Université Constantine 1 Frères Mentouri



Faculté des Sciences de la Technologie

Département Génie des Transports

N⁰ de série : 02/Trans/2024

N⁰ d'ordre : 82 /D3C/2024

CONTRIBUTION A L'AMELIORATION DES ASPECTS ECONOMIQUES ET OPTIMISATION ENERGETIQUE APPLIQUES POUR LA TRACTION ELECTRIQUE

THESE

Présentée pour l'Obtention du Diplôme de Doctorat en Ingénierie des Transports en Spécialité Traction Électrique

Par

Meryem AISSAOUI

Devant le Jury composé de :

Ramdane BOUZERARA	Président	Professeur	Université	Constantine1
Mohamed BENIDIR	Directeur	Professeur	Université	Constantine 1
Djamel LABED	Examinateur	Professeur	Université	Constantine 1
Hacene BOUZEKRI	Examinateur	Professeur	Université 20	Août 1955 Skikda
Hocine CHEGHIB	Examinateur	Professeur	Université Ba	dji Mokhtar, Annaba
Sihem GHOUDELBOURK	Examinateur	MCA	Université Bao	dji Mokhtar, Annaba

Soutenue publiquement

Le: 23 / 11 /2024

REMERCIEMENTS

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers mes chers parents, ma famille, et mon mari, Chokri, pour leur confiance inébranlable, leur soutien constant, et leur encouragement tout au long de mon parcours académique. Leur amour et leur soutien ont été mes piliers les plus solides.

Je tiens également à remercier chaleureusement mes collègues de cette phase de ma vie, qui ont partagé ce chemin avec moi, et ont contribué à créer un environnement d'apprentissage stimulant.

Un merci spécial à tous les enseignants du département de génie des transports, qui ont partagé leurs connaissances et leur expertise, contribuant ainsi à mon développement académique. Je tiens à exprimer ma reconnaissance particulière envers mon directeur de thèse, le Professeur **Mohamed BENIDIR** de l'Université Constantine 1, pour avoir dirigé ce travail de thèse. Je le remercie non seulement pour ses compétences scientifiques, mais aussi pour ses qualités humaines. Ses encouragements constants et ses conseils précieux ont été essentiels à la réalisation de cette thèse.

Je tiens également à remercier le Professeur **BOUZERIA Hamza**, co-rapporteur de ma thèse, ainsi que Monsieur **Boudia Issam**, professeur à l'Université Mohamed Boudiaf à M'sila, pour les services qu'ils m'ont rendus et leur contribution à mon travail.

Ma reconnaissance s'étend également à Monsieur LABED Djamel, Professeur à l'Université de Constantine, madame GHOUDELBOURK Sihem et monsieur CHEGHIB Hocine, professeurs à l'Université Badji Mokhtar, Annaba, et Monsieur BOUZEKRI Hacene, Professeur à U. 20 Août 1955 Skikda : pour avoir accepté d'examiner ma thèse. Enfin, je tiens à remercier Monsieur BOUZRARA Ramdane, Professeur à l'Université Constantine 1, d'avoir accepté de présider mon jury de soutenance et d'être membre de celuic1.

L'achèvement de cette thèse n'aurait pas été possible sans le soutien et l'apport de chacune de ces personnes remarquables. Je suis profondément reconnaissant pour votre présence et votre contribution à cette réalisation académique.

Avec toute ma gratitude,

Meryem

Dédicace

À mes chers parents, dont le soutien inébranlable a été la source de ma motivation et de mon inspiration tout au long de ce parcours académique. Votre amour et vos sacrifices ont constitué les fondations de ma réussite.

À mes enseignants dévoués, qui ont partagé leur savoir, leur sagesse et leur passion pour la recherche. Votre guidance a éclairé ma route vers la connaissance.

À mon mari, Chokri Merghadi, et à sa famille, mon compagnon de vie et mon roc. Ton amour, ta compréhension et ton encouragement constants ont rendu ce parcours académique encore plus significatif.

À mes amis (Meryem Noui, Meryem Derradji, Amira, Imen, et d'autres) et à mes frères (Youcef, Abdelrahmane, Amine, et leurs épouses), ainsi qu'à ma sœur Soumia, qui ont apporté de la joie, du soutien et des moments de détente bien nécessaires au cours de ces années d'études. Votre amitié a rendu cette aventure inoubliable.

C'est avec une profonde gratitude que je dédie cette thèse de doctorat à chacun d'entre vous. Vos contributions précieuses ont enrichi ma vie et ont grandement contribué à la réalisation de ce rêve académique.

MERYEM

Table de matièreiii
Figuresvii
Tableauxx
Liste des Abréviations xi
xiii
Résuméxiv
Abstractxv
Introduction Généraleiii
Chapitre 1 L'état de l'art "Avancées dans l'Optimisation de l'Efficacité Énergétique dans
la Traction Ferroviaire"1
1.1. Introduction1
1.2. Définition de la Chaine de Traction ferroviaire1
1.3. Type de la chaine de traction ferroviaire2
1.3.1. Chaine de traction pour les motorisations à courant continu2
1.3.2. Chaine de traction pour les motorisations à synchrone
1.3.3. Chaine de traction pour les motorisations à asynchrone4
1.3.4. Chaine de traction actuelle pour les motorisations à synchrone et asynchrone.
4
1.4. Aperçu des principaux facteurs qui affectent l'efficacité énergétique du transport
ferroviaire
1.4.1. Facteurs affectant l'efficacité énergétique du transport ferroviaire5
1.4.2. Effets économiques de l'amélioration de l'efficacité énergétique du transport
ferroviaire
1.5. La position du transport ferroviaire aujourd'hui8
1.5.1. Réduction des pertes de freinage9
1.5.2. Prévention des conflits de parcours9
1.6.Les techniques utilisées pour l'efficacité énergétique10

Table de matière

1.6.1. Smart Drive	[5]	10
--------------------	-----	----

 1.6.2. Une approche systémique afin de diminuer la consommation énergétique des transports ferroviaires urbains

 12

1.6.3. Optimisation de l'efficience énergétique des systèmes de métro (Évaluation et amélioration des stratégies de réduction de la consommation d'énergie de traction)

1.6.4. Stratégie de contrôle de découplage basée sur la passivité des VSR
monophasés de type LCL pour l'élimination des harmoniques dans les systèmes
électriques ferroviaires
1.7. Optimisation de la chaîne énergétique21
1.7.1. Convertisseur IGBT21
1.7.2. Transformateur supraconducteur
1.7.3. Moteur direct
1.8. Conclusion
Chapitre 2 Etude architecturale de la Chaine de traction ferroviaire27
2.1. Introduction
2.2. Description de la Chain de traction ferroviaire
2.3. Une approche systémique des réseaux d'alimentation électrique des tramways27
2.3.1. Structures des réseaux d'alimentation
2.3.2. Norme concernant les tensions d'alimentation des réseaux de traction32
2.3.3. Sous-stations de traction
2.3.4. Ligne de transport
2.3.5. Matériel roulant
2.4. Conclusion
Chapitre 3 Généralité sur la qualité de l'Energie électrique, les Harmoniques, les
filtres46
3.1. Introduction
3.2. Perturbation électrique

	3.2.1. Classification des perturbations électriques	.49
3.3. I	Pollution harmonique	.50
	3.3.1. Type de pollution harmonique	.50
	3.3.2. Les sources d'harmoniques	.53
	3.3.3. Notions de tensions et courants harmoniques	.54
	3.3.4. Problèmes crées par les harmoniques	.59
	3.3.5. Les Normes	.59
	3.3.5. Valeurs maximales d'harmoniques acceptables	.61
	3.3.6. L'impact économique de ces perturbations	.62
	3.3.7. Classification des Méthodes d'écoulement de puissance harmonique	.64
	3.3.8. Méthodes d'identification des grandeurs harmoniques	.68
3.4. suppi	Technique et les méthodes pour l'amélioration de la qualité d'Energie et ression des harmoniques	la .77
	3.4.1. A titre préventif	.77
	3.4.2. Redresseurs industriels	.77
	3.4.3. Installer des inductances anti-harmoniques dans l'installation.	.78
	3.4.4. Aménagements de la structure des réseaux.	.78
	3.4.5. Ajustement de la section du neutre	.79
	3.4.6. Positionner les charges polluantes en amont du réseau	.79
	3.4.7. Regrouper les charges polluantes	.79
	3.4.8. Isoler les sources	.79
	3.4.9. Utiliser des transformateurs à couplages particuliers	.80
	3.4.10. Transformateurs HT/MT à tension de court-circuit réduite	.80
	3.4.11. Régulation décentralisée de la tension	.80
	3.4.12. Les méthodes traditionnelles	.80
3.5. 0	Conclusion	.89
Chap	oitre 4 Optimisation de l'efficacité énergétique et réduction des harmoniques dans	s le
TPSS		90

Partie I : Analyse de la résonance harmonique dans les systèmes ferroviaires électriques
4.1. Introduction
4.2. Description du système
4.3. Modèle mathématique du système ERS91
4.3.1. Modélisation du réseau d'alimentation91
4.3.2. Modélisation des transformateurs de sous-station
4.3.3. Sous-station de traction :
4.3.4. Modélisation de machine asynchrone95
4.4. Résultats et discussion
4.4.1. Interprétation
4.4.2. Valeur de THD99
Partie II : Suppression des harmoniques dans un ferroviaire à grande vitesse
4.6. Introduction
4.7. Analyse de résonance harmonique101
4.8. Topologie du système103
4.9. L'analyse du convertisseur de type LCL106
4.9.1. Conception et modélisation des filtres LCL et de leurs paramètres107
4.11. Diagramme structurel de système de contrôle109
4.11.1. Diagramme de contrôle avec régulateur PI109
4.11.2. Diagramme de contrôle avec FLC112
4.12. Résultats et comparaison
4.13. Conclusions
Chapitre 5 : Conclusion et perspective
Chapitre 6 : Bibliographe

Figures	Pages
1.1 Schéma général d'une chaîne de traction ferroviaire	2
1.2 Chaine de traction pour les motorisations à courant continue	3
1.3 Chaine de traction pour les motorisations à synchrone	3
1.4 Chaine de traction pour les motorisations à asynchrone	4
1.5 Chaine de traction actuelle	5
1.6 Diagramme de flux d'énergie de traction typique	11
1.7 Structure de simulation de mouvement de train	12
1.8 Le diagramme de flux pour calculer la stratégie de conduite écoénergétique de	e plusieurs
sections	20
1.9 Le diagramme de flux du OTCS (Système de Contrôle Optimal des Trains)	20
1.10 Diagramme de répartition des charges d'un train	23
2.1 Illustration d'un réseau de tramway	
2.2 Système d'alimentation par le sol APS	29
2.3 Système APS d'INNORAIL.	
2.4 Module ALISSE	31
2.5 Support latéral d'une ligne aérienne de contact	32
2.6 Transformateur de Traction.	35
2.7 Redresseur de tension monophasé (pont mixte)	
2.8 Redresseur de Courant	
2.9 Onduleur de courant triphasé à Thyristors	
2.10 Hacheur	
2.11Onduleur de tension triphasé à GTO.	
2.12 Onduleur de tension triphasé à IGBT.	
2.13 Principe de la régulation du pantographe.	
2.14 Structure d'un onduleur de tension.	40
2.15 Commande (MLI) sinus-triangulaire	41
2.16 régulière symétrique	42
2.17 Commande MLI Vectorielle	43
2.18 Commande par hystérésis	44
2.19 Moteur Asynchrone.	45
3.1 Creux de Tension	51
3.2 Fluctuations de Tension.	52
3.3 Fluctuation de la fréquence	52

3.4 Déséquilibre des Tensions
3.5 Réseau radial
3.6 Diagramme de transformation du référentiel a-b-c au référentiel α - β 71
3.7 Génération des courants de référence selon l'algorithme du référentiel synchrone73
3.8 Diagramme de blocs d'une PLL74
3.9 Génération des courants de référence par l'algorithme de la séquence positive du
fondamental75
3.10 Génération des courants de référence par l'algorithme du filtre coupe-bande76
3.11 Raccordement d'un filtre passif
3.12 Filtre passif raisonnant
3.13 Module de l'impédance d'un filtre résonant raccordé au range 5 en fonction de
fréquence f/f_a83
3.14 Filtre passif amortie
3.15 Filtre actif parallèle
3.16 Filtre actif série
3.17 Combinaison des filtres actifs parallèle et série
4.1 Le schéma synoptique du système proposé90
4.2 Sous-station de traction
4.3 Modélisation de la caténaire
4.4 Tension du réseau d'un tramway97
4.5 Tension du réseau du deux tramway97
4.6 Tension du réseau de trois tramways
4.7 Système typique d'alimentation électrique de traction dans un chemin de fer à grande
vitesse
4.8 Le diagramme de localisation du train électrique dans le système de réseau de traction.
4.9 Représentation du réseau de traction équivalent utilisant la topologie d'un circuit π . 105
4.10 Circuit équivalent des redresseurs de type LCL du côté ligne monophasé dans chaque
unité de propulsion d'un train à grande vitesse107
4.11 Modèle du filtre LCL
4.12 Schéma de contrôle du redresseur LCL basé sur un contrôleur PI110
4.13. Montage du bloc PLL
4.14 Structure pratique du régulateur proportionnel111
4.15 Schéma de contrôle du redresseur LCL basé sur un contrôleur FLC112

4.16 Les formes d'onde simulées des tensions du bus continu114
4.17 Fonctions d'appartenance du système flou114
4.18 Les formes d'onde simulées des tensions du bus continu115
4.19 Les formes d'onde simulées des tensions du bus continu115
4.20 Les formes d'onde simulées de la tension côté réseau Vg utilisant le régulateur PI117
4.21 Les formes d'onde simulées de la tension côté réseau Vg utilisant le régulateur FLC
4.22 Les formes d'onde simulées du courant côté réseau (Ig) utilisant le régulateur PI118
4.23 Les formes d'onde simulées du courant côté réseau (Ig) utilisant le régulateur FLC.118
4.24 Le spectre harmonique du courant côté réseau simulé utilisant le régulateur P1119
4.25 Le spectre harmonique du courant côté réseau simulé utilisant le régulateur FLC 119

Tableaux

Pages

1.1 Algorithme 1 : calcul de la stratégie de conduite écoénergétique pour une sect	ion
donnée.2	.18
2.1 issu de la Norme EN 50163	.33
3.1 Limite des distorsions harmonique de tension (Norme IEC61000-2-2)	.56
3.2 Facteur de puissance	.58
3.3 Valeurs maximales des deux d'harmoniques acceptables	.62
4.1 Les Grandeurs utilisées pour la modélisation du réseau amont et du transformateur	.94
4.2 Paramètres du système	.97
4.3 Résultats du réseau FFT des harmoniques	.99
4.4 Paramètres du filtre LCL 1	109
4.5 Paramètres du système1	109
4.6 Base de règles du contrôleur FLC	113

Liste des Abréviations

- **AC** : courant alternatif.
- DC : courant continu.
- GEP : gestion électronique de la puissance.

