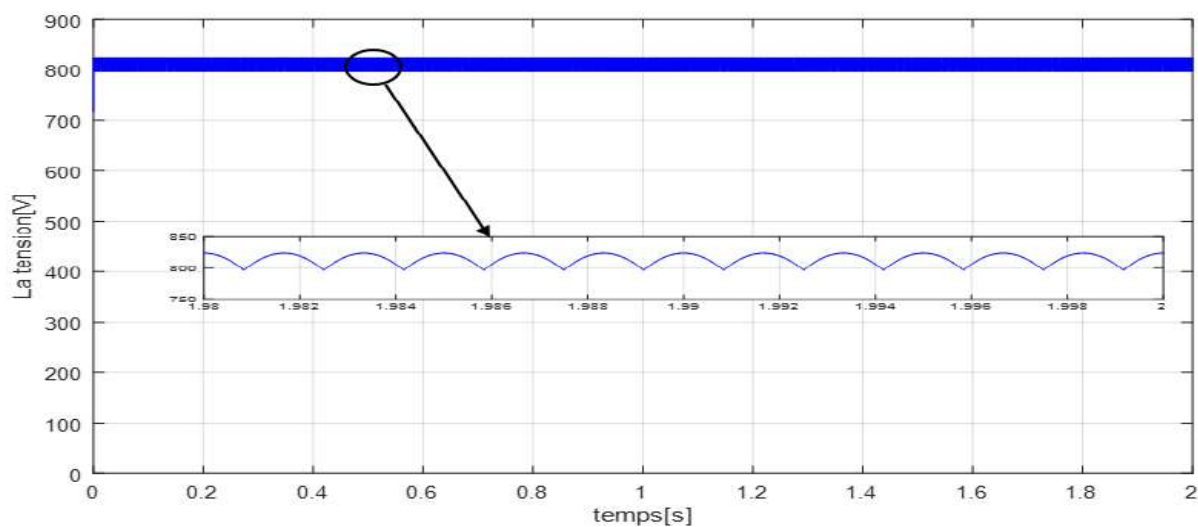
FIGURE IV.24 – Les courants d'entrée du transformateur Ddyn



(a) La tension composées de la sortie (étoile-yn-) du transformate Ddyn



(b) La tension composées de la sortie (triangle-d-) du transformate Ddyn



(c) La tension de la sortie du redresseur dodécaphasé (tension de LAC)

FIGURE IV.25 – Les résultats de la simulation de SSR

IV.4.1 Interprétation des résultats

Comme illustre la figure (IV.23), les résultats de simulation de PHT, on voit que la tension primaire (60KV) a été réduite à (30KV) au secondaire de transformateur Dyn11, cette tension réduite alimente le transformateur Ddyn à la SSR ,ce transformateur a baissé la tension à (585V),comme le montre les figures(IV.25a)(IV.25b),on peut remarquer un déphasage $\frac{\pi}{6}$ entre les tensions des deux secondaires(étoile -triangle). Les formes d'ondes des courants de l'entrée de ce transformateur sont présentées sur la figure (IV.24), on peut observer les 12 commutations des diodes des deux ponts redresseurs .

La figure (IV.25c) illustre la tension de la sortie du redresseur dodécaphasé,(tension de LAC),on peut remarquer que l'ondulation de la tension est faible grâce à l'utilisation d'un redresseur dodécaphasé.Par simulation,la tension moyenne de la sortie du redresseur dodécaphasé est 810.7V, Cette valeur peut être déterminer à l'aide de l'équation(IV.4) :

$$U_{moy} = \frac{1.96\hat{U}}{2} = \frac{1.96 \times \sqrt{2} \times V}{2} = \frac{1.96 \times \sqrt{2} \times 585}{2} = 810.7V \quad (IV.12)$$

IV.5 Les résultats de simulation de la chaîne de traction

Les coefficients des forces utilisés dans la simulation sont montrés dans le tableau (IV.4).

t(s)	0-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-15	15-18	18-20	20-21	21-25	25-28	28-30
α	0	5	0	4	1.5	0	2	0	0	5	0	0
r_v	∞	∞	600	∞	∞	900	∞	750	∞	∞	850	∞

TABLE IV.4 – Coefficients des forces

La simulation complète de la chaîne de traction est illustrée sur la figure ci-dessous :