BCRRE: Birmingham center for railway research and education.

PMSM : permanent magnet synchronous motor.

OTCS: optimal train control simulator.

MA : maximum acceleration.

CR : croisière.

CO : roulement a vide.

MB: maximum Breaking.

VSRs: single-phase voltage source rectifier.

PBD: passivity-based decoupling.

GTO: gate turn-off.

IGBT: insulated gate bipolar transitor.

TGV : train grande Vitesse.

APS : Alimentations Par le Sol.

ALISS : Alimentation Statique par le Sol.

LAC : Lignes Aériennes de Contact.

HTA : haute tension A.

AGV : Automotrices à Grande Vitesse.

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsions.

THD : Taux de distorsion harmonique.

DPF: Displacement Power Factor.

MFDHPF: Modified and Rapid Decoupled Harmonic Power Flow.

FFT : Transformée Rapide de Fourier.

PLL: Phase-Locked Loop.

TGBT : Tableaux Généraux Basse Tension.

- **FAP** : Filtre actif parallèle.
- FAS: Filtre actif série.
- **UPQC:** Unified Power Quality Conditioner.
- **TPSS:** (Traction power supply system).
- **ERS:** Electrical railway system.
- FLC: Fuzzy logic Controller
- LGV : linge grande vitesse
- **TGV** : Train à grande vitesse

ملخص

إن أنظمة الجر الكهربائي خاصة المتعلقة بأنظمة السكك الحديدية تواجه تحديات ومشاكل متعددة تتعلق بالاضطرابات الكهربائية، مثل زيادة الحمل وتقلبات الجهد. هذه الاضطرابات تؤثر بشكل كبير على موثوقية وسلامة هذه الأنظمة، مما يجعل تحسين أدائها وتقليل المشكلات الكهربائية ضرورة ملحة. إن التقنيات الحديثة والتقدم في مجال الهندسة الكهربائية توفر فرصًا جديدة للتعامل مع هذه التحديات. يمكن تطبيق أنظمة مراقبة ذكية وأتمتة على نطاق واسع لمراقبة وإدارة الجر الكهربائية على النظام. تقليل الأعباء الكهربائية على النظام.

بالإضافة إلى ذلك، يتم تطوير تقنيات متقدمة للمرشحات ومعدات التحكم الكهربائي للتعامل مع مشكلات التوافقيات والرنين التوافقي. تحتوي هذه التقنيات على تصميمات متطورة لمكونات النظام الكهربائي واستخدام مواد متقدمة تساهم في تحسين جودة الطاقة وتقليل الاضطرابات. فيما يتعلق بالتطبيقات العملية، يتم استخدام نماذج المحاكاة في برنامج مطلاب لاختبار وتقييم الحلول المقترحة قبل تنفيذها على نطاق واسع وقد تم الحصول على نتائج مرضية تبين مدى قوة وفعالية المرشح ونظام التحكم المستخدم حيث توفر هذه النماذج إمكانية دراسة أثر التحسينات المقترحة بشكل دقيق ومتكرر قبل تطبيقها في الواقع.

بالختام، يجمع هذا البحث على تقديم منهجية شاملة لتحسين الطاقة في أنظمة الجر الكهربائي، مما يساهم في زيادة كفاءتها وتحسين موثوقيتها وسلامتها، ويسهم أيضًا في تعزيز استدامة وفعالية استخدام هذه الانظمة في هذا القطاع الحيوي.

الكلمات المفتاحية :جودة الطاقة، المحاكاة، الجوانب الاقتصادية، التوافقيات، نظام السكك الحديدة الكهربائية ، المنطق الضبابي

Résumé

Les systèmes de traction électrique, en particulier les systèmes ferroviaires, font face à de multiples défis et problèmes liés aux perturbations électriques, telles que la surcharge et les fluctuations de tension. Ces perturbations ont un impact significatif sur la fiabilité et la sécurité de ces systèmes, ce qui rend impératif d'améliorer leurs performances et de réduire les problèmes électriques. Les avancées technologiques modernes et les progrès en génie électrique offrent de nouvelles opportunités pour faire face à ces défis. Des systèmes de surveillance intelligents et une automatisation étendue peuvent être largement utilisés pour surveiller et gérer la traction électrique de manière plus efficace. De plus, les techniques d'amélioration de l'efficacité énergétique contribuent à réduire la surconsommation, réduisant ainsi la charge électrique sur le système.

De plus, des techniques avancées de filtrage et de contrôle électrique sont en cours de développement pour traiter les problèmes de compatibilité électromagnétique et de résonance. Ces techniques comprennent des conceptions avancées de composants du système électrique et l'utilisation de matériaux de pointe qui améliorent la qualité de l'énergie et réduisent les perturbations. Concernant les applications pratiques, des modèles de simulation sont utilisés dans logiciel MATLAB/Simulink pour tester et évaluer les solutions proposées avant leur mise en œuvre à grande échelle. Des résultats satisfaisants ont été obtenus, montrant la robustesse et l'efficacité des filtres et des systèmes de contrôle utilisés. Ces modèles permettent une étude précise et répétée de l'impact des améliorations proposées avant leur application dans la réalité.

En conclusion, cette recherche présente une méthodologie globale pour améliorer l'énergie dans les systèmes de traction électrique, ce qui contribue à augmenter leur efficacité, à améliorer leur fiabilité et leur sécurité et à renforcer la durabilité et l'efficacité de l'utilisation de ces systèmes vitaux dans ce secteur.

Mots clés : Qualité d'Energie, simulation, aspects économique, Harmonique, chaine de traction ferroviaire, logique floue

Abstract

Electric traction systems, in particular railway systems, face multiple challenges and issues related to electrical disturbances, such as overloading and voltage fluctuations. These disturbances significantly impact the reliability and safety of these systems, making it imperative to enhance their performance and reduce electrical problems. Modern technological advancements and progress in electrical engineering offer new opportunities to address these challenges. Smart monitoring systems and extensive automation can be widely employed to monitor and manage electric traction more efficiently. Furthermore, energy efficiency enhancement techniques help reduce overconsumption, thereby reducing the electrical load on the system.

Additionally, advanced electrical filtering and control techniques are under development to address electromagnetic compatibility and resonance issues. These techniques include advanced designs of electrical system components and the use of advanced materials that enhance power quality and reduce disturbances. Regarding practical applications, simulation models are utilized in MATLAB/Simulink software to test and evaluate proposed solutions before their large-scale implementation. Satisfactory results have been achieved, demonstrating the robustness and efficiency of the filters and control systems used. These models allow for a precise and repeated study of the impact of proposed improvements before their real-world application.

In conclusion, this research presents a comprehensive methodology for enhancing energy in electric traction systems, contributing to increased efficiency, improved reliability and safety, and the overall sustainability and effectiveness of these vital systems in this sector.

Keywords: Power Quality, Simulation, Economic Aspects, Harmonics, Railway Traction System, Fuzzy Logic

Introduction Générale

Introduction Générale

Le domaine de la traction électrique ferroviaire est en constante évolution, Face à l'impérieuse nécessité de relever les défis pressants en matière d'efficacité énergétique, de fiabilité de l'énergie et de considérations économiques, le domaine de la mobilité durable et écologique est activement poussé à évoluer, l'adoption croissante de systèmes de traction électrique dans les chemins de fer représente un pas important pour atténuer l'impact du transport sur le changement climatique. Les trains électriques offrent un avantage significatif par rapport aux locomotives diesel traditionnelles, car ils émettent considérablement moins de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques, contribuant ainsi à réduire les émissions nocives associées au transport ferroviaire. Ces dernières années, L'exploration de l'efficacité énergétique dans le domaine ferroviaire a pris un nouvel essor, donnant lieu à de nombreuses études visant à optimiser la consommation d'énergie des trains. Ces efforts ont conduit à l'introduction de technologies avancées telles que le freinage régénératif, cette technologie permet de récupérer une fraction de l'énergie dissipée lors du freinage, puis de la réinjecter pour l'accélération., améliorant ainsi l'efficacité globale du système. Cette innovation est particulièrement bénéfique pour les trains à forte fréquence d'arrêts et de départs, comme les trains de banlieue et les métros. Outre l'efficacité énergétique, la qualité de l'énergie utilisée dans les systèmes de traction électrique est un facteur crucial pour assurer une exploitation fiable et sûre des chemins de fer. Les perturbations électriques, notamment les harmoniques, peuvent perturber le bon fonctionnement du système et entraîner des dysfonctionnements ou des dommages aux équipements. Une mauvaise qualité de l'énergie peut également entraîner des pertes d'efficacité et une augmentation des coûts de maintenance, nuisant à la fiabilité et à la rentabilité des opérations ferroviaires. Pour remédier à ces problèmes, Les ingénieurs et chercheurs mettent leurs efforts sur l'élaboration de solutions visant à rehausser la qualité de l'énergie, en mettant l'accent sur la réduction des harmoniques et des interférences électromagnétiques. Sur le plan économique, L'efficacité énergétique et la qualité de l'énergie revêtent une importance capitale dans la rentabilité et la compétitivité des activités ferroviaires. Des systèmes de traction plus efficaces permettent de réduire les coûts d'exploitation, de diminuer la dépendance aux combustibles fossiles coûteux et d'améliorer la rentabilité des compagnies ferroviaires. D'autre part, des problèmes liés à la qualité de l'énergie peuvent entraîner des temps d'arrêt coûteux, des retards opérationnels et des dépenses supplémentaires en maintenance. Ainsi, L'attention est portée sur la quête de solutions, pour optimiser la qualité de l'énergie, afin d'assurer une exploitation plus fiable et efficiente du réseau ferroviaire.

Dans cette perspective, l'industrie ferroviaire continue de collaborer étroitement avec les universités, les centres de recherche et les institutions se concentrent de réglementation pour développer des technologies et des pratiques novatrices. L'électrification de nouvelles lignes et l'amélioration des infrastructures existantes sont également des priorités pour permettre une électromobilité accrue dans les transports ferroviaires à l'échelle mondiale. Alors que les besoins en mobilité augmentent, les investissements dans la traction électrique et la recherche sur les technologies connexes joueront un rôle déterminant pour façonner l'avenir du transport ferroviaire, en favorisant une transition durable en direction d'une mobilité plus respectueuse de l'environnement, cette thèse est structurée en quatre chapitres distincts :

Le premier chapitre sera dédié à l'état de l'art de l'efficacité énergétique dans le secteur ferroviaire, en se penchant sur les techniques utilisées dans les recherches scientifiques pour améliorer l'énergie de traction. Cette analyse permettra de comprendre les avancées récentes et les défis actuels dans le domaine. Le deuxième chapitre abordera l'architecture de la chaîne de traction ferroviaire. Nous analyserons les principaux composants tels que les moteurs

Introduction Générale

électriques, les onduleurs et les convertisseurs, ainsi que leurs interactions au sein du système. Cette analyse approfondie permettra d'identifier les opportunités d'optimisation et de conception de systèmes plus efficaces ;

Le troisième chapitre sera consacré à la qualité de l'énergie et aux perturbations électriques dans les systèmes de traction ferroviaire. Nous étudierons les différentes sources de perturbations, notamment les harmoniques et leur impact sur la qualité de l'énergie fournie au système. Des solutions pour atténuer ces perturbations seront également examinées ;

Enfin, le quatrième chapitre portera sur la mise en pratique d'une nouvelle méthode de suppression des harmoniques dans la chaîne de traction électrique ferroviaire. Nous proposerons l'utilisation de filtres actifs associés à un bloc de commande très efficace, reposant sur un contrôleur logique flou (FLC) remarquable pour sa simplicité et son efficacité. Les résultats obtenus grâce à des simulations réalisées à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK permettront de valider cette approche et d'évaluer son impact sur l'efficacité énergétique et la qualité de l'énergie du système.

En conclusion, Cette thèse apportera une contribution significative à l'avancement des connaissances dans le domaine de la traction électrique ferroviaire. en abordant de manière globale les enjeux d'efficacité énergétique, de qualité de l'énergie et d'aspects économiques. Les résultats obtenus grâce à la nouvelle technique de suppression des harmoniques pourront avoir des implications importantes pour une utilisation plus durable et économique de l'énergie dans le secteur ferroviaire, contribuant ainsi à la migration vers des systèmes de transport respectueux de l'environnement et économiquement viables.

Chapitre 1

L'état de l'art "Avancées dans l'Optimisation de l'Efficacité Énergétique dans la Traction Ferroviaire"

1.1. Introduction

L'efficacité énergétique dans la traction ferroviaire est un enjeu crucial dans le cadre de la transition actuelle vers une énergie plus propre et durable. Les systèmes ferroviaires ont un rôle crucial dans le transport de passagers et de marchandises à grande échelle, mais leur consommation d'énergie peut représenter un défi majeur en termes d'impact environnemental et économique. Un grand nombre de techniques ont été développées et sont mises en pratique pour améliorer l'efficacité énergétique dans la traction ferroviaire, en mettant particulièrement l'accent sur l'aspect économique. L'objectif principal de ces techniques est de réduire la consommation énergétique tout en maintenant la qualité et la fiabilité du service ferroviaire.

Parmi les approches utilisées, certaines se concentrent sur l'amélioration de la conception des locomotives et des wagons pour réduire la traînée et les pertes d'énergie. D'autres techniques incluent l'utilisation de technologies plus efficientes, telles que les moteurs à haut rendement, les systèmes de récupération d'énergie et les solutions de stockage d'énergie.

Par ailleurs, des stratégies d'optimisation de la gestion énergétique sont également mises en place, comme la planification efficace des itinéraires, l'optimisation des vitesses et des arrêts, ainsi que la gestion du trafic pour minimiser les pertes d'énergie. Ces approches économiques visent pour réaliser des économies substantielles sur les coûts opérationnels pour les opérateurs ferroviaires, tout en contribuant à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à préserver l'environnement. Cependant, il y a des défis associés à la mise en place de ces techniques, en particulier les investissements initiaux importants d'adoption des technologies plus efficientes et les défis techniques pour intégrer efficacement ces systèmes dans les infrastructures existantes.

Pour encourager l'adoption généralisée de ces pratiques écoénergétiques, des mesures incitatives peuvent être mises en place, telles que des subventions ou des avantages fiscaux pour les opérateurs ferroviaires qui investissent dans des technologies vertes.

1.2. Définition de la Chaine de Traction ferroviaire

Une chaîne de traction comprend tous les composants qui font avancer le train. Ils sont configurés de manière différente au niveau de l'étage d'entrée, selon le type de la source

d'alimentation, continue ou alternatif. La (Figure 1.1) montre le schéma général d'une chaîne de traction ferroviaire. Le pantographe reçoit l'électricité transmise par la caténaire.

L'électricité passe par l'étage d'entrée, son rôle est de fournir une source de tension continue et le niveau de tension souhaité pour les onduleurs. L'onduleur transforme la source continue en une source alternative à fréquence et tension variables afin d'alimenter le moteur de traction. L'énergie mécanique de I 'arbre moteur est envoyée aux roues par l'intermédiaire d'un réducteur de vitesse [21].



1.1 Schéma général d'une chaîne de traction ferroviaire.

1.3. Type de la chaine de traction ferroviaire

1.3.1. Chaine de traction pour les motorisations à courant continu

Avant les années 60, les systèmes de traction ferroviaire utilisaient des moteurs à courant continu dépourvus de convertisseurs de puissance. Pour ajuster leur vitesse, des éléments résistifs étaient connectés en série. Bien que ces systèmes aient été considérés fiables et performants à l'époque, leur rendement était relativement faible en l'absence de convertisseurs. Toutefois, l'avènement des premiers composants électroniques de puissance a entraîné des avancées significatives. Cela a ouvert la voie à l'utilisation de hacheurs à thyristors, qui alimentent les moteurs à courant continu avec excitation série avec une tension variable voir (Figure 1.2).

L'emploi de thyristors nécessitait l'installation d'un circuit de commutation forcée comprenant des thyristors additionnels et un circuit auxiliaire. Grâce à ces convertisseurs, il a été possible de concevoir des premières locomotives à forte puissance (4 MW).

Dans le cas d'une tension continue de 1500V, la chaîne de traction à courant continu est généralement comportant un filtre d'entrée, puis un hacheur, suivi d'une inductance pour lisser le courant.

En revanche, pour la chaîne de traction alternative, on utilise un transformateur combiné à un redresseur avant de se connecter aux éléments de la chaîne de traction continue.

Cette intégration de certains composants simplifie le système global de traction, améliorant ainsi son efficacité et ses performances [53].



1.2 Chaine de traction pour les motorisations à courant continue.

1.3.2. Chaine de traction pour les motorisations à synchrone.

Ensuite, les moteurs à courant continu, qui nécessitaient une maintenance coûteuse en raison de la détérioration des balais et des collecteurs, ont été progressivement remplacés par des moteurs synchrones à rotor bobinés, alimentés par des onduleurs de courant à thyristors voir (Figure 1.3). Un dispositif de détection de position est installé sur l'arbre du moteur pour ajuster la fréquence des courants dans le stator en fonction de la position du rotor. Dans le système de traction fonctionnant à 1500V en courant continu, on trouve un filtre d'entrée, un hacheur, une inductance de lissage et enfin un onduleur de courant. Pour la chaîne de traction alternative, elle se compose d'un transformateur suivi d'un redresseur de tension, ainsi que des composants du système de traction en courant continu [53].



1.3 Chaine de traction pour les motorisations à synchrone.

1.3.3. Chaine de traction pour les motorisations à asynchrone.

L'introduction des thyristors à grille blocable (GTO) a ouvert la voie au développement d'onduleurs de tension pour alimenter des machines asynchrones avec un rotor à cage d'écureuil (voir Figure 1.4).

Dans les systèmes de traction fonctionnant à 1500V en courant continu, on on trouve un filtre d'entrée, suivi d'un onduleur de tension. Quant aux chaînes de traction alternatives, deux versions existent : l'une équipée d'un étage d'entrée à redressement de tension et l'autre dotée d'un étage d'entrée à redressement de courant avec modulation de largeur d'impulsions (comme dans le cas du TGV) [53].



1.4 Chaine de traction pour les motorisations à asynchrone.

1.3.4. Chaine de traction actuelle pour les motorisations à synchrone et asynchrone.

Les systèmes de traction actuels comme illustré dans la (Figure 1.5) se composent de deux parties distinctes : celle fonctionnant à 1500V en courant continu, qui inclut un filtre d'entrée et un onduleur de tension.

En ce qui concerne la chaîne de traction alternative, elle est constituée d'un transformateur, d'un redresseur de courant utilisant la modulation de largeur d'impulsion, ainsi que d'un onduleur de tension équipé d'IGBT (Transistor bipolaire à grille isolée).

Les locomotives les plus récentes ont remplacé les moteurs asynchrones avec rotor à cage d'écureuil par des moteurs synchrones à aimants permanents, fréquemment utilisés dans les trains à grande vitesse [53].



1.5 Chaine de traction actuelle.

1.4. Aperçu des principaux facteurs qui affectent l'efficacité énergétique du transport ferroviaire

L'efficacité énergétique du transport ferroviaire dépend de plusieurs facteurs qui peuvent influencer La dépense énergétique et les rejets des émissions de gaz à effet de serre qui en résultent. Voici un aperçu des principaux facteurs qui affectent l'efficacité énergétique du transport ferroviaire et des méthodes adoptées pour l'améliorer, ainsi que les effets économiques associés [36] :

1.4.1. Facteurs affectant l'efficacité énergétique du transport ferroviaire

1.4.1.1. Technologie des locomotives

Les technologies de propulsion utilisées dans les locomotives ont un impact significatif sur leur efficacité énergétique.

Les locomotives plus anciennes peuvent être moins économes en carburant que les modèles plus récents qui intègrent des technologies plus avancées, telles que la récupération d'énergie lors du freinage ou l'utilisation de moteurs électriques plus efficaces.

- Electrification : Les locomotives électriques présentent généralement une meilleure efficacité énergétique que les locomotives diesel, particulièrement lorsqu'elles sont alimentées par des sources d'énergie renouvelable. L'électrification des voies ferrées aide à diminuer les émissions de carbone et favorise un système de transport plus écologique.
- **Moteurs électriques** : Les locomotives contemporaines sont fréquemment pourvues de moteurs électriques à courant alternatif (AC), qui surpassent en efficacité les anciens moteurs à courant continu (DC).

Les moteurs à courant alternatif présentent un rendement énergétique supérieur et demandent moins d'entretien, conduisant ainsi à des économies énergétiques à long terme.

• Systèmes de récupération d'énergie au freinage (Régénération) : Un grand nombre de locomotives contemporaines intègrent des systèmes de récupération d'énergie qui transforment l'énergie cinétique produite pendant le freinage en électricité.

Cette électricité peut être réinjectée dans le réseau électrique ou stockée en vue d'une utilisation ultérieure, réduisant ainsi la consommation d'énergie globale du train.

 Gestion électronique de la puissance : Les systèmes de gestion électronique de la puissance (GEP) sont déployés pour maximiser l'efficacité énergétique dans les locomotives.

Ces systèmes surveillent et contrôlent le flux d'énergie, ce qui permet d'ajuster la puissance fournie en fonction des besoins du train à un moment donné, optimisant ainsi l'efficacité énergétique.

• Matériaux légers : L'intégration de matériaux à faible masse dans la fabrication des locomotives joue un rôle essentiel dans la diminution de leur poids global, ce qui, à son tour, permet de consommer moins d'énergie pour déplacer le train.

Des matériaux composites et des alliages légers sont de plus en plus utilisés pour atteindre cet objectif.

 Aérodynamique : La conception aérodynamique des locomotives et des wagons peut également améliorer l'efficacité énergétique en réduisant la traînée de l'air lorsque le train se déplace à grande vitesse.

Une meilleure aérodynamique peut diminuer la consommation d'énergie requise pour vaincre la résistance de l'air[36].

1.4.1.2. Masse des trains

La masse totale du train, y compris les wagons de marchandises ou les voitures de passagers, influence la quantité d'énergie nécessaire pour déplacer le train.

Réduire la masse du train lorsque cela est possible peut améliorer son efficacité énergétique [36].

1.4.1.3. Récupération d'énergie

La récupération d'énergie électrique est un facteur important qui peut améliorer considérablement l'efficacité énergétique du transport ferroviaire.

Cette approche vise à capturer et réutiliser une partie de l'énergie dissipée lors du freinage des trains, ce qui permet de diminuer la consommation totale d'énergie tout en améliorant l'efficience du système ferroviaire.

Voici quelques raisons pour lesquelles la récupération d'énergie électrique est si pertinente pour l'efficacité énergétique du transport ferroviaire :

• Réduction des pertes d'énergie : Lorsque les trains traditionnels freinent, l'énergie cinétique est habituellement dissipée sous forme de chaleur par les systèmes de freinage mécaniques, entraînant une perte d'énergie considérable.

En utilisant la récupération d'énergie électrique, une portion de cette énergie est capturée et convertie en électricité, minimisant ainsi les pertes et permettant de réutiliser cette énergie pour d'autres besoins du train.

• **Réutilisation de l'énergie** : L'énergie électrique récupérée peut être réutilisée à bord du train pour alimenter divers systèmes et accessoires, tels que l'éclairage, le chauffage, la climatisation ou les systèmes de contrôle.

En utilisant cette énergie régénérée, les trains peuvent réduire leur dépendance à l'électricité provenant des réseaux externes, ce qui entraîne une diminution de la consommation d'énergie globale [36].

1.4.2. Effets économiques de l'amélioration de l'efficacité énergétique du transport ferroviaire

- Abaissement des frais d'exploitation : L'adoption de technologies et de pratiques plus économes en énergie peut réduire les coûts de carburant pour les opérateurs ferroviaires, ce qui peut entraîner des économies importantes à long terme.
- Amélioration de la compétitivité : Une efficacité accrue énergétique peut rendre le transport ferroviaire plus compétitif par rapport à d'autres moyens de transport, ce qui peut attirer davantage de fret et de passagers.
- Réduction des émissions et responsabilité environnementale : Une meilleure efficacité énergétique contribue à diminuer les émissions de gaz à effet de serre, ce qui peut permettre aux entreprises ferroviaires de se conformer plus facilement à des réglementations environnementales strictes.
- Engagements financiers dans l'innovation : l'accroissement de l'efficience énergétique dans le domaine des transports ferroviaire peut encourager la recherche et le développement de nouvelles technologies, avec des effets économiques bénéfiques à long terme.
- Une étude d'examen sur les économies d'énergie réalisées dans le secteur du transport ferroviaire [36].

1.5. La position du transport ferroviaire aujourd'hui

L'efficience énergétique des véhicules ferroviaires est déjà très élevée de nos jours, ce qui restreint considérablement les options d'amélioration supplémentaire de la consommation d'énergie. Comparée à d'autres systèmes de transport, la consommation spécifique d'énergie des chemins de fer est extrêmement faible.

Par conséquent, cet énorme avantage par rapport aux autres systèmes est mis en évidence dans de nombreuses publications.

Les chemins de fer ont prouvé leur position excellente dans les comparaisons des émissions spécifiques de dioxyde de carbone (CO2) par tonne-kilomètre pour le transport de fret et de passagers [1].

Ces émissions spécifiques sont presque directement associées à la consommation spécifique d'énergie, à l'exception du mix énergétique entre les centrales fossiles, nucléaires et renouvelables dans la production d'énergie. Malgré cette excellente position, des améliorations sont encore possibles.

Dans [2], il est souligné que le secteur du transport ferroviaire a réduit la consommation d'énergie dans le trafic passager de 15 % et dans le fret de 19 % entre 1990 et 2000. L'avenir du transport ferroviaire sera caractérisé par une concurrence sous pression des coûts et par la compatibilité environnementale par rapport aux autres modes de transport [2].

Cela signifie que le transport ferroviaire doit continuer à maintenir sa bonne position par rapport aux systèmes concurrents, qui, de leur côté, s'efforceront également d'améliorer leurs positions. Par conséquent, les améliorations possibles concernant la consommation d'énergie du transport ferroviaire seront présentées.

1.5.1. Réduction des pertes de freinage

L'une des méthodes les plus efficaces afin d'améliorer l'efficience énergétique des chemins de fer consiste à améliorer l'utilisation de l'énergie de freinage. Une étude récente [3] a démontré qu'en adoptant une conduite souple, il est possible de réduire la consommation d'énergie jusqu'à 12 % par rapport à la consommation moyenne d'un train régional dans des conditions similaires. Si les paramètres de cette conduite souple, telle que pratiquée par le meilleur conducteur, sont intégrés automatiquement dans le système de commande du train, on peut réaliser une baisse considérable de la consommation énergétique totale[3].

1.5.2. Prévention des conflits de parcours

Cependant, même les profils de vitesse optimisés peuvent parfois être perturbés par des conflits sur la voie avec d'autres trains. Les conséquences sont des signaux lumineux rouges qui entraînent généralement des freinages intensifs.

Ces conflits sont extrêmement perturbants pour l'exploitation ferroviaire, en particulier dans le trafic longue distance. Des calculs effectués dans [4] ont montré que seulement une section lente de 300 mètres à 50 km/h au lieu de 110 km/h sur un parcours de plus de 100 km entraîne une consommation d'énergie supplémentaire d'environ 100 MJ.

L'effet est causé non seulement par le freinage du train poussé-tiré (push-pull train), mais également par l'accélération accrue jusqu'à la vitesse maximale et le freinage continu sur le parcours suivant pour compenser le temps perdu. La raison de ces conflits de parcours est le léger retard de certains trains.

Les centres de contrôle de la circulation modernes sont capables de prédire ces conflits dans les zones de croisement et choisiront des itinéraires alternatifs pour les trains sans conflits [3].

1.6.Les techniques utilisées pour l'efficacité énergétique

1.6.1. Smart Drive [5]

Cette technique présentée le développement du package Smart Drive visant à mettre en œuvre une stratégie de conduite écoénergétique. Les résultats proviennent d'une collaboration entre Ricardo Rail et le (Birmingham Centre for Railway Research and Education) (BCRRE).

Les techniques avancées d'optimisation de trajectoire pour tramways et trains développées par BCRRE dans le cadre du projet UKTRAM More Energy Efficiency Tram ont été intégrées dans l'offre de produit Smart Drive de Ricardo. Ce package d'optimisation de trajectoire et de formation des conducteurs (SmartDrive) a été spécialement développé pour être utilisé sur des trams, des métros et certains systèmes de trains lourds.

Un simulateur a été conçu pour reproduire les mouvements des véhicules ferroviaires et calculer la consommation détaillée du système d'énergie avec différentes trajectoires de train, En prenant en considération les tracés qui reçoivent une source d'alimentation électrique soit en courant alternatif (AC) soit en courant continu (DC).

Les résultats de l'évaluation énergétique fournis par le simulateur proposent plusieurs solutions potentielles pour économiser de l'énergie sur les itinéraires existants. Pour atteindre une optimisation rapide et efficace, un algorithme Brute Force amélioré a été développé [5].

1.6.1.1 Flux d'énergie dans les systèmes ferroviaires électriques

Les véhicules ferroviaires électriques collectent l'électricité du pantographe pour l'usage de la traction et des systèmes auxiliaires. L'énergie de traction est l'électricité utilisée par le système de traction pour déplacer le train et surmonter les forces de friction et gravitationnelles. La (Figure 1.6) illustre le schéma habituel du flux énergétique à travers le système de propulsion [6].