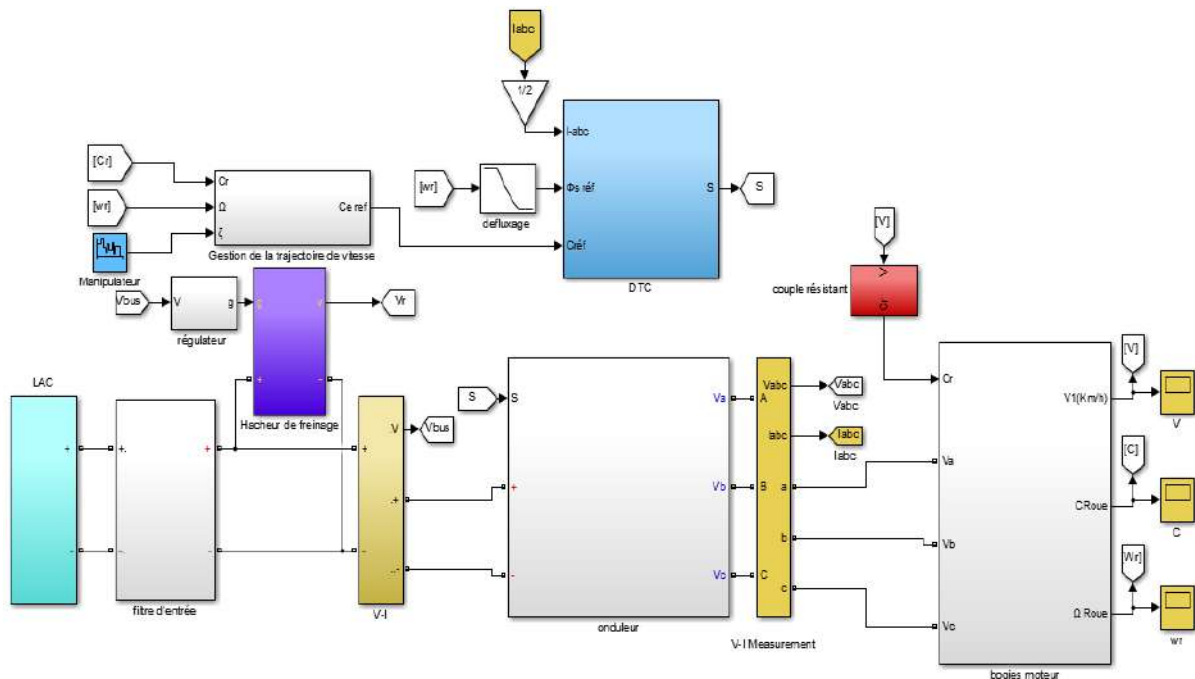
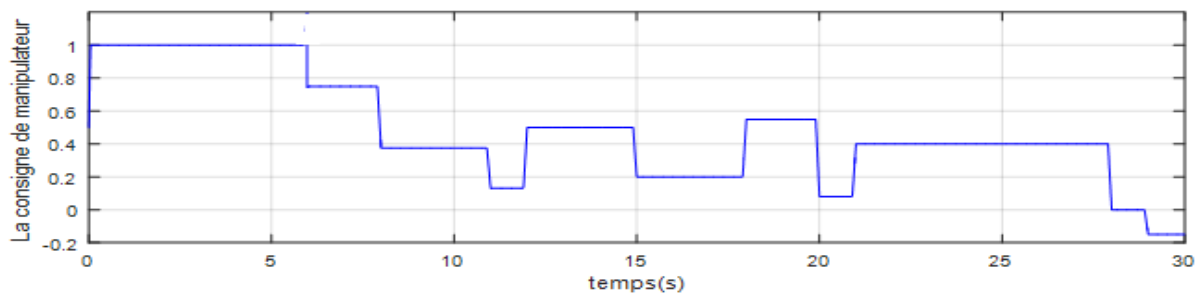
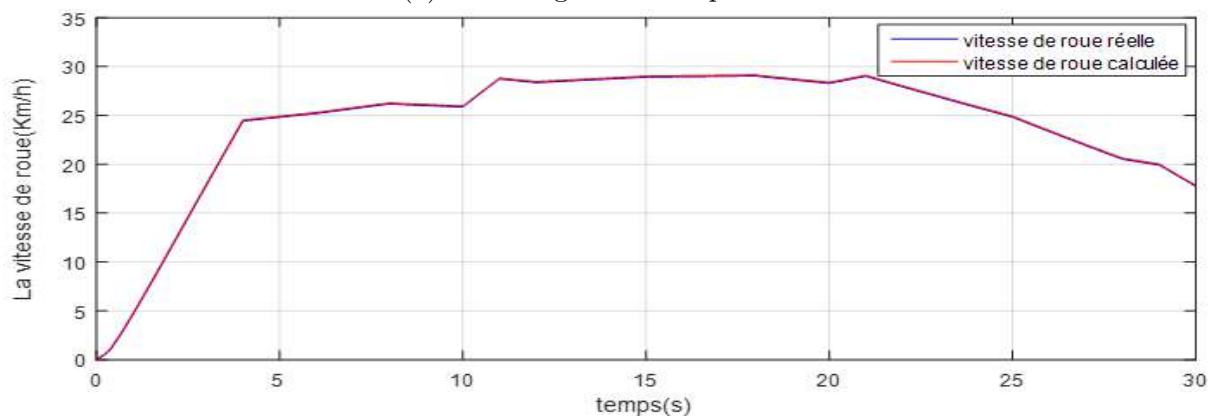


FIGURE IV.26 – La simulation complète de la chaîne de traction

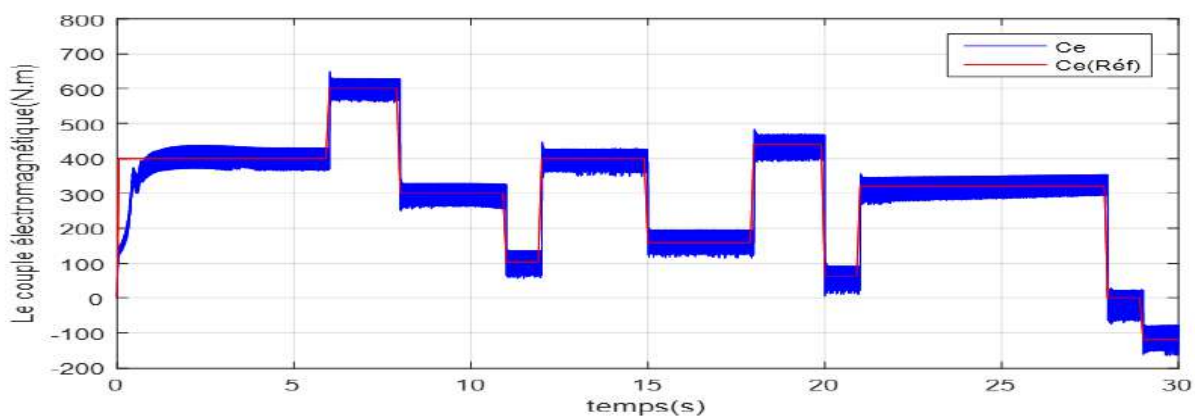
Après avoir lancer la simulation on obtient les résultats suivantes :