Au cours de la transformation de l'énergie de propulsion en énergie cinétique, un montant d'énergie est dissipée sous forme de pertes. La perte de traction est l'énergie dissipée dans les convertisseurs électroniques embarqués et les moteurs sous forme thermique.

L'énergie de traction, diminuée de la perte de traction, devient l'énergie mécanique exportée par les moteurs. Les parties de l'énergie mécanique utilisées pour surmonter les forces de friction et gravitationnelles sont définies respectivement comme perte de mouvement et perte de potentiel. Enfin, le train atteint une vitesse et une énergie cinétique.

Dans le cas où le véhicule ferroviaire est doté de dispositifs de freinage régénératif, une fraction de l'énergie de mouvement peut être récupérée sous forme d'électricité durant le processus de freinage. L'énergie de freinage régénératif peut être réutilisée par d'autres véhicules ferroviaires, mais son utilisation dépend principalement de la réceptivité du système électrique de traction et de l'horaire [6, 7].

L'optimisation de l'énergie de freinage régénératif n'est pas intégrée dans le système Smart Drive proposé dans [5].



1.6 Diagramme de flux d'énergie de traction typique.

1.6.1.2. Simulateur de mouvement des trains

Le mouvement du train est modélisé en se basant sur les caractéristiques du véhicule et des données de l'itinéraire. Les caractéristiques du véhicule comprennent la masse du véhicule, les paramètres d'effort de traction et les constantes de Davis. Les données de l'itinéraire incluent la pente, les limitations de vitesse et les positions des stations le long de l'itinéraire. La (figure 1.7) décrit la structure du simulateur de mouvement.

Les stratégies de conduite sont considérées comme des entrées dynamiques pour le simulateur de mouvement des trains, ce qui inclut généralement la motorisation, la croisière, le roulement à vide et le freinage. Le simulateur fournit le profil de vitesse du train en fonction des styles de conduite et des entrées fixes. Selon les résultats de l'évaluation de l'énergie de traction, les stratégies de conduite peuvent être optimisées pour réaliser des économies d'énergie de traction [5].



1.7 Structure de simulation de mouvement de train.

1.6.2. Une approche systémique afin de diminuer la consommation énergétique des transports ferroviaires urbains

L'efficacité énergétique du transport ferroviaire urbain dépend d'une multitude de facteurs liés les uns aux autres, ce qui demande une approche holistique, allant au-delà des économies d'énergie au niveau des sous-systèmes.

Ce document propose une approche holistique pour réduire la consommation globale d'énergie du transport ferroviaire urbain. Il commence par une description générale de ce mode de transport, y compris une évaluation de sa répartition énergétique typique. Ensuite, une évaluation complète des principales pratiques, stratégies et technologies actuellement disponibles pour réduire la consommation énergétique est présentée.

Cela comprend des méthodes de freinage régénératif, une conduite écoénergétique, la réduction des pertes de traction, l'optimisation des fonctions de confort, la mesure de l'énergie, la gestion intelligente de l'alimentation et la micro génération d'énergie renouvelable.

Enfin, une méthodologie claire et logique est décrite pour définir et mettre en pratique de manière optimale des schémas d'économie d'énergie dans les systèmes de transport ferroviaire urbain.

Cela inclut des lignes directrices générales pour une évaluation qualitative et une comparaison des mesures, ainsi qu'une discussion sur les principales interdépendances entre elles.

En guise d'exemple hypothétique d'application, la technique conclut que la consommation énergétique dans les systèmes de transport ferroviaire urbain existants pourrait être réduite d'environ 25 à 35 % grâce à la mise en pratique d'horaires optimisés sur le plan énergétique, de stratégies de conduite écoénergétiques, d'un meilleur contrôle des fonctions de confort dans les véhicules et de dispositifs de stockage d'énergie en bordure de voie [8].

1.6.2.1. Systèmes de traction économes en énergie

1.6.2.1.1. Réduction des pertes d'énergie dans le réseau d'alimentation

Les pertes résistives dans le réseau de distribution électrique sont une fonction quadratique du courant. Par conséquent, elles peuvent être considérablement réduites en limitant les pics de puissance causés par l'accélération simultanée de différents trains dans le réseau.

L'optimisation des horaires et l'utilisation de technologies de freinage régénératif sont des mesures clés à cet effet, comme mentionné précédemment. De même, les pertes d'énergie peuvent être réduites en choisissant des tensions d'électrification plus élevées, bien que cela puisse entraîner des coûts d'investissement excessivement élevés dans les systèmes existants.

Une autre option afin de diminuer les pertes d'énergie dans le réseau d'alimentation électrique est de choisir des matériaux à faible résistance pour les lignes d'alimentation. Malgré des coûts d'investissement relativement élevés, un nombre croissant de systèmes alimentés par un troisième rail (par exemple, le métro de Londres) remplacent les rails conducteurs en acier standard par des rails à base d'aluminium, offrant ainsi une résistance jusqu'à 50 % plus faible [9]. Les câbles supraconducteurs pourraient constituer une alternative aux conducteurs de ligne conventionnels, mais bien que prometteuse, Actuellement, cette technologie est toujours en phase de recherche et de développement [10,11].

1.6.2.1.2. Réduction des pertes dans les équipements de traction embarqués

Les pertes d'énergie dans l'équipement de traction embarqué sont principalement dues à l'inefficacité des moteurs eux-mêmes, tandis que les pertes au niveau des convertisseurs de puissance et les systèmes de transmission sont relativement mineures.

Par conséquent, les plus grandes améliorations de l'efficacité de la traction peuvent être obtenues en utilisant des moteurs plus efficaces. À cet égard, le moteur synchrone à aimants permanents (PMSM) représente une alternative très prometteuse aux machines asynchrones de pointe en raison de son rendement très élevé pouvant atteindre jusqu'à 97% [12].

Les PMSM utilisent des aimants permanents dans le rotor au lieu du courant d'excitation conventionnel pour générer le champ magnétique, ce qui réduit les pertes électriques.

De plus, leurs besoins de refroidissement moindres permettent de monter les PMSM dans des configurations totalement fermées, ce qui permet des conceptions plus légères et plus compactes avec moins d'entretien et des émissions sonores réduites [13].

De plus, le couple élevé offert par les PMSM facilite la mise en œuvre d'une configuration à entraînement direct (sans engrenages), ce qui peut encore réduire les pertes d'énergie, la masse et les émissions sonores [14,15]. Cependant, un inconvénient majeur des moteurs synchrones est la nécessité d'onduleurs dédiés [16-18], ce qui augmente le coût d'investissement.

Le PMSM est une technologie disponible commercialement qui a été largement utilisée dans les applications ferroviaires urbaines avec succès. Par exemple, les PMSM ont été testés dans les systèmes ferroviaires de banlieue Hankyu et Tokyo (Japon) avec des économies d'énergie de traction respectives de 9% et 12-13% [19]. Une gestion optimale de l'équipement de traction en fonction des conditions d'exploitation peut également entraîner des augmentations de l'efficacité de traction de 1 à 5% [20,21]. Par exemple, éteindre certains des groupes de traction au lieu de les faire fonctionner tous à charge partielle pendant les phases de roulement à vide, de croisière ou d'arrêt, peut réduire les pertes d'énergie dans les moteurs et les convertisseurs.

Ce sont des mesures opérationnelles qui nécessitent essentiellement une optimisation du logiciel de traction embarqué, cela implique que les frais de mise en place sont plutôt abordables.

1.6.2.1.3. Réduction de la masse du véhicule

Les véhicules plus légers présentent une résistance mécanique plus faible à l'avancement et nécessitent moins d'énergie cinétique pour atteindre le même niveau de performance ; par conséquent, en réduisant la masse globale des véhicules ferroviaires, leur consommation d'énergie de traction sera réduite.

Le ratio du pourcentage d'économies d'énergie de traction par rapport au pourcentage de réduction de masse est estimé à environ 0,6-0,8 pour le transport ferroviaire urbain [22,23], bien qu'il puisse être légèrement inférieur lors de l'utilisation du freinage régénératif. De plus, réduire le poids du matériel roulant entraînera moins de dommages à la voie et une usure réduite des roues et des freins, réduisant ainsi les coûts opérationnels et d'entretien du système [24].

Une méthode simple pour réduire la masse du véhicule est d'introduire des matériaux légers tels que les composites. Robinson et Carruthers [25] ont identifié que la proportion de la masse à vide d'un véhicule qui peut être potentiellement influencée par des substitutions de matériaux est d'environ 80 % ; cela comprend la caisse, les fenêtres, les équipements extérieurs, les bogies, l'intérieur pour les passagers, les sièges, l'intérieur de la cabine du conducteur et les armoires, les portes extérieures et les attelages.

Quelques exemples de projets de réduction de masse utilisant des matériaux légers dans les transports ferroviaires urbains comprennent : le développement de rampes de maintien en composite (50 % plus légères que les barres en acier inoxydable existantes) [23] ; le remplacement des planchers actuels par des constructions sandwich 40 % plus légères [26] ; le développement d'une cabine de conduite résistante aux chocs utilisant des matériaux sandwich composites avancés jusqu'à 40 % plus légère [27].

Il est conseillé de mettre en œuvre ces mesures principalement durant les étapes de conception, bien que des modifications ultérieures puissent également être réalisables dans certains cas.

En plus de l'utilisation de matériaux légers, la masse globale des véhicules ferroviaires peut être réduite en modernisant l'équipement de traction. Par exemple, l'utilisation de PMSMs, L'utilisation de nouveaux semi-conducteurs dans des systèmes d'entraînement sans engrenages [28] permettrait des réductions de masse considérables.

De plus, le contrôle électronique des fonctions de suspension et de guidage (mécatronique) devrait être mis en œuvre dans les futurs véhicules ferroviaires légers [29].

Enfin, ajuster la longueur du train en fonction de la demande des passagers est également une approche intéressante pour économiser de l'énergie grâce à la réduction de masse, notamment pendant les périodes creuses [30,31].

1.6.3. Optimisation de l'efficience énergétique des systèmes de métro (Évaluation et amélioration des stratégies de réduction de la consommation d'énergie de traction)

Une attention croissante est portée à l'efficacité énergétique des systèmes de métro afin de diminuer les frais d'exploitation et de promouvoir la durabilité des réseaux ferroviaires. Les recherches classiques se sont penchées sur l'étude de stratégies opérationnelles écoénergétiques et de conceptions de systèmes écoénergétiques de manière distincte, dans le but commun de réduire au minimum la consommation d'énergie de traction.

Cette étude vise à combiner les stratégies opérationnelles et les paramètres de conception du système en analysant comment l'infrastructure et les caractéristiques des véhicules des systèmes de métro influencent la consommation d'énergie de traction opérationnelle. Dans un premier temps, une approche de solution pour le modèle de contrôle de train optimal est présentée, ce qui permet de concevoir le Simulateur de Contrôle de Train Optimal (OTCS).

Ensuite, sur la base de l'OTCS, les performances de certaines stratégies de conception de systèmes écoénergétiques importantes sont étudiées afin d'abaisser la consommation énergétique de traction des trains.

Ces stratégies incluent la réduction de la masse des trains, l'amélioration de la résistance cinématique, la conception du gradient d'économie d'énergie, l'augmentation des forces de traction et de freinage maximales, l'introduction du freinage régénératif et l'optimisation des horaires. En ce qui concerne ces stratégies écoénergétiques, les performances sont finalement évaluées en utilisant l'OTCS avec les données opérationnelles pratiques de la ligne de métro.

L'approche proposée permet une analyse quantitative de la réduction d'énergie associée aux différentes stratégies dans la procédure de conception du système, ce qui peut aider les décideurs à avoir une vue d'ensemble des performances écoénergétiques et à prendre des décisions en équilibrant les coûts et les avantages [32].

16
1.6.3.1. Modèle de contrôle optimal des trains (OTCS)

Le problème de contrôle optimal du train applique l'application de la théorie du contrôle optimal à optimiser la méthode de conduite entre les stations successives, de manière à minimiser l'énergie mécanique de traction [33,34].

$$minE(T) = \int_0^T k_t(t)v(t)F$$
(1.1)

Les variables E, T et v représentent respectivement la consommation énergétique, le temps de trajet et la vitesse du train. F désigne la force de traction maximale disponible, et kt est la force de traction relative, c'est-à-dire le rapport entre la force de traction appliquée et la force de traction maximale. Le modèle de masse ponctuelle du train est largement utilisé pour décrire le mouvement du train selon les équations suivantes :

$$\begin{cases} m \frac{dv(t)}{dt} = k_t F(v(t)) - k_b B(v(t)) - g(s) - r(v), \\ \frac{ds}{dt} = v, \end{cases}$$
(1.2)

où B et kb désignent respectivement la force de freinage maximale disponible et la force de freinage relative. g représente le gradient et la résistance en courbe. r correspond à la résistance en mouvement, incluant la friction et la résistance de l'air. En général, les trains n'appliqueront pas les forces de traction et de freinage simultanément. Ainsi,

$$k_t * k_b = 0. \tag{1.3}$$

Les conditions aux limites et la contrainte concernant la limite de vitesse sont les suivantes :

$$v(0) = v(T) = 0, v \le \bar{V}$$
(1.4)

De plus, la contrainte concernant la distance du trajet doit être respectée.

$$L = \int_0^T v(t) \mathrm{d}t \tag{1.5}$$

De plus, les contraintes sur la force de traction et de freinage relatives sont indiquées comme suit.

 $k_t \in [0,1], k_b \in [0,1]$

Le modèle de contrôle optimal du train est formulé à partir des équations (1) à (6). En mettant en œuvre le principe du maximum de Pontryagin, les stratégies de conduite optimales sont démontrées comme étant composées de l'accélération maximale, de la

conduite avec une puissance partielle, de la conduite avec un freinage partiel, de la décélération et du freinage maximal [33,35].

Des travaux antérieurs [36,37] ont proposé un algorithme numérique pour calculer la stratégie de conduite écoénergétique, qui inclut les séquences de contrôle et les points de commutation correspondants. L'algorithme proposé présente tout d'abord une méthode itérative pour calculer la stratégie de conduite pour une section. Ensuite, la solution est étendue pour résoudre la stratégie de conduite de plusieurs sections en distribuant les unités d'énergie aux sections.

1.6.3.1.1. Calcul de la Stratégie de Conduite pour une Section

Il convient de souligner que la consommation énergétique minimale est déterminée de manière unique par le temps de trajet, et vice versa. Par conséquent, la stratégie de conduite écoénergétique peut être calculée soit en connaissant le temps de parcours, soit en connaissant la consommation énergétique.

Pour une section (définie dans l'algorithme comme une petite partie du trajet avec une pente et une limite de vitesse constantes), les stratégies de conduite de chaque section seront l'accélération maximale (MA), la croisière (CR), le roulement à vide (CO) et le freinage maximal (MB) [38]. Avec la consommation d'énergie donnée, nous pouvons d'abord générer les séquences de vitesse pour la phase MA. Les séquences de vitesse CR seront calculées avec l'énergie restante lorsque la vitesse du train atteint la limite de vitesse. Les séquences de vitesse du reste du voyage seront couvertes par les phases CO et MB. Les détails pour obtenir les séquences de vitesse d'une section donnée sont décrits dans l'Algorithme 1[34].

1.1 Algorithme 1 : calcul de la stratégie de conduite écoénergétique pour une section donnée.2

Tableau 1.1: Algorithme 1 : calcul de la stratégie de conduite écoénergétique pour une section donnée.

Étape 1 : Initialiser la vitesse initiale v_0^j et la consommation d'énergie E_J pour la section j ;

Étape 2 : Diviser la section en n_j morceaux, de sorte que la distance de chaque morceau soit Δ_x ;

Étape 3 : Générer les séquences de vitesse pour la phase d'accélération maximale (MA).

$$v_i^j = v_0^j$$
, alors que $E_J > 0$, $v_i^j < V$, faire $v_{i+1}^{j-2} - v_i^{j2} = \Delta x (F(v_i^j)/(m - g\frac{x_i}{m}))$.
 $E = E - F(v_i^j)\Delta x$

Étape 4 : Si la vitesse v_i^j atteint la limite de vitesse, alors un freinage partiel ou une puissance partielle est appliqué pour maintenir la croisière, et les séquences de vitesse sont calculées comme suit : $v_{i+1}^{j} - v_i^{j2}$

Étape 5 : Générer les séquences de vitesse pour la phase de roulement à vide (CO) comme suit : $v_{i+1}^{j} - v_i^{j2} = 2\Delta x (-r(v_i^j)/m - g\frac{x_i}{m}))$

Étape 6 : Si la phase de freinage maximal (MB) existe, nous calculons les séquences de vitesse de freinage $\{v_i^{j'}\}$ comme suit :

$$v_k^{j\prime} = v_t^j, v_{i+1}^{j-2} - v_i^{j2} = 2\Delta x \left(-\frac{B\left(v_k^{j\prime}\right)}{m} - r(v_k^{j\prime})/m - g\frac{x_k}{m}\right).$$

puis, laissez $v_i^j = \min(v_i^{j'}, v_i^j)$.

Étape 7 : Renvoyer les séquences de vitesse optimales v_i^j et le temps de trajet de cette section. $T_j = \sum_{i=0}^{n_j} \frac{\Delta x}{v_i^j}$.

 Δx est une petite unité de distance, supposée être de 1 mètre dans l'algorithme.

1.6.3.1.2. Calcul de la Stratégie de Conduite pour Plusieurs Sections

Pour faire face aux pentes variables et aux limites de vitesse, le trajet est divisé en plusieurs sections, de sorte que chaque section a une pente et une limite de vitesse constantes. La séquence de vitesse de chaque section peut être générée à l'aide de l'Algorithme 1.

Ensuite, sur la base d'une solution primaire, l'unité d'énergie (une petite quantité d'énergie, supposée être de 0,05 kWh dans cet algorithme) sera tentée d'être distribuée à chaque section afin d'obtenir les réductions de temps correspondantes.

Après une comparaison entre ces réductions de temps, l'unité d'énergie sera finalement attribuée à la section qui peut obtenir la réduction de temps maximale.

Ce processus de distribution sera répété pour réduire le temps de trajet initial jusqu'à ce que le temps de trajet pratique soit atteint, à partir duquel la stratégie de conduite et le profil

de vitesse seront obtenus. Le diagramme du processus de l'algorithme est décrit dans la (Figure 1.8) [36,37,39].



1.8 Le diagramme de flux pour calculer la stratégie de conduite écoénergétique de plusieurs sections.

L'algorithme est utilisé pour concevoir un Simulateur de Contrôle de Train Optimal (OTCS). La distance du trajet, le temps de trajet, la pente, la résistance, les caractéristiques de traction et de freinage, ainsi que la masse du train sont les entrées. Les stratégies de conduite écoénergétiques du train et les consommations d'énergie correspondantes sont les sorties voir (Figure 1.9).

Lorsque les arrêts du train aux stations sont considérés comme une limite de vitesse de 0 km/h, l'OTCS peut également être utilisé pour calculer la stratégie de conduite écoénergétique pour plusieurs sections entre les stations, ainsi que le temps de trajet à chaque section inter station[39].



1.9 Le diagramme de flux du OTCS (Système de Contrôle Optimal des Trains).

éléments du modèle de contrôle optimal du train sur la consommation d'énergie de traction.,

en se basant sur l'OTCS. Une connexion entre les stratégies opérationnelles écoénergétiques et les stratégies de conception écoénergétiques du système a été établie.

Certaines stratégies de conception écoénergétiques, telles que la réduction de la masse, l'optimisation des horaires écoénergétiques, l'amélioration de l'aérodynamique et de la friction de l'air, la conception appropriée des gradients, l'augmentation de la force de traction et de freinage maximale, ainsi que l'introduction du freinage régénératif, ont été mises en évidence. Et cela a été confirmé par les résultats de la simulation dans [32].

1.6.4. Stratégie de contrôle de découplage basée sur la passivité des VSR monophasés de type LCL pour l'élimination des harmoniques dans les systèmes électriques ferroviaires

Le transport ferroviaire est confronté à des problèmes d'harmoniques générées par les redresseurs de source de tension monophasés traditionnels. Ces harmoniques peuvent entraîner des résonances préjudiciables pour le réseau électrique du chemin de fer. Pour remédier à cette situation, une approche consiste à recourir à des filtres de type LCL pour atténuer ces harmoniques. Une approche novatrice a été proposée dans cette étude, appelée stratégie de contrôle non linéaire basée sur la passivité (PBD).

Cette approche permet d'optimiser la qualité de l'énergie injectée dans le réseau électrique, tout en assurant une grande résilience du système. Le modèle mathématique du système VSR monophasé de type LCL est établi et analyse la passivité du système. Le contrôleur PBD régule le courant alternatif en ajoutant des termes d'amortissement supplémentaires. Pour compléter cette approche, un régulateur PI est utilisé pour éliminer les erreurs statiques dans la tension du lien continu.

Les simulations et les expériences montrent les avantages de cette stratégie de contrôle, tels qu'une meilleure qualité de courant, des performances dynamiques améliorées et une plus grande stabilité du système[40].

1.7. Optimisation de la chaîne énergétique

1.7.1. Convertisseur IGBT

Ces dernières années, la chaîne de puissance a atteint un niveau technologique qui n'est pas très éloigné des limites théoriques. Une étape importante dans ce développement a été le remplacement des convertisseurs à thyristors par la technologie GTO (Gate Turn-Off).

Avec un poids, un volume et un nombre de semi-conducteurs de puissance considérablement réduits, cette technologie a contribué à diminuer les pertes du convertisseur jusqu'à 40 %.

Récemment, la technologie GTO a été suivie par les convertisseurs IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) pour les applications de traction, qui offrent de meilleurs algorithmes de contrôle ainsi qu'un couplage simple des modules de convertisseur.

Cela permet le développement d'unités de convertisseur optimisées pour le système de fractionnement individuel. Les unités de contrôle optimisées réduisent non seulement les pertes dans le convertisseur, mais également dans le moteur en appliquant la modulation d'impulsion la plus adaptée à chaque plage de fonctionnement du moteur. En comparaison avec le convertisseur GTO, ces améliorations ont entraîné une bien meilleure efficacité de la chaîne de puissance [40].

1.7.2. Transformateur supraconducteur

Les pertes dans le convertisseur de traction ne constituent qu'une fraction minime des pertes dans la chaîne de puissance. Une source majeure de pertes se trouve dans le transformateur.

C'est particulièrement le cas dans les opérations ferroviaires régionales lorsque les opérations d'accélération et de freinage ultérieures mettent une forte charge sur le transformateur.

Les pertes résultantes dans l'ensemble de la chaîne de puissance pour ce mode d'exploitation sont présentées dans la (Figure 1.10).

Il est clair que la majeure partie des pertes provient du transformateur et du moteur. Des concepts innovants remplacent donc le transformateur conventionnel par un transformateur supraconducteur, ce qui réduit les pertes du transformateur de 90 % et contribue à diminuer la consommation totale d'énergie du train entier de 30 % [41].

1.7.3. Moteur direct

Comme illustré par la (Figure 1.10), les pertes dans le moteur se révèlent être la deuxième plus grande contribution. Actuellement, un concept novateur de système de traction est en cours de développement, faisant usage des avancées technologiques récentes en matière de moteur synchrone à aimants permanents.

Les avantages de ce concept de traction sont évidents : réduction des pertes dans le moteur d'environ 50 % ; niveaux de bruit réduits combinés à une diminution du volume et

de la masse car le moteur est directement accouplé à l'essieu. La conception sans boîte de vitesses élimine également le besoin de lubrifiants et les problèmes environnementaux associés [41].



1.10 Diagramme de répartition des charges d'un train.

1.8. Conclusion

Dans cette section, nous avons examiné diverses idées et recherches scientifiques visant à améliorer l'énergie appliquée en traction électrique ferroviaire et à augmenter l'efficacité énergétique dans ce domaine. Nous avons mis en évidence des avancées technologiques significatives, telles que l'utilisation de convertisseurs GTO et IGBT pour réduire les pertes d'énergie, l'optimisation des profils de vitesse pour économiser l'énergie de freinage et prévenir les conflits de parcours, et l'intégration de transformateurs supraconducteurs pour réduire drastiquement les pertes de transformateur.

De plus, nous avons étudié un concept de traction novateur basé sur un moteur synchrone à aimants permanents, offrant des avantages considérables en termes de réduction des pertes, de niveaux de bruit réduits, ainsi que d'une conception sans boîte de vitesses pour minimiser l'utilisation de lubrifiants et les problèmes environnementaux associés. En intégrant ces idées et avancées dans le domaine de la traction électrique ferroviaire, nous avons démontré L'importance de l'exploration scientifique dans la poursuite de solutions énergétiques plus efficaces et durables.

Ces avancées technologiques offrent un potentiel significatif pour diminuer la consommation d'énergie et l'empreinte écologique tout en améliorant la performance globale des systèmes de transport ferroviaire.

Chapitre 2

Etude architecturale de la Chaine de traction ferroviaire

2.1. Introduction

Depuis ses débuts au 19e siècle, l'industrie ferroviaire a connu une évolution continue et significative. L'une des avancées les plus importantes et remarquables a été l'introduction de la chaîne de traction électrique. Cette innovation, également appelée propulsion électrique ferroviaire, a véritablement révolutionné le secteur en offrant de multiples bénéfices par rapport aux anciens systèmes de propulsion à vapeur et diesel. En utilisant des moteurs électriques pour propulser les trains, la chaîne de traction électrique a éliminé la nécessité de brûler des combustibles fossiles, entraînant ainsi une réduction significative des émissions polluantes.

Cette transition vers l'électrification s'est avérée cruciale pour répondre aux défis environnementaux et aux préoccupations croissantes concernant le changement climatique. Dans un système de chaîne de traction électrique ferroviaire, la locomotive ou le train est propulsé par une source d'énergie électrique externe, généralement des caténaires (câbles suspendus au-dessus des voies) ou un troisième rail situé à proximité des voies. L'électricité fournie est ensuite convertie et distribuée aux moteurs électriques installés sur les bogies du train. L'électrification ferroviaire présente de nombreux avantages techniques et économiques.

En premier lieu, les moteurs électriques présentent un rendement énergétique supérieur à celui des moteurs à combustion interne, ce qui favorise une utilisation plus efficiente de l'énergie électrique et augmente l'autonomie des trains. De plus, les locomotives électriques bénéficient généralement d'une meilleure accélération et d'une plus grande puissance de traction, se traduisant par des performances améliorées en montagne et des temps de trajet réduits. En outre, l'électrification ferroviaire permet de considérables économies sur les coûts d'exploitation à long terme, car l'électricité est généralement moins coûteuse et plus stable que les carburants fossiles. Cette caractéristique renforce la compétitivité des services ferroviaires, en particulier pour les trajets de longue distance, comparativement à d'autres moyens de transport.

L'adoption croissante de la chaîne de traction électrique dans les réseaux ferroviaires à travers le monde souligne l'importance capitale de cette technologie pour l'avenir d'un transport ferroviaire durable. Cependant, la mise en œuvre complète de l'électrification peut être un défi dans certaines circonstances, nécessitant des dépenses considérables dans les infrastructures et des adaptations aux spécificités géographiques et opérationnelles de chaque réseau.

La chaîne de traction électrique représente une étape cruciale vers un avenir ferroviaire plus respectueux de l'environnement, économe en énergie et efficace. Son adoption continue à contribuer à la modernisation du secteur ferroviaire et à l'atteinte des objectifs de durabilité à l'échelle mondiale.

Le progrès de la traction ferroviaire dans ses divers aspects, tels que les performances, La fiabilité et la sécurité, résultent des progrès technologiques dans les divers composants de ce système. Ces évolutions comprennent notamment la transition progressive vers l'électrification des voies, l'intégration de l'électronique embarquée, ainsi que les améliorations considérables apportées aux moteurs de traction et à l'électronique de puissance.

De nombreux ouvrages et articles ont été dédiés à cette évolution [42-52]. Dans les paragraphes suivants, nous aborderons brièvement les progrès réalisés dans ce domaine.

2.2. Description de la Chain de traction ferroviaire

Dans le contexte ferroviaire, la chaîne de traction électrique désigne tous les composants et systèmes employés pour propulser un train en recourant à l'électricité comme moyen d'Energie. Ce mécanisme transforme l'électricité fournie par une source d'alimentation externe, généralement des caténaires ou un troisième rail, en mouvement mécanique qui entraîne les roues du train. Voici un aperçu des principaux éléments composant la chaîne de traction électrique[34] :

- Source d'énergie : Constituant initial de la chaîne de traction électrique, la forme d'énergie est responsable de fournir l'électricité au train, provenant généralement des caténaires ou du troisième rail qui se trouvent à proximité des voies ;
- Section de captage du courant : Cette section assure le contact physique entre la source d'alimentation et le train. Pour les caténaires, des pantographes sont généralement utilisés pour capter le courant électrique. Pour le troisième rail, le train dispose de patins ou de frotteurs qui glissent le long du rail pour capter l'énergie ;
- Transformateurs/redresseurs : L'énergie électrique captée par le train est souvent à une tension ou une fréquence différente de celle requise par les moteurs de traction. Les transformateurs et les redresseurs sont employés pour convertir et ajuster

l'énergie électrique à la tension et à la fréquence appropriées pour les moteurs du train.