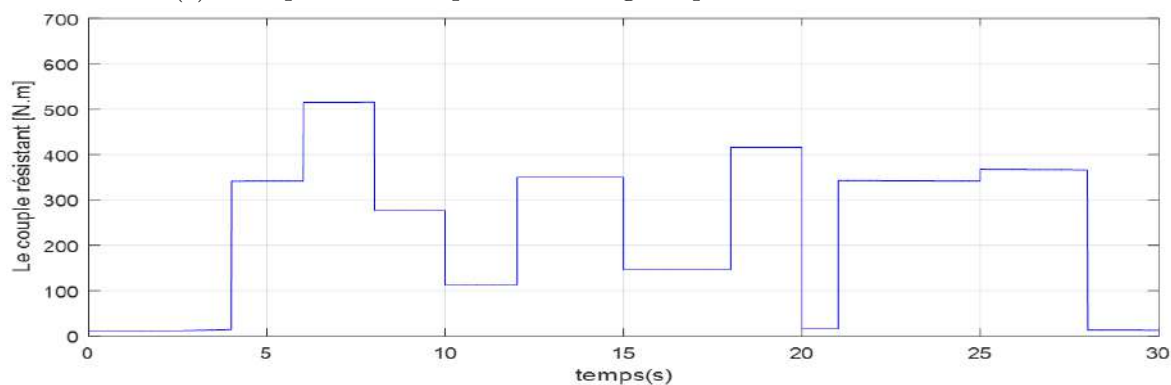
(a) La consigne de manipulateur



(b) La réponse de la vitesse de roue



(c) La réponse du couple électromagnétique sur l'arbre du moteur



(d) Le couple résistant sur l'arbre du moteur

FIGURE IV.27 – Résultats de la simulation de la chaîne de traction

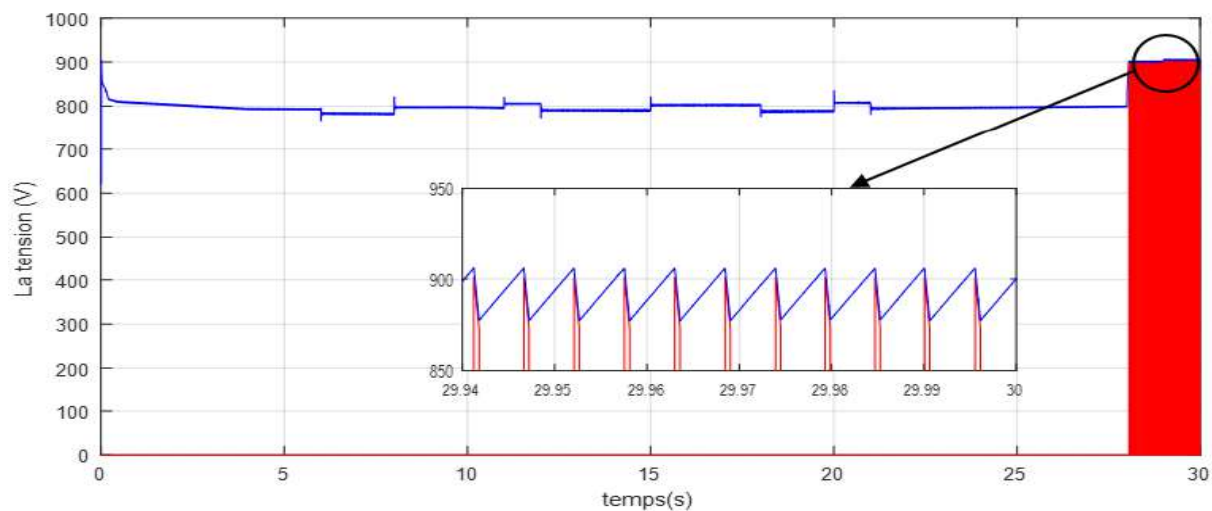


FIGURE IV.28 – La tensions aux bornes du bus continu et la résistance de freinage