- Convertisseurs statiques : Ces dispositifs électroniques de puissance sont chargés de la conversion de l'énergie électrique du courant alternatif (CA) en courant continu (CC) ou vice versa. Les convertisseurs statiques sont essentiels pour contrôler le flux de la gestion de l'énergie entre la source d'alimentation et les moteurs de traction.
- Moteurs de traction : Ce sont les principaux composants de la chaîne de traction. Les moteurs de traction sont des moteurs électriques utilisés pour convertir l'énergie électrique en mouvement mécanique. Ils fournissent le couple nécessaire pour faire avancer le train.
- Systèmes de contrôle : Les systèmes de contrôle électronique permettent de réguler la vitesse, la direction et les performances du train. Ils veillent à ce que la puissance soit fournie de manière optimale aux moteurs de traction, garantissant une utilisation efficace de l'énergie électrique.

2.3. Une approche systémique des réseaux d'alimentation électrique des tramways

Les systèmes de transport en commun électriques intra-urbains ont essentiellement adopté des sources d'alimentation en courant continu, tandis que les réseaux desservant les banlieues fonctionnent avec des systèmes en courant alternatif. Cette préférence historique pour le courant continu est principalement due à la simplicité de la commande de vitesse offerte par les premières machines à courant continu. Malgré les progrès techniques et l'émergence des machines à courant alternatif et des convertisseurs statiques, les réseaux urbains sont restés fidèles à leur alimentation continue [54].

Cette décision est influencée en partie par le rapport entre le nombre de véhicules circulant sur l'itinéraire et la distance parcourue. Les réseaux urbains nécessitent une cadence soutenue, privilégiant donc des systèmes de traction simples et légers, sans transformateur, tandis que les équipements fixes peuvent être plus complexes. En revanche, dans les zones périurbaines où le nombre de véhicules est réduit et les distances plus longues, les investissements se dirigent vers des équipements de traction plus sophistiqués, tandis que les équipements fixes restent simples. La norme EN 50163 établit les niveaux de tension pour les transports électriques ferroviaires.

Dans notre contexte, nous nous concentrons sur les installations de tramways alimentés en courant continu à 750 V, largement utilisées en Europe (à l'exception de l'Allemagne) et aux États-Unis. Quelques rares réseaux dans le monde, tels que ceux à Kyoto, Monterrey et Bursa, fonctionnent en 1500 V CC, tandis que la plupart des autres réseaux utilisent le 600 V CC (notamment en Allemagne, en Suisse, en Russie et dans les pays de l'Est).

Certaines applications de tram-train utilisent des tensions différentes, telles que le 25 kV - 50 Hz / 750 V CC à Sarrebruck ou le 15 kV - 16,66 Hz / 750 V CC à Karlsruhe. Le tram-train offre la possibilité de se déplacer sur un vaste territoire sans interruption, en utilisant une combinaison de captage d'énergie électrique en courant continu utilisés dans les zones urbaines et en courant alternatif en zone périphérique. Des villes telles que Mulhouse, Strasbourg et Paris sont des exemples d'applications de cette technologie [54].



2.1 Illustration d'un réseau de tramway.

2.3.1. Structures des réseaux d'alimentation

2.3.1.1. Alimentations Par le Sol (APS)

Vers la fin du XIXe siècle, les tramways ont commencé à être alimentés électriquement à l'aide d'un système de câbles disposés dans un caniveau, et chaque tramway était équipé d'un capteur pour établir le contact électrique, fut abandonnée en raison de problèmes de sécurité. Cette méthode s'avéra trop dangereuse pour les usagers de la voirie, et les lignes aériennes de contact furent progressivement adoptées. Cependant, grâce aux avancées technologiques actuelles, l'alimentation électrique par le sol connaît un renouveau à travers trois applications différentes.

Deux de ces applications utilisent différentes méthodes l'induction magnétique et le frotteur (similaire au système du troisième rail des métros). Le système STREAM développé par ANSALDO® utilise le principe de l'attraction magnétique pour capter l'énergie électrique, tandis que les systèmes d'INNORAIL® (filiale de SPIE-Enertrans®, rachetée en 2003 par ALSTOM) et d'ALSTOM reposent sur une captation d'énergie par le biais d'un frotteur.

Dans ces cas, les secteurs conducteurs sont alimentés en électricité grâce à des interrupteurs tels que des contacteurs ou des IGBTs. Chaque véhicule est équipé d'un aimant permanent associé au frotteur positif. Lorsque le véhicule se déplace, cet aimant attire le matériau ferromagnétique vers le haut, établissant ainsi le contact entre le frotteur positif et un ou deux secteurs conducteurs voir (Figure 2.2). De cette manière, le frotteur du véhicule atteint un potentiel de 750 V[54].



2.2 Système d'alimentation par le sol APS.

L'alimentation des industries phares est positionnée en dessous du dispositif de contact électrique du véhicule. Les secteurs éloignés de la source d'alimentation sont maintenus à un potentiel de 0 V, car la bande magnétique descend naturellement sous l'effet de la gravité. de chaque côté du frotteur, établissant ainsi le contact entre le feeder négatif et les secteurs. Pour assurer le retour du courant, deux méthodes différentes sont utilisées dans ce système d'alimentation par le sol. Dans le cas d'un véhicule utilisant un roulement fer, le courant peut retourner via les rails.

En revanche, pour les véhicules non guidés, un deuxième frotteur est ajouté sous le véhicule, Le frotteur du véhicule entre en contact avec une bande métallique alignée de manière parallèle le long des secteurs conducteurs. Un exemple de cette technologie est déjà en fonctionnement à Trieste, pour les applications de type bus.

Cependant, la durabilité à long terme du système n'est pas garantie, principalement en raison d'un manque de robustesse mécanique et de la susceptibilité d'attirer la bande d'alimentation avec un aimant de grande taille [54].

Système APS d'INNORAIL

Le système d'APS d'INNORAIL voir (figure 2.3) repose sur un principe fondamental similaire à celui développé par ALSTOM. Dans les deux systèmes, des secteurs conducteurs isolés électriquement sont placés Au milieu des rails de roulement, au cœur de la voie, chez INNORAIL, ces secteurs sont activés de manière successive à mesure que le tramway avance, en utilisant des contacteurs.

La détection de la présence du véhicule est effectuée à l'aide d'une boucle d'induction. Chaque tramway est équipé de deux frotteurs, disposés de chaque côté du véhicule.

Le système d'alimentation par le sol développé par INNORAIL a été intégré dans une partie du centre-ville du tramway de la communauté bordelaise, qui a été opérationnelle à la fin de l'année 2003[54].



2.3 Système APS d'INNORAIL.

Le système ALISS (Alimentation Statique par le Sol)

Présente une approche de localisation différente de celle d'INNORAIL. Dans ce système, les tramways utilisent un signal porteur hautement sécurisé émis et reçu par chaque véhicule.

Le frotteur du véhicule émet ce signal, qui est ensuite analysé par un module de commutation situé sous la zone en contact avec le frotteur.

La mise sous tension est effectuée en utilisant la commutation d'interrupteurs de puissance IGBTs. Contrairement à INNORAIL, le système ALISS adopte une méthode distincte pour la localisation des tramways [54].





2.4 Module ALISSE.

2.3.1.2. Lignes Aériennes de Contact (LAC)

Les Lignes Aériennes de Contact (LAC) constituent la méthode conventionnelle pour transporter les courants continus entre les sous-stations et les rames dans un système de tramway. Ces lignes sont divisées en segments, ce qui rend possible l'isolation une partie du réseau en cas de défaut tout en maintenant des services temporaires en fonctionnement.

Les LAC sont généralement suspendus à des poteaux distants de 30 m ou 60 m (selon la méthode d'installation ou fixées aux façades des bâtiments. Selon la réglementation, elles sont positionnées à une hauteur de 6 m pour permettre le passage de convois routiers exceptionnels.





2.5 Support latéral d'une ligne aérienne de contact.

Les LAC sont fabriqués à partir de cuivre électrolytique tréfilé, avec des sections de conducteurs généralement comprises entre 107 mm² et 150 mm².

La (Figure 2.5) présente un modèle de support utilisé pour la ligne aérienne de contact. La fonction de la suspension caténaire est de maintenir le fil de contact aligné de manière parallèle à la voie., même pendant les mouvements dynamiques.

Il est essentiel d'avoir une pression adéquate et constante entre la caténaire et le pantographe pour prévenir la formation d'arcs électriques entre ces conducteurs. Dans les années à venir, l'adoption de l'électrification aérienne dans les réseaux de transports urbains pourrait diminuer. Comme mentionné précédemment, certains centres-villes envisagent de se débarrasser des lignes aériennes de contact pour des raisons esthétiques, techniques et pratiques. Face à ce défi, les progrès technologiques actuels proposent des approches alternatives, notamment l'intégration d'une approche bimodale en matière d'énergie. Par exemple, La ligne aérienne de contact (LAC) pourrait être combinée avec un système d'Alimentation Par le Sol (APS) ou des dispositifs de stockage d'énergie intégrés. [54].

2.3.2. Norme concernant les tensions d'alimentation des réseaux de traction

Dans le but de garantir l'interopérabilité des véhicules électriques, la norme EN 50163 a été établie pour les applications ferroviaires (Tableau 2.1). Cette norme traite des variations de tension dans les réseaux de traction. Il est crucial de prendre en compte ces fluctuations autour de la tension nominale lors du dimensionnement des systèmes de traction [54].

				-	-
Système	Tension non	Tension non	Tension	Tension non	Tension non
d'électrification	permanente	permanente	nominale	permanente	permanente
	la plus basse	la plus basse	Un (V)	la plus	la plus
	Umin2(V)	Umin1(V)		élevée	élevée
				Umax1(V)	Umax1(V)
Courant continu	400	400	600	720	800
(Valeurs	500	500	750	900	1000
moyennes)	1000	1000	1500	1800	1950
	2000	2000	3000	3600	3900
Courant continu	11000	12000	15000	17250	18000
(Valeurs efficace)	17500	19000	25000	27500	29000

2.1 issu de la Norme EN 50163.

Exigence nationale : Les futurs réseaux de traction pour les tramways et les applications locales doivent respecter les systèmes de tension nominale de 750V, 1500V ou 3000V.

2.3.3. Sous-stations de traction

Les sous-stations de traction jouent un rôle crucial en tant qui assure l'interface entre le réseau local HTA (10 kV à 20 kV) et le réseau continu. qui est généralement à 750 V en courant continu. Le nombre d'arrivées HTA peut varier en fonction des réseaux de tramway, et la connexion à plusieurs réseaux HTA distincts assure un service minimal en cas de défaillance majeure sur l'un des réseaux.

L'emplacement des sous-stations est déterminé par les exigences de l'exploitant en termes de performance opérationnelle (alignement avec les horaires et les puissances requises) et les contraintes d'installation en milieu urbain, car les zones propices à l'installation de sous-stations sont souvent limitées.

Il est crucial d'avoir une distance adéquate entre les sous-stations pour assurer un transport et une distribution efficaces du courant continu, en particulier pour maintenir des tensions minimales acceptables en cas de fonctionnement normal ou dégradé. Les sous-stations de traction sont équipées de redresseurs en groupe d'une puissance typique de 900 kW, débitant 1200 A sous 750 V. Un transformateur Dy 20 kV / 590 V est positionné en aval du groupe redresseur pour fournir une puissance apparente de 1000 kVA. Un disjoncteur DC ultrarapide est installé en aval du groupe redresseur.

Des éléments de comptage peuvent être intégrés à chaque station de manière spécifique si elles servent de points de comptage pour le réseau de tramway. Lors du freinage du tramway, il agit comme un générateur de courant direct, augmentant progressivement la tension du pantographe jusqu'à environ 900 V en courant continu. Si une charge est connectée au réseau continu, tel qu'un tramway en phase de traction ou des équipements fixes.),

L'énergie cinétique du tramway durant la phase de freinage est transformée en énergie électrique, puis réutilisée par le tramway en phase de traction.

En l'absence de charge connectée au réseau lors du freinage, l'excès d'énergie électrique est dissipé dans des résistances de freinage situées sur le toit du tramway. Certains réseaux de tramway, comme ceux de Strasbourg ou de Nantes, sont équipés d'onduleurs de récupération dans les sous-stations, permettant de transférer l'énergie excédentaire du réseau continu vers le réseau alternatif [55].

2.3.3.1. Transformateur de traction

Le rôle essentiel du transformateur de traction réside dans la conversion de la haute tension de 25 kV provenant du réseau de contact en une tension adaptée pour alimenter le moteur de traction et d'autres appareils électriques dans le fonctionnement des locomotives électriques à courant alternatif.

Son fonctionnement est similaire à celui d'un transformateur de puissance classique. Cependant, en raison de l'environnement spécifique des locomotives électriques, certaines caractéristiques propres se manifestent dans le fonctionnement du transformateur de traction. Tout d'abord, le transformateur de traction est soumis à des chocs mécaniques et à des vibrations continues et fortes en raison des conditions de fonctionnement de la locomotive.

De plus, il doit faire face à des fluctuations significatives de température ambiante, avec des contraintes sévères en termes de ventilation et de dissipation thermique, vu que l'environnement pour le placer est limité dans la locomotive.

En outre, le transformateur de traction est confronté à des fluctuations significatives de la tension du réseau de contact (OCS) et des charges de traction changeantes. Cela peut entraîner des problèmes tels que des surtensions atmosphériques et de fonctionnement, augmentant la probabilité de court-circuit du côté basse tension. La taille et le poids du transformateur de traction sont également soumis à des limitations strictes, car il doit être installé dans un espace restreint de la locomotive qui contient déjà des dispositifs de conversion de haute puissance et des moteurs puissants. En conséquence, le transformateur de traction doit fonctionner dans un environnement électromagnétique très contraignant.

La tension du réseau électrique de traction de la locomotive électrique varie considérablement, avec une plage normale de 20 à 29 kV, mais pouvant atteindre 31 kV parfois, voire 32 kV lors du freinage régénératif [56].

Comparativement, les transformateurs de puissance classiques connaissent généralement des variations de tension beaucoup plus faibles, de l'ordre de 5 %. De plus, le transformateur de traction doit être fréquemment déconnecté et reconnecté, notamment lorsqu'il traverse des zones de séparation de phase de l'OCS, Le transformateur de traction des locomotives électriques fonctionne dans des conditions exigeantes, subissant des variations importantes de tension du réseau de contact, ce qui peut se produire toutes les 15 à 30 minutes à une vitesse moyenne de 80 km/h ou toutes les 10 à 20 minutes à une vitesse moyenne de 200 km/h.

En raison de cet environnement d'exploitation spécifique, il présente des caractéristiques différentes de celles des transformateurs de puissance classiques, comme illustré dans la (Figure 2.6).



2.6 Transformateur de Traction.

2.3.3.2. Principaux convertisseurs utilisés dans les systèmes de chaîne de

traction

Les blocs ci-dessous représentent les dispositifs de conversion représentés dans les figures suivantes : (Figure 2.7, Figure 2.8, Figure 2.9, Figure 2.10, Figure 2.11 et Figure 2.12) [54].



2.7 Redresseur de tension monophasé (pont mixte).



2.8 Redresseur de Courant.



2.9 Onduleur de courant triphasé à Thyristors.



2.10 Hacheur.



2.11Onduleur de tension triphasé à GTO.



2.12 Onduleur de tension triphasé à IGBT.

2.3.4. Ligne de transport

2.3.4.1 Captage du courant

Le pantographe joue un rôle essentiel dans le prélèvement de l'énergie de la caténaire pour les AGV (Automotrices à Grande Vitesse), comme illustré dans la (Figure 2.13). Pour assurer un transfert de puissance optimal, le pantographe de l'AGV est équipé d'un système de commande électronique en temps réel qui maintient une pression stable de l'archet sur la caténaire, afin d'éviter toute déconnexion entre les deux éléments (Figure 2.13). Ce dispositif a été utilisé lors de l'établissement du record mondial de vitesse à 574,8 km/h.

Les pantographes disponibles peuvent être dotés d'archets de différentes largeurs, telles que 1450, 1600 ou 1950 mm. Ils peuvent également être fabriqués à partir de divers matériaux, comme le carbone pur ou un alliage de carbone et de cuivre, pour s'adapter aux caractéristiques spécifiques des itinéraires empruntés par l'AGV.

Lorsqu'un AGV fonctionne sous une certaine tension caténaire, il utilise deux pantographes pour répartir le courant total consommé par le système de traction. Le choix du pantographe est effectué en relation avec la largeur de l'archet et la pression de contact nécessaires pour s'adapter à la caténaire utilisée [56].



2.13 Principe de la régulation du pantographe.

2.3.5. Matériel roulant

Le matériel roulant ferroviaire joue un rôle indispensable au sein du système ferroviaire. Dans le langage commun, on utilise généralement le terme "train" pour désigner le matériel roulant ferroviaire, qui regroupe des engins moteurs pouvant remorquer des véhicules.

Ces "trains" sont des ensembles de véhicules conçus spécifiquement pour circuler le long des voies ferrées, qu'il s'agisse d'un monorail ou de deux rails ou plus assurant le guidage sur tout le parcours.

Le matériel roulant représente une composante cruciale du système de transport ferroviaire, qu'il soit dédié aux trains urbains tels que les tramways ou les métros, ou aux trains interurbains.

Le matériel roulant ferroviaire se constitue l'ensemble des véhicules, qu'ils soient moteurs ou remorqués, spécialement conçus pour circuler sur les voies ferrées.

Les locomotives électriques, en tant que matériel moteur, sont équipées de moteurs de traction et de convertisseurs statiques adaptés selon le type de moteur utilisé [56].

2.3.5.1. Etage d'entrée

Pour alimenter l'onduleur de tension et supprimer les harmoniques des courants renvoyés vers le réseau électrique, il est nécessaire que l'étage d'entrée génère une tension continue. Ce processus est réalisé au moyen de contacts électriques glissants de petite taille, couramment désignés sous le nom de pantographes dans les systèmes d'alimentation électrique à forte puissance.

Les convertisseurs statiques utilisés dans cette étape d'entrée varient en fonction du type d'alimentation. Dans le cas d'une caténaire à tension alternative, on emploie un transformateur abaisseur couplé à un redresseur ou à un filtre. En revanche, pour une caténaire à tension continue, on choisit un hacheur associé à un filtre, ou simplement un filtre pour les tensions moins élevées.

Dans tous les cas, le filtrage d'entrée remplit deux fonctions essentielles : premièrement, il achemine l'énergie provenant de la caténaire vers la chaîne de traction tout en améliorant la qualité de cette énergie. Deuxièmement, il permet d'ajuster la chaîne de traction aux spécifications des réseaux en respectant certaines contraintes d'impédance du train, tout en filtrant les perturbations engendrées par la chaîne de traction avant qu'elles ne se propagent vers le réseau d'alimentation. Cela assure un fonctionnement optimal du système sans introduire de perturbations indésirables dans le réseau électrique [56].

2.3.5.2. Onduleurs et commande rapprochée

Les onduleurs de tension jouent un rôle essentiel en fournissant une alimentation en courant alternatif aux machines, en utilisant une source de tension continue.

Grâce à ces dispositifs, il est envisageable de réguler avec précision les tensions aux extrémités des machines en ajustant à la fois leur amplitude et leur fréquence par le biais de la commande.

Pour alimenter une machine triphasée qui ne dispose pas de liaison de neutre, un onduleur de tension à trois bras est utilisé.

Chaque bras est équipé de deux cellules de commutation, comprenant chacune un interrupteur contrôlé pour l'amorçage et le blocage, ainsi qu'une diode antiparallèle [58].

Dans le domaine ferroviaire, les onduleurs peuvent être de deux types : de courant ou de tension, en fonction du type de traction et du moteur utilisé. Les moteurs triphasés sont contrôlés au moyen d'onduleurs, qui sont alimentés soit par une source de courant continu pour les moteurs synchrones et asynchrones, soit par une source de tension continue spécifiquement pour les moteurs asynchrones [59].



2.14 Structure d'un onduleur de tension.

Les onduleurs de haute puissance utilisent des thyristors GTO (pour les applications tramway et métro) avec une fréquence de commutation maximale de 600 Hz ou des IGBT, pouvant atteindre des fréquences de travail d'environ 2,5 kHz.

Généralement, les IGBT sont préférés en raison de la faible fréquence de commutation des GTO, qui peut affecter l'ensemble des signaux de la chaîne de puissance, tels que les courants et les couples électromagnétiques. Ces fluctuations entraînent des oscillations significatives et un contenu harmonique élevé [57].

En règle générale, les onduleurs sont commandés à l'aide de la technique de Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI). Cette méthode consiste à appliquer des tensions pulsées, à fréquence fixe ou variable, aux bornes de la machine.

Ces tensions varient en fonction des références de tension obtenues à partir des régulateurs de courant. La MLI utilise un signal triangulaire appelé "porteuse" pour moduler ces tensions en largeur d'impulsions, déterminant ainsi les moments de commutation et la durée pendant laquelle chaque interrupteur de l'onduleur est activé. À tout moment, l'un des deux interrupteurs de chaque branche conduit le courant tandis que l'autre est en état bloqué [58].

Généralement, il existe quatre types de commande :

Commande à MLI sinus-triangulaire ;

Commande à MLI symétrique ;

Commande à MLI vectorielle ;

Commande par hystérésis.

2.3.5.2.1. MLI sinus-triangulaire

La méthode la plus fréquemment utilisée est la modulation de largeur d'impulsions (MLI) analogique. Cette méthode implique la comparaison entre une tension de référence, appelée modulante basse fréquence, et une porteuse généralement triangulaire à haute fréquence. Quand la modulation est plus élevée que le signal porteur, le signal de sortie est fixé à 1, sinon il est fixé à 0. Ainsi, le signal de sortie bascule à chaque croisement entre le signal de modulation et la porteuse, tel qu'illustré sur la (Figure 2.15).

Si le signal de référence est sinusoïdal, la modulation est définie par :

L'indice de modulation :
$$m = \frac{f_p}{f}$$

Le coefficient de réglage en tension : $r = \frac{u_r}{u_n}$

Avec

f: Fréquence de référence ;

 f_p : Fréquence de la porteuse ;

 u_r : L'amplitude de référence ;

 u_p : La valeur crête de la porteuse.

En modifiant ces paramètres, on peut augmenter l'indice de modulation, ce qui décale les harmoniques d'ordre bas vers des fréquences plus élevées. Cette adaptation permet de réduire les pertes dans la machine, mais en contrepartie, les pertes de commutation dans l'onduleur augmentent [57].



2.15 Commande (MLI) sinus-triangulaire.

2.3.5.2.2. MLI régulière symétrique

Les interrupteurs du convertisseur sont commandés à l'aide d'un algorithme spécialement conçu pour un système de contrôle numérique. Cet algorithme se base sur des expressions algébriques adaptées au fonctionnement numérique.

Le principe de fonctionnement est illustré dans la (Figure 2.16) et consiste à diviser chacune des trois tensions de référence sinusoïdales (appelée onde modulante) à l'aide d'un signal triangulaire à haute fréquence (appelé porteuse). L'onde modulante est échantillonnée à chaque pic positif de l'onde triangulaire, ce qui détermine les impulsions de commande pour l'onduleur [57].

En pratique, la valeur moyenne de la tension de sortie est contrôlée à chaque période de commutation en utilisant la référence obtenue par la discrétisation de l'onde de modulation. Comme le montre la figure, les impulsions générées se situent au centre de tous les sommets de la porteuse [57].



2.16 régulière symétrique.

2.3.5.2.3. Commande MLI Vectorielle

La MLI vectorielle est une approche de commande qui se base sur le suivi du vecteur tension. À chaque cycle de modulation, l'algorithme de commande calcule les tensions triphasées nécessaires pour alimenter un moteur ou toute autre charge triphasée.

Ces tensions peuvent être exprimées dans un cadre diphasé orthogonal fixe par rapport au stator de la machine, comme illustré dans la (Figure 2.17).

En combinant deux vecteurs voisins, représentant deux états de commutation de l'onduleur, on parvient à calculer le vecteur de tension de commande [60].

Cette approche permet d'assurer un contrôle précis du vecteur tension et contribue à la réduction des harmoniques.



2.17 Commande MLI Vectorielle.

2.3.5.2.4. Commande par hystérésis

La commande par hystérésis, aussi connue sous le nom de commande tout ou rien, est une approche non linéaire qui se base sur l'erreur entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur.

Cette erreur est comparée à un seuil appelé bande d'hystérésis. Quand l'erreur atteint les limites inférieure ou supérieure de la bande, un ordre de commande est émis pour maintenir le courant à l'intérieur de cette plage.

La principale caractéristique de cette technique est sa simplicité de mise en œuvre. Cependant, les commutations se produisant librement à l'intérieur de la bande d'hystérésis rendent difficile le contrôle des fréquences situées dans la partie supérieure de cette plage en raison des fréquences de commutation élevées [61].



2.18 Commande par hystérésis.

2.3.5.3. Moteurs de traction

2.3.5.3.1. Moteurs à courant continue

Les premiers essais de traction électrique en 1879, réalisés avec Siemens, ont utilisé des moteurs à courant continu à collecteur à excitation série.

Ces moteurs étaient parfaitement adaptés aux besoins du secteur ferroviaire, car ils offraient un couple élevé au démarrage et une grande plage de variation de ce couple en relation avec la vitesse. Cependant, ils présentaient des inconvénients en termes de rapport poids/puissance et poids/volume, qui n'étaient pas particulièrement avantageux.

De plus, leur plage de vitesse était limitée, et l'usure causée par les balais a incité les fabricants automobiles à se tourner vers des motorisations basées sur des machines alternatives [62].

2.3.5.3.2. Machines asynchrones

La locomotive BB36000 utilise un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil pour propulser ses bogies de traction.

Ce moteur présente une puissance de 1,5 MW et une vitesse maximale de 4160 tr/min. Dans la (Figure 2.19) [63], on peut observer ce moteur une fois démonté. Chaque bogie est entraîné par deux essieux de traction, et chaque essieu est relié à un moteur via une transmission mécanique.

Ce type de moteur présente l'avantage d'un coût de fabrication et d'entretien réduit, ainsi qu'une puissance massique relativement élevée, ce qui est crucial pour les équipements embarqués.

Cependant, la partie contrôle de ce moteur est plus complexe, car les principales grandeurs, telles que le flux rotorique et le couple électromagnétique, sont naturellement liées. Étant donné que ces grandeurs ne sont pas directement mesurables, il est nécessaire d'estimer L'état électromagnétique de la machine est crucial. Les grandeurs mesurables et essentielles dans le système comprennent les tensions et les courants de ligne, ainsi que, initialement, la vitesse de la machine [64].



2.19 Moteur Asynchrone.

La demande d'élimination du capteur de vitesse dans les systèmes d'entraînement industriels est en augmentation constante.

Cette tendance vise principalement à réduire les coûts de maintenance des équipements [65] et à résoudre les problèmes associés aux inconvénients des accouplements mécaniques et à l'espace occupé par les capteurs dans les applications à forte puissance [66].

2.3.5.3.3. Moteur synchrone

Dans le passé, les moteurs synchrones à rotor bobiné étaient couramment utilisés et nécessitaient des bagues collectrices pour leur alimentation via un hacheur ou un redresseur. Ces premiers modèles étaient des convertisseurs triphasés à commutation spontanée, contrôlés par la position du rotor, ce qui leur a valu le nom de moteurs synchrones autopilotés [67].

Au début du 21e siècle, le moteur synchrone à aimant permanent est apparu comme une option prometteuse. En utilisant des aimants permanents produisant une densité magnétique élevée, ces moteurs synchrones peuvent être construits de manière plus compacte et légère par rapport aux moteurs asynchrones de même puissance. Ils se caractérisent par une grande robustesse et un faible moment d'inertie, ce qui leur confère une dynamique avec des constantes de temps très courtes. Cela permet de développer des régulations de vitesse, de couple ou de position offrant une précision et des performances dynamiques très attrayantes.

Ces moteurs ont connu une croissance significative dans le domaine de la traction électrique grâce au l'avancement des aimants en terres rares. Cependant, leur coût de production est supérieur à celui des moteurs asynchrones [68].

2.4. Conclusion

En conclusion de ce chapitre, nous avons étudié en profondeur l'architecture de la chaîne de traction ferroviaire électrifiée et les considérations de conception essentielles pour assurer son efficacité et sa fiabilité. L'établissement d'un système de traction électrifié dans les chemins de fer modernes présente des avantages considérables en ce qui concerne l'efficacité énergétique et la réduction des émissions et de performances améliorées.

Nous avons souligné l'importance d'une conception bien pensée, tenant compte de facteurs tels que les différents types de traction électrique, les systèmes de contrôle, et les interfaces avec les autres composants du réseau ferroviaire. La nécessité de s'adapter aux contraintes spécifiques de chaque projet a été mise en évidence, car cela peut varier en fonction des caractéristiques géographiques, des lignes existantes, des exigences opérationnelles et de l'évolution technologique. De plus, nous avons abordé les problèmes potentiels liés à l'énergie de traction, tels que les distorsions harmoniques et les problèmes de qualité d'énergie.

Ces défis nécessitent une attention particulière pour garantir une exploitation sans problème du système électrifié, minimiser les perturbations et assurer une distribution d'énergie stable. Dans le chapitre suivant, nous examinerons de manière plus approfondie les problèmes d'énergie liés à la traction ferroviaire électrifiée, en nous concentrant sur les distorsions causées par les harmoniques et les solutions pour les atténuer. Nous examinerons également les aspects de qualité de l'énergie de traction, en mettant l'accent sur l'importance de maintenir des niveaux de tension et de courant appropriés pour un fonctionnement sûr et optimal du système. Chapitre 3

Généralité sur la qualité de l'Energie électrique, les Harmoniques, les filtres.

Chapitre 3 : Généralité sur la qualité de l'Energie électrique, les Harmoniques, les filtres.