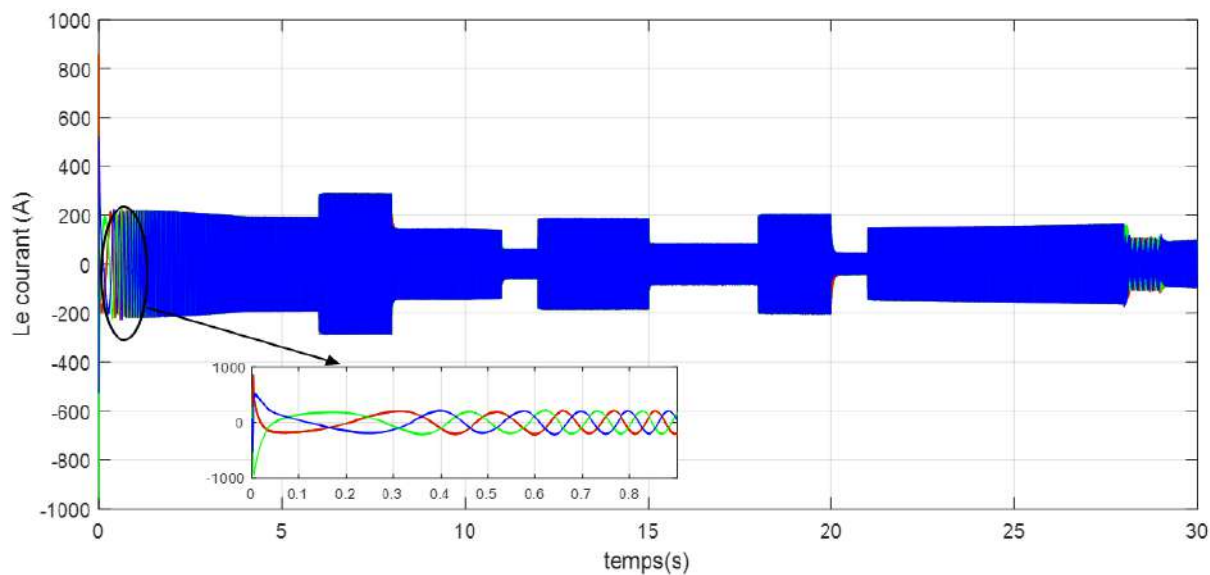


FIGURE IV.29 – Les courants statorique du moteur

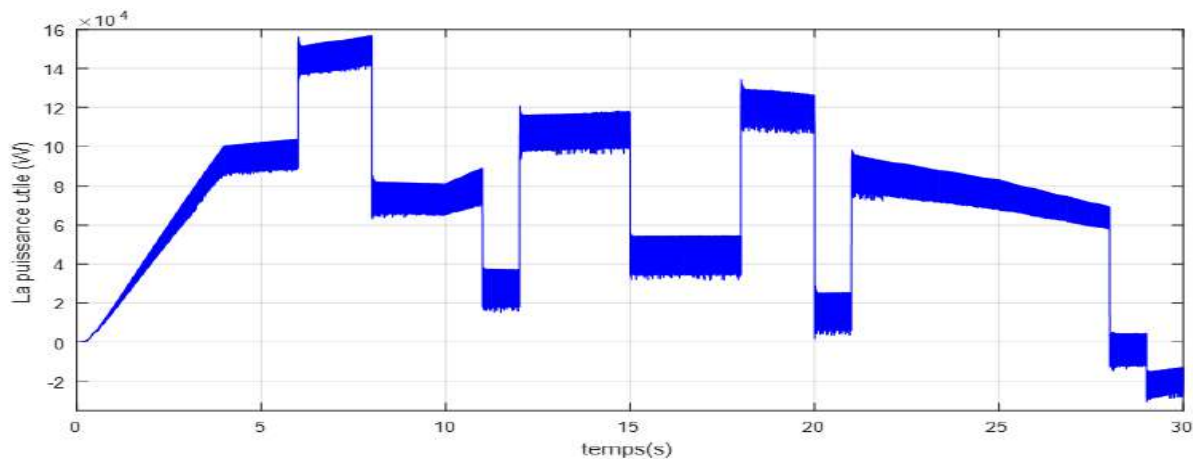


FIGURE IV.30 – La puissance utile du moteur

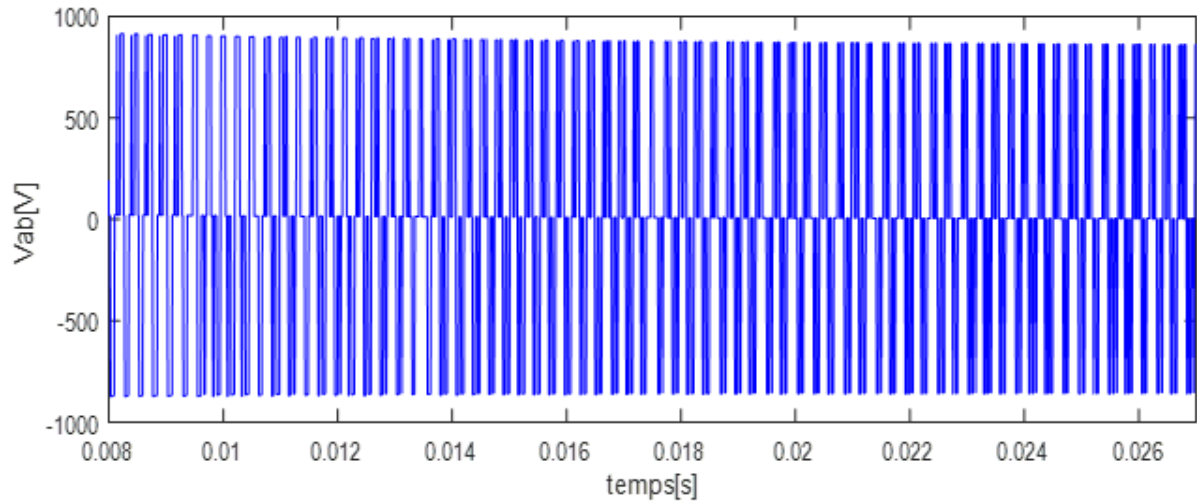


FIGURE IV.31 – La tension de l'alimentation du moteur V_{ab}

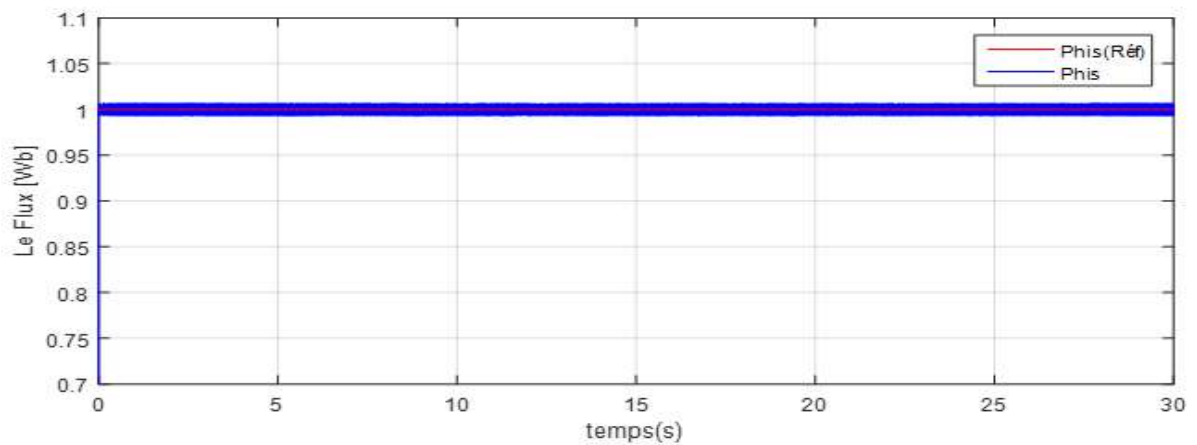


FIGURE IV.32 – Le module du flux statorique

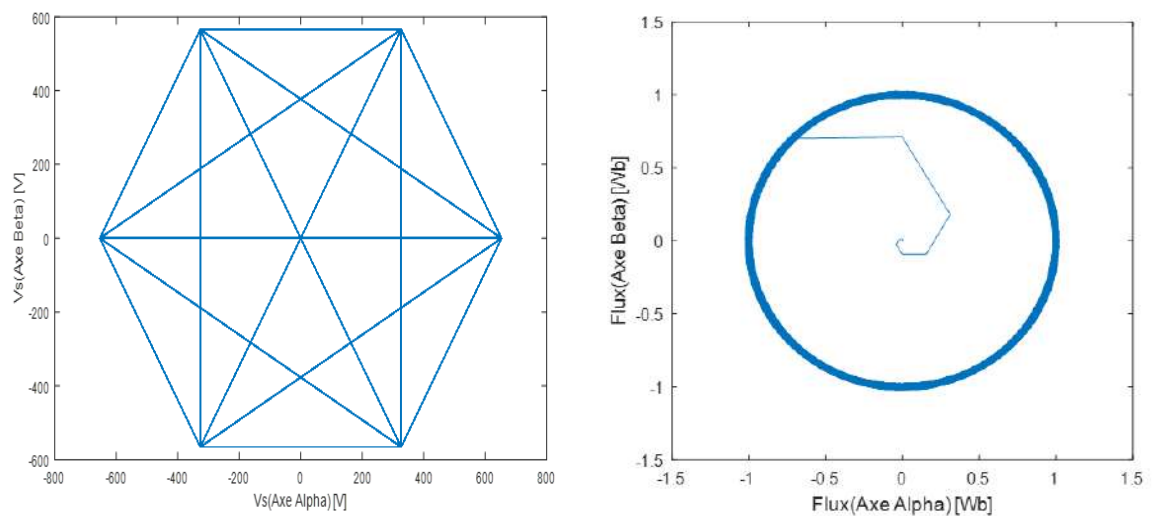


FIGURE IV.33 – La trajectoire des tensions d'alimentation dans le plan référentiel (α, β) FIGURE IV.34 – La trajectoire du flux statorique dans le plan référentiel (α, β)

IV.5.1 Interprétation des résultats

La figure (IV.27a) illustre l'image de la position du manipulateur, on peut remarquer que sa valeur n'est pas constante. Si la position du manipulateur est positive, donc c'est la phase de traction, si elle est négative donc c'est la phase de freinage comme à l'instant $t=29$ s.

La figure (IV.27b) illustre la réponse de la vitesse (km/h) de roue, on peut remarquer que la vitesse de roue est égale à la vitesse calculée avec une erreur négligeable. On peut remarquer également la présence d'accélération, de décélération ou de stabilité, cette évolution dépend du couple électromagnétique et du couple résistant. Dans le cas où le couple électromagnétique est supérieur à le couple résistant, le tramway va accélérer et décélérer dans le cas contraire. En cas de stabilité le couple électromagnétique est égal au couple résistant.

On constate d'après la figure (IV.27c) que la réponse du couple électromagnétique est immédiate avec un régime transitoire d'une seconde, mais elle se présente avec des ondulations (± 50 N.m), ce qui provoque un défaut majeur qui caractérise la commande DTC. On peut remarquer aussi qu'au démarrage la consigne de manipulateur est égale 1 mais le couple de référence est égal 400 N.m car il est limité par l'algorithme de gestion de la trajectoire de vitesse. Par ce que le couple demandé dépasse l'accélération maximale au démarrage.

La figure (IV.27d) montre le couple résistant sur l'arbre du moteur. On peut remarquer que sa valeur n'est pas constante car nous avons utilisé différents coefficients des forces (l'angle d'inclinaison et le rayon de courbure) indiqués dans le tableau (IV.4).

La figure (IV.28) illustre la tension aux bornes du bus continu et la résistance de freinage, on peut remarquer que la tension du bus est stable, pas d'ondulations et lisse, avec la présence d'une petite chute de tension apparaît lorsque le couple augmente, on peut remarquer également que la tension de la résistance de freinage est nulle avant $t=28$ s, après cela la tension égale 900 V par ce que le hacheur de freinage est excité. Car la tension du bus CC dépasse 900 V à cause de la récupération d'énergie au freinage.

La figure (IV.29) montre la forme des courants statoriques, sont présente sous forme sinusoïdale avec un pic de démarrage, on peut remarquer une variation dans la valeur du courant, cette variation dépend du couple électromagnétique fourni par le moteur, si le couple augmente le courant augmente.

Comme il est présenté sur la figure (IV.30) la puissance utile du moteur n'est pas constante, l'évolution de la puissance dépend du couple électromagnétique et de la vitesse, elle est constante si les deux sont constants. On peut remarquer aussi que la puissance est négative à la seconde 29 car le moteur devient un générateur électrique en mode freinage.

La figure (IV.31) montre la réponse de tension statorique générée par le contrôleur de la DTC alimentée par un onduleur à deux niveaux.

La figure (IV.32) illustre la réponse du flux statorique est très rapide par rapport à celle du couple, afin de se stabiliser au tour de sa valeur désirée avec des ondulations remarquables.

La figure (IV.33), montre la trajectoire de tensions statoriques sur le plan biphasé (α, β) , cette projection nous montre d'une façon bien claire les huit vecteurs de tension appliquée par le contrôleur de la DTC. alimentée avec un onduleur à deux niveaux.

La figure (IV.34) illustre la trajectoire du vecteur flux circulaire sur le plan biphasé (α, β) par la DTC à deux niveaux où on peut voir que la forme de sa projection est circulaire.

IV.6 Conclusion

Comme nous l'avons vu sur ce chapitre la simulation du réseau de l'alimentation électrique du tramway qui montre que l'utilisation d'un redresseur dodécaphasé est une bonne choix pour réduire l'ondulation résiduelle sur le réseau DC. Les résultats obtenues à partir de la simulation de la chaîne de traction confirment la caractéristique générales de la commande DTC : la rapidité des réponses des grandeurs de base de la commande DTC (le flux statorique et le couple électromagnétique). Cependant, nous avons vu l'inconvénient majeur causé par cette technique est représenté par des ondulations considérables dans la réponse du couple et le flux.

Conclusion générale

L'alimentation de tramway est bien formulée qu'il atteigne aucune interruption énergétique. Cette conclusion pour préciser la vision sur quelques points importants et autres améliorations possibles.

Nous avons illustré dans le premier chapitre de la structure du réseau d'alimentation de tramway globalement, on a conclu que l'alimentation par les lignes aériennes de contact est le plus utilisée par rapport à l'alimentation par le sol à cause majeure qu'il est le coût de réalisation, les lignes aériennes sont alimentées sous 750 V continu avec des variations admissibles comprises entre 500 V et 900 V. Aussi que l'utilisation des moteurs synchrones serait une bonne alternative aux moteurs asynchrones pour les nouvelles générations, et le mode de refroidissement par air et l'un de ces avantages. Enfin, nous avons vu l'amélioration de réduction de la taille des sous-stations de redressement et leurs réversibilités pour récupérer l'énergie pendant le freinage et la renvoyer au réseau.

Dans le deuxième chapitre, nous avons parlé spécifiquement à l'alimentation électrique du tramway de Ouargla modèle Citadis 402 qui est le tout premier tramway du désert, conçu pour résister aux conditions climatiques du sud, ce dernier utilise six moteurs asynchrones de type 4HGA1433 distribués aux trois bogies moteur, deux moteurs sur chacune. La production de l'énergie de traction est assurée par cinq sous-stations. L'alimentation des voies en énergie de traction est faite selon deux configurations possibles en « T » ou en « π ». Le réseau du tramway est conçu pour être géré depuis les postes de commandes et de contrôles centralisés.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté les principes de bases de la commande directe du couple appliquée sur les moteurs de tramway. On a conclu que cette commande consiste à calculer les grandeurs de contrôle qui sont le flux statorique et le couple électromagnétique à partir des mesures de courants statoriques sans utilisation de capteurs mécaniques, en même temps, cette commande assure un découplage naturel entre le flux et le couple et son schéma synoptique a une structure simple. Car l'absence de boucles de contrôle des courants, la transformation de Park et le bloc de calcul de la modulation de tension MLI rend la réalisation de la commande DTC plus faisable que les autres commandes. Aussi que le couple de référence est calculé par le système de gestion de trajectoire de vitesse pour assurer le respect des contraintes de conduite.

Comme nous avons vu sur le quatrième chapitre la simulation du réseau de l'alimentation électrique du tramway montre que l'utilisation d'un redresseur dodécaphasé est un bon choix pour réduire la pollution du courant et l'ondulation résiduelle sur le réseau DC. Les résultats obtenus à partir de la simulation de la chaîne de traction, confirment les caractéristiques générales de la commande DTC, car les gains d'utilisation de cette

technique par rapport aux autres commandes sont représentés par la simplicité dans son schéma synoptique de sa commande, et la rapidité dans le temps de réponse des grandeurs mesurées quel que soit leur nature (électriques, mécaniques, magnétiques). Cependant, nous avons vu l'inconvénient majeur causé par cette technique est représenté par des ondulations considérables aux niveaux de la réponse du flux statorique et particulièrement dans la réponse du couple électromagnétique, car cette conséquence provoque une vibration considérable sur l'actionneur électrique et peut causer la réduction du temps de vie des parties mécaniques.

En fin, comme perspectives à la poursuite de notre travail, nous proposons :

- Augmentation des niveaux des onduleurs utilisés et insertion des convertisseurs matriciels à l'aide des techniques intelligentes dans la commande DTC.
- L'amélioration de l'effet des oscillations sur les grandeurs de contrôle de la DTC par l'usage d'une stratégie de supervision floue, ou neuro-floue.
- Intégration des énergies renouvelables dans l'alimentation électrique du tramway.

Bibliographie

- [1] S.BADIDJA et Z.MANSOURI. : Modélisation et gestion d'un réseau électrique à partir d'une route solaire sur une voie de tramway application à la ville de ouargla. Mémoire de Master , Université Kasdi Merbah Ouargla, 2019.
- [2] H.DAHAR et Y.BEKARA. :modélisation et simulation du réseau du tramway. Mémoire de Master ,Ecole Supérieure en Sciences Appliquées de Tlemcen, 2020.
- [3] ERIC M. : Modélisation d'un réseau électrique de tramway(du composant au système). thèse de doctorat , Université Joseph-Fourier-Grenoble, 2005.
- [4] G.MULLER. : Traction ferroviaire : les tramways : Systèmes, exploitation et conception. journal Techniques de l'ingénieur. Génie électrique, 2007.
- [5] M.BENSALAH et H.MHARZI et A.ELOUADI. : Building information modeling pour des applications ferroviaires (conception d'une sous-station de tramway). thèse de doctorat ,Université d'Ibn Tofail, 2018.
- [6] [https://fr.wikipedia.org/wiki/alimentation par le sol](https://fr.wikipedia.org/wiki/alimentation_par_le_sol).
- [7] R.VIAL. : Vers un dimensionnement optimal structure-commande de système multi-convertisseurs. : Application aux réseaux de tramways. thèse de doctorat , Université de Grenoble, 2012.
- [8] J.FABRE. : Etude et mise en oeuvre de modules de puissance mosfet sic pour leurs futures utilisations dans des convertisseurs ferroviaires. thèse de doctorat , Institut National Polytechnique de Toulouse, 2013.
- [9] <https://www.facs-patrimoine-ferroviaire.fr/phototheque/albums/inauguration-tramway-davignon>.
- [10] [https://www.hutchinson.com/fr/produits/solution-antivibratoire-equipement bogie](https://www.hutchinson.com/fr/produits/solution-antivibratoire-equipement-bogie). <https://www.hutchinson.com/fr/produits/solution-antivibratoire-equipement-bogie>.
- [11] K.HARICHLI. J.MAKIK. : Spécification d'alimentations externes pour équipements du tramway. Mémoire de Master, Université Sidi Mohammed Ben Abdellahr, 2014.
- [12] Document alstom : Support de formation bogies 2013.
- [13] Catalogue de vonroll-hydro.world ,courants vagabonds – "la solution" ,2005.
- [14] A.ARABA. : Le système d'alimentation du tramway de la ville de sidi bel abbes. Mémoire de Master, Université Djillali LIABES Sidi Bel Abbèsr, 2019.
- [15] Document alstom : Support de formation a la chain de traction 2013.
- [16] <https://www.setram.dz/site/fr/content/tramway-de-ouargla>.
- [17] [https://en.wikipedia.org/wiki/ouargla tramway](https://en.wikipedia.org/wiki/ouargla_tramway).
- [18] <http://www.ferro-lyon.net/nouveau-tram/498-les-rames-citadis-402>.

- [19] C.KHIAT et S.AOUS. : Etude, modélisation et commande d'une chaîne de traction ferroviaire. Mémoire de Master , Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès, 2020.
- [20] P.ROUSSEAU. : Maîtrise d'œuvre de la ligne de tramway cloche d'or aéroport luxembourg- findel. LA LAC ,APS - volume B3 ,Première édition , Luxtram Lisen-tram, 2015.
- [21] Catalogue : Général motors alstom.
- [22] A.GHILANI. Photos des spécifications techniques photographiées lors d'une visite à stream ouargla.
- [23] P.JACOB. : Distribution de l'énergie. journal Techniques ,2007.
- [24] <http://www.urbanrail.net/af/ouargla/ouargla.htm>.
- [25] R.TOUFOUTI. : Contribution a la commande directe du couple de la machine asynchrone,thèse de doctorat, université des frères mentouri constantine 1. 2008.
- [26] R.ZAITER. : Commande directe du couple dtc d'une machine asynchrone avec défaut. thèse de Magister ,Université Mohamed Khider Biskra, 2013.
- [27] S.GDAIM. : Commande directe de couple d'un moteur asynchrone à base de techniques intelligentes. thèse de doctorat ,Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, 2013.
- [28] A.SOYED. : Transformation mathématiques pour l'étude des machines électriques tournantes. polycopie ,Electrotechnique avancée.
- [29] I.BOUYAKOUB. polycopié du module : Electronique de puissance avancée,université hassiba ben bouali de chelf. 2020.
- [30] M.MESSAI et M.REDOUANI. : Contrôle direct du couple d'une machine asynchrone. Mémoire de Master , Université d'el-Oued, 2014.
- [31] M.ZEGAI. : Synthèses des techniques de commande dtc associée à l'intelligence artificielle appliquée au contrôle d'un moteur asynchrone alimenté par onduleur multi-niveaux. thèse de doctorat ,Université de Oran Mohamed-Boudiaf, 2018.
- [32] A.BENZAIOA. : Contribution à la commande directe de couple d'une machine asynchrone triphasée. thèse de doctorat ,Université du Québec à Chicoutimi, 2014.
- [33] E.MERABET. : Machines électriques,polycopie, ,université de batna, 2014.
- [34] A.MEGHERBI. : Transformateurs électrique ,polycopié,université mohamed khider biskra, 2020.
- [35] G.CORMIER. : Transformateurs ,polycopié, 2e édition ,université de moncton.
- [36] P.HENRARD. : Transformateur redresseur dodécaphasé. Document de brevet international,W I P O I P C T, 2017.
- [37] <http://for-ge.blogspot.com/2015/08/les-redresseurs.html>.
- [38] <https://www.ee.co.za/article/rectifier-transformers-technology-update.html>, 2020.
- [39] A.OREIZ. : Étude de montages redresseurs polyphasés pour le réseau d'alimentation électrique des avions,mémoire de master,université laval. 2013.

Annexe A

A.1 Programme matlab (Sélection du vecteur Vs)

```
1 function v=V_selection(N,Clfx,Ccpl)
2 v=0;
3
4 %Secteur 1 :
5 if (N==1) && (Clfx==1) && (Ccpl==1)
6     v=2;
7 end;
8 if (N==1) && (Clfx==1) && (Ccpl==0)
9     v=7;
10 end;
11 if (N==1) && (Clfx==1) && (Ccpl==-1)
12     v=6;
13 end;
14 if (N==1) && (Clfx==0) && (Ccpl==1)
15     v=3;
16 end;
17 if (N==1) && (Clfx==0) && (Ccpl==0)
18     v=0;
19 end;
20 if (N==1) && (Clfx==0) && (Ccpl==-1)
21     v=5;
22 end;
23 %Secteur 2 :
24 if (N==2) && (Clfx==1) && (Ccpl==1)
25     v=3;
26 end;
27 if (N==2) && (Clfx==1) && (Ccpl==0)
28     v=0;
29 end;
30 if (N==2) && (Clfx==1) && (Ccpl==-1)
31     v=1;
32 end;
33 if (N==2) && (Clfx==0) && (Ccpl==1)
34     v=4;
35 end;
36 if (N==2) && (Clfx==0) && (Ccpl==0)
37     v=7;
38 end;
39 if (N==2) && (Clfx==0) && (Ccpl==-1)
40     v=6;
41 end;
42 %Secteur 3 :
```

```
43 if (N==3) && (Clfx==1) && (Ccpl==1)
44     v=4;
45 end;
46 if (N==3) && (Clfx==1) && (Ccpl==0)
47     v=7;
48 end;
49 if (N==3) && (Clfx==1) && (Ccpl==-1)
50     v=2;
51 end;
52 if (N==3) && (Clfx==0) && (Ccpl==1)
53     v=5;
54 end;
55 if (N==3) && (Clfx==0) && (Ccpl==0)
56     v=0;
57 end;
58 if (N==3) && (Clfx==0) && (Ccpl==-1)
59     v=1;
60 end;
61 %Secteur 4 :
62 if (N==4) && (Clfx==1) && (Ccpl==1)
63     v=5;
64 end;
65 if (N==4) && (Clfx==1) && (Ccpl==0)
66     v=0;
67 end;
68 if (N==4) && (Clfx==1) && (Ccpl==-1)
69     v=3;
70 end;
71 if (N==4) && (Clfx==0) && (Ccpl==1)
72     v=6;
73 end;
74 if (N==4) && (Clfx==0) && (Ccpl==0)
75     v=7;
76 end;
77 if (N==4) && (Clfx==0) && (Ccpl==-1)
78     v=2;
79 end;
80 %Secteur 5 :
81 if (N==5) && (Clfx==1) && (Ccpl==1)
82     v=6;
83 end;
84 if (N==5) && (Clfx==1) && (Ccpl==0)
85     v=7;
86 end;
87 if (N==5) && (Clfx==1) && (Ccpl==-1)
88     v=4;
89 end;
90 if (N==5) && (Clfx==0) && (Ccpl==1)
91     v=1;
92 end;
93 if (N==5) && (Clfx==0) && (Ccpl==0)
94     v=0;
95 end;
96 if (N==5) && (Clfx==0) && (Ccpl==-1)
97     v=3;
98 end;
99 %Secteur 6 :
100 if (N==6) && (Clfx==1) && (Ccpl==1)
```














```
101     v=1;
102 end;
103 if (N==6) && (Clfx==1) && (Ccpl==0)
104     v=0;
105 end;
106 if (N==6) && (Clfx==1) && (Ccpl==-1)
107     v=5;
108 end;
109 if (N==6) && (Clfx==0) && (Ccpl==1)
110     v=2;
111 end;
112 if (N==6) && (Clfx==0) && (Ccpl==0)
113     v=7;
114 end;
115 if (N==6) && (Clfx==0) && (Ccpl==-1)
116     v=4;
117 end;
```

A.2 Programme matlab(Estimation du secteur)

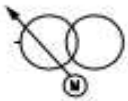







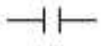


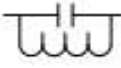


```
1 function N =SECTEUR(FsiAlpha,FsiBeta)
2 N=0;
3 theta=0;
4 theta=atan2(FsiBeta,FsiAlpha);
5 if(theta>=pi/6) && (theta<pi/6)
6     N=1;
7 end;
8 if(theta>=pi/6) && (theta<pi/2)
9     N=2;
10 end;
11 if(theta>=pi/2) && (theta<5*pi/6)
12     N=3;
13 end;
14 if(theta>=5*pi/6) && (theta<pi)
15     N=4;
16 end;
17 if(theta>=pi) && (theta<-5*pi/6)
18     N=4;
19 end;
20 if(theta>=-5*pi/6) && (theta<-pi/2)
21     N=5;
22 end;
23 if(theta>=-pi/2) && (theta<-pi/6)
24     N=6;
25 end;
```

Annexe B

B.1 Légende du schéma unifilaire des SSR

	NUMERO DE LA STATION
	QUAI DE STATION
	ISOLATEUR DE SECTION
	DISJONCTEUR DEBROCHABLE
	INTERRUPTEUR SECTIONNEUR MOTORISE
	BARRETTE DECONNECTABLE
	TRANSFORMATEUR DE TRACTION
	COURT CIRCUITEUR
	REDRESSEUR
	FEU DE PRESENCE TENSION
	CABLE FEEDER
	CABLE
	INJECTION LAC

B.2 Légende du schéma unifilaire des PHT

LEGENDE	
	TRANSFORMATEUR DE PUISSANCE AVECC REGLEUR EN CHARGE MOTORISE
	TRANSFORMATEUR AUXILIAIRE
	TRANSFORMATEUR DE TENSION
	TRANSFORMATEUR DE COURANT
	DISJONCTEUR DEBROCHABLE
	DISJONCTEUR
	SECTIONNEUR
	PARAFoudre
	CONDENSATEUR
	TERRE
	RESISTANCE
	CIRCUIT BOUCHON
	EXTREMITE CABLE
	COMMANDE ELECTRIQUE
M	MESURE
C	COMPTAGE
P	PROTECTION

Annexe C

C.1- La norme EN 50163

Le présent document spécifie les caractéristiques principales des tensions d'alimentation des réseaux de traction, tels qu'installation près de traction, incluant les appareils auxiliaires alimentés par la ligne de contact, et matériel roulant, pour l'installation dans les applications suivantes : chemin de fer, système guide de transport tel que tramway, chemin de fer souterrain ou carrières, chemin de fer de montagne et trolley bus, système de transport de matériaux.

C.2- La norme EN 50122-1

La présente Norme Européenne spécifie les exigences relatives aux mesures de protection concernant la sécurité électrique dans les installations fixes associées à des systèmes de traction en courant alternatif et/ou continu et dans toutes les installations susceptibles d'être affectées par le système d'alimentation de traction. Elle s'applique également à toutes les installations fixes qui sont nécessaires pour garantir la sécurité électrique lors des travaux de maintenance réalisés sur des systèmes de traction électrique.

ملخص

النقل العام هو حل للحد من استهلاك الطاقة والنفقات المتعلقة بالنقل. وهذا هو الحال بشكل خاص في حالة الترام الذي أصبح وسيلة نقل تعتمد على العديد من المدن الآن وفي هذا السياق تم تصميم مشروع ترام ورقلة لتخفيف الازدحام في هذه المدينة المكتظة بالسكان. الهدف من مشروع نهاية الدراسة هذا هو دراسة إمداد الطاقة الكهربائية لخط ترام ورقلة وتطبيق طريقة التحكم المباشر في العزم للتحكم في محركاته الغير متزامنة باستخدام نظام إدارة مسار السرعة لضمان الامتثال لقيود قيادة الترام.

الكلمات المفتاحية: ترامواي ورقلة – سيتاديس 402 – التحكم المباشر في العزم – سلسلة الجر.

Résumé

Les transports en commun sont une solution pour limiter la consommation énergétique et les dépenses liées au transport. C'est tout particulièrement le cas du tramway qui est devenu un moyen de transport que plusieurs villes adoptent de nos jours. C'est dans ce contexte que le projet du tramway de Ouargla a été élaboré dans le but de désengorger cette ville de très forte densité de population.

Le but de ce projet de fin est d'étudier l'alimentation électrique de la ligne de tramway de Ouargla et l'application de la méthode de contrôle DTC pour contrôler ses moteurs asynchrones avec l'utilisation du système de gestion de la trajectoire de vitesse pour assurer le respect des contraintes de conduite du tramway.

Mots clés: Tramway de Ouargla -Citadis 402-Commande directe du couple- La chaîne de traction.

Abstract

Public transport is a solution to limit energy consumption and transportation expenses. This is particularly the case with the tramway that has become a way of transportation that many cities are adopting today. It is in this context that the Ouargla tramway project was developed with the aim to facilitate the city population density movements.

The aim of this final project was to study the power supply of the Ouargla tram line and the application of the DTC control method to control its asynchronous motors with the use of the speed path management system to ensure compliance with the tramway driving constraints.

Keywords: Ouargla tramway -Citadis 402-Direct torque control- The traction chain.