3.1. Introduction

L'énergie électrique constitue l'un des piliers essentiels et omniprésents de notre société contemporaine. Elle nourrit nos domiciles, nos entreprises, nos infrastructures, et tient un rôle fondamental dans le bon fonctionnement d'une multitude d'appareils et de systèmes cruciaux. Il est primordial toutefois de saisir que la qualité de cette énergie revêt une importance équivalente à sa disponibilité. En effet, la qualité de l'énergie électrique se réfère à la conformité des caractéristiques de cette énergie avec les normes et spécifications prédéfinies. Une médiocre qualité de l'énergie électrique peut donner lieu à de multiples effets néfastes. Les raisons qui mettent en exergue l'importance de cette qualité de l'énergie électrique sont les suivantes :

Fiabilité des dispositifs : Les appareils électroniques et électriques contemporains se montrent de plus en plus réceptifs aux variations de tension, aux interruptions électriques et aux perturbations électromagnétiques. Une qualité insatisfaisante de l'énergie électrique peut endommager ou amoindrir la longévité de ces dispositifs, ce qui entraîne des coûts élevés de réparation ou de remplacement.

Efficacité et productivité : Diverses industries dépendent d'une alimentation électrique stable et de haute qualité afin de maintenir leurs opérations. Les interruptions de courant ou les variations de tension ont le potentiel de causer des arrêts de production onéreux et de perturber les processus industriels. Une alimentation électrique de qualité assure une productivité accrue, une efficacité opérationnelle, et une continuité des activités.

Sécurité : Une qualité médiocre de l'énergie électrique peut donner lieu à des situations dangereuses. Les variations de tension peuvent provoquer des défaillances au niveau des équipements de sécurité tels que les systèmes d'alerte incendie ou les dispositifs de contrôle d'accès. En sus, des problèmes d'isolement ou des surtensions peuvent augmenter le risque d'électrocution pour les utilisateurs finaux.

Économies énergétiques : Une qualité optimale de l'énergie électrique permet une utilisation plus efficiente de cette dernière. Des problèmes comme les harmoniques électriques ou les déséquilibres de phase peuvent engendrer une surconsommation énergétique, et par conséquent, accroître les frais de fonctionnement. Une alimentation électrique de qualité aide à minimiser les pertes d'énergie et à optimiser l'efficacité énergétique globale. Chapitre 3 : Généralité sur la qualité de l'Energie électrique, les Harmoniques, les filtres.

Intégration des énergies renouvelables : À l'heure de la transition vers des sources d'énergie renouvelable comme le solaire et l'éolien, la qualité de l'énergie électrique revêt une importance accrue. Les fluctuations de tension et les variations de fréquence peuvent avoir un impact significatif sur la stabilité du réseau lors de l'intégration de ces sources intermittentes. La gestion adéquate de la qualité de l'énergie électrique facilite l'intégration fluide de ces alternatives énergétiques.

Ce chapitre se penche spécifiquement sur l'étude de la qualité de l'énergie électrique, en mettant l'accent sur les perturbations et les harmoniques. Les problèmes couramment liés à la qualité de l'énergie électrique sont abordés, et des solutions sont proposées pour les contrecarrer. Une appréhension de ces perturbations et de leurs impacts s'avère essentielle pour garantir une alimentation électrique fiable et de premier ordre.

Des mesures préventives et des techniques correctrices sont également examinées, pouvant être implémentées pour minimiser les problèmes de qualité de l'énergie électrique.

En adoptant ces solutions, il devient envisageable d'améliorer considérablement la stabilité du réseau électrique et d'optimiser les performances globales du système électrique.

3.2. Perturbation électrique

L'énergie électrique est distribuée sous forme d'un système triphasé. Caractérisé par des tensions sinusoïdales. Ce système présente des paramètres essentiels, notamment la fréquence, l'amplitude et la forme de l'onde, qui doit conserver une sinusoïdalité. De plus, la symétrie du système triphasé, où les tensions ont des amplitudes égales et des déphasages cohérents, est tout aussi primordiale.

Toute altération physique influençant une ou plusieurs de ces propriétés est considérée comme une perturbation. Dans la réalité, ces perturbations sont catégorisées en fonction de leur durée. Ainsi, plusieurs types se

Démarquent :

- Les variations de l'onde de tension, comme les harmoniques, le déséquilibre et le scintillement (flicker). Ces occurrences peuvent être permanentes ou s'étirer sur plusieurs minutes.
- Les baisses de tension, les surtensions et les interruptions courtes qui s'étendent sur quelques secondes.
- Les surtensions transitoires de courte durée, inférieure à une période.

En somme, ces perturbations ont le potentiel de dénaturer la qualité de l'énergie électrique en altérant ses fondements caractéristiques. Il est essentiel de les reconnaître et de les gérer de manière efficace pour assurer un approvisionnement électrique fiable et de qualité supérieure [68].

3.2.1. Classification des perturbations électriques

Les perturbations électriques peuvent être catégorisées en fonction des caractéristiques de tension mentionnées précédemment. Il existe quatre groupes principaux de perturbations électriques :

- Variations d'amplitude, incluant les baisses de tension, les interruptions brèves, les surtensions et le scintillement.
- > Fluctuations de fréquence autour de la fréquence nominale.
- Altérations de la forme d'onde, telles que les harmoniques, les inters harmoniques et les bruits.
- > Asymétrie dans le système triphasé, connue sous le nom de déséquilibre.
- Une autre méthode de catégorisation des perturbations électriques repose sur leur durée:
 - Perturbations transitoires : durent moins d'une demi-période fondamentale. Souvent engendrées par des manœuvres d'ouverture/fermeture sur les réseaux et des phénomènes naturels comme la foudre.
 - Perturbations de courte durée : englobent les baisses de tension, les interruptions brèves et les surtensions, généralement provoquées par des courts-circuits, se caractérisent par des variations significatives de tension, ayant des conséquences dommageables pour les équipements.
 - Perturbations permanentes : regroupent les harmoniques, le bruit, le déséquilibre, ainsi que les fluctuations de tension et de fréquence. Souvent causées par des charges non linéaires fluctuantes, elles se traduisent par de légères variations d'amplitude, entraînant surchauffe, pertes, vieillissement prématuré des équipements et dysfonctionnements des contrôles.
 - Les origines des perturbations électriques peuvent être divisées en deux catégories : les défauts dans les réseaux électriques et la présence de charges non linéaires ou fluctuantes.

Chapitre 3 : Généralité sur la qualité de l'Energie électrique, les Harmoniques, les filtres.

Enfin, les effets des perturbations électriques peuvent être classés en deux grandes catégories : les effets à court terme tels que les déclenchements d'appareils et les dommages matériels, et les effets à long terme tels que les pertes, la surchauffe et le vieillissement des équipements [68].

3.3. Pollution harmonique

Les perturbations harmoniques, qu'elles soient internes ou externes, affectent les grandeurs électriques (comme le courant, la tension et la fréquence) de façon temporaire ou durable, engendrant des conséquences nuisibles sur l'ensemble du réseau. Ces perturbations peuvent être classées en fonction de deux critères :

- La durée de persistance ;
- Le mode d'affectation (leurs effets sur les grandeurs électriques).

Selon le premier critère, il existe deux formes primaires de perturbations :

 a) Perturbations périodiques, persistantes au fil du temps, tels que la chute de tension attribuable à la puissance réactive dans le réseau, les distorsions harmoniques et les déséquilibres.

b) Perturbations apériodiques, imprévisibles et instables, telles que les baisses de tension ou les surtensions transitoires.

Concernant le deuxième critère, les perturbations peuvent être regroupées selon trois modes fondamentaux d'affectation des paramètres électriques :

- Perturbations d'amplitude ;
- Déséquilibre des systèmes triphasés ;
- Distorsions harmoniques [69,70].

3.3.1. Type de pollution harmonique

On peut identifier cinq catégories de perturbations électriques : les baisses de tension, les variations de l'amplitude, les oscillations de fréquence, l'asymétrie dans les systèmes triphasés, ainsi que les harmoniques et les inter-harmoniques [71].
3.3.1.1. Creux de tension

L'affaissement de tension, comme illustré dans la (Figure 3.1), survient lorsqu'il y a une réduction de la tension pendant une période allant de 10 ms à 1 minute. Il se caractérise par une diminution de tension comprise entre 1 % et 90 % de la tension nominale. Il est défini en fonction de deux paramètres : son ampleur, notée AV, qui représente l'intensité de la baisse de tension, et sa durée, notée AT, qui indique la période pendant laquelle cette diminution de tension est maintenue [72,73].

Les principales causes des perturbations par affaissement de tension sont liées à divers facteurs, tels que la mise en service de transformateurs de grande taille, les courtscircuits, la connexion de condensateurs, le démarrage de moteurs volumineux, et autres. Ces situations peuvent entraîner des dommages aux couples des machines tournantes, étant donné que ceux-ci dépendent du carré de la tension. De plus, ces perturbations peuvent causer des dysfonctionnements dans les appareils électroniques et provoquer des pannes inopinées.



3.1 Creux de Tension.

3.3.1.2. Fluctuations de la valeur efficace

Les fluctuations de tension des basses fréquences, également illustrées dans la (Figure 3.2), sont communément désignées sous le nom de fluctuations de la tension efficace. Elles se caractérisent par des amplitudes relativement modestes, généralement autour de 10%, et peuvent se manifester de manière aléatoire ou périodique plusieurs fois par seconde.

Ce type de perturbation découle de charges importantes, telles que celles engendrées par les machines de soudage ou les fours à arc, où la consommation électrique peut fluctuer de manière aléatoire.

Ces variations se traduisent fréquemment par des perturbations au niveau du couple et de la vitesse des machines rotatives, et plus spécifiquement par des conséquences gênantes

sur le plan physiologique, notamment des altérations de l'éclairage qui peuvent engendrer un inconfort visuel [73].



3.2 Fluctuations de Tension.

3.3.1.3. Fluctuations de la fréquence

Les écarts par rapport à la fréquence nominale de 50 Hz sont désignés sous le nom de variations de fréquence, comme illustré dans la (Figure 3.3). Elles trouvent leur origine dans des variations brusques de la vitesse des alternateurs, résultant d'un déséquilibre entre les charges électriques et les puissances générées par les centrales électriques.

Ces variations découlent de perturbations au niveau des vitesses et des couples des machines synchrones et asynchrones, et peuvent même être déclenchées par l'arrêt complet des systèmes.

Ce type de perturbation impacte principalement les réseaux de transport et de distribution d'énergie [73].



3.3 Fluctuation de la fréquence.

3.3.1.4. Déséquilibre des systèmes triphasés

L'asymétrie des amplitudes et des déphasages des tensions en régime permanent, telle qu'illustrée dans la (Figure 3.4), est ce que l'on entend par déséquilibre dans un réseau triphasé.

Ce déséquilibre trouve généralement son origine dans des disparités d'impédances le long des lignes du réseau ou au sein des équipements connectés, en plus des courts-circuits électriques.



3.4 Déséquilibre des Tensions.

La fréquence de 50 Hz, qui constitue l'onde fondamentale, est accompagnée d'ondes sinusoïdales supplémentaires appelées harmoniques, qui sont des multiples entiers de cette fréquence de base, comme mentionné dans la référence [74].

La prolifération croissante des équipements électroniques de puissance basés sur des transistors, tels que les convertisseurs statiques, est la principale raison de la présence d'harmoniques dans les réseaux électriques.

En plus des harmoniques, il est possible d'observer dans les réseaux électriques la présence d'inter-harmoniques, lesquelles s'ajoutent également à l'onde fondamentale, bien qu'elles ne correspondent pas à des multiples entiers de la fréquence de 50 Hz.

Les principales sources d'inter-harmoniques incluent les cyclo-convertisseurs, les variateurs de vitesse et divers autres équipements de contrôle-commande [74].

3.3.2. Les sources d'harmoniques

La présence de charges électriques non linéaires chez le consommateur entraîne la production de courants harmoniques, lesquels se propagent tant dans son réseau interne que dans le réseau public.

Cette pollution harmonique a des conséquences néfastes sur la qualité de l'électricité fournie. Ces charges électriques non linéaires sont à l'origine de courants harmoniques pouvant être regroupés en deux catégories distinctes :

• Les sources harmoniques identifiables ;

• Les sources harmoniques non identifiables.

3.3.2.1. Source harmonique identifiable

Les dispositifs électroniques de puissance, tels que les redresseurs et les cycloconvertisseurs, qui opèrent à des niveaux de puissance élevés et sont présents dans les réseaux haute et moyenne tension, sont habituellement reconnus comme des origines potentielles d'harmoniques.

Ces charges non linéaires permettent au fournisseur d'énergie d'identifier le point d'introduction des harmoniques et d'apprécier l'étendue des perturbations qu'elles induisent [75].

3.3.2.2. Source harmonique non identifiable

Les dispositifs couramment employés dans le secteur résidentiel et tertiaire, tels que les téléviseurs et les ordinateurs personnels, sont largement responsables de la production de courants harmoniques.

En raison de leur large adoption, ces équipements sont souvent dotés d'un redresseur monophasé à diodes associé à un condensateur de filtrage, ce qui entraîne une injection significative de courants harmoniques dans le réseau électrique.

Dans une telle situation, la responsabilité de contenir la propagation de ces perturbations harmoniques dans le réseau incombe au fournisseur d'électricité, car bien que chaque utilisateur individuel génère une quantité d'harmoniques relativement faible, leur effet cumulatif demeure notable [75].

3.3.3. Notions de tensions et courants harmoniques

3.3.3.1. Valeur efficace

La valeur efficace d'un courant périodique i(t) est définie comme :

$$I = \sqrt{\frac{1}{T}} \int i^2(t) \, dt = \sqrt{\langle i^2(t) \rangle}$$

On montre que

$$I = \sqrt{\langle i \rangle^2 + I_1^2 + \sum_{n \ge 2} I_n^2}$$
(3.1)

De même

$$V = \sqrt{\langle v \rangle^2 + V_1^2 + \sum_{n \ge 2} V_n^2}$$
(3.2)

Valeur efficace des harmoniques

Il s'agit de la valeur efficace de la somme de toutes les harmoniques

On montre que
$$I_H = \sqrt{\sum_{n \ge 2} I_n^2}$$

et $V_H = \sqrt{\sum_{n \ge 2} V_n^2}$ (3.3)

Taux de distorsion harmonique (THD) (Total Harmonic Distorsion) : Les impédances présentes dans le système électrique sont traversées par des courants harmoniques, ce qui entraîne une réduction de la tension, se traduisant par une distorsion harmonique de la tension. Pour repérer la présence d'harmoniques, une approche courante consiste à évaluer le taux de distorsion harmonique (THD).

THD=<u>valeur efficace des harmoniques</u> valeur efficace du fondamental

Ce qui nous donne
$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n \ge 2} V_n^2}}{V_1}$$
 et $THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n \ge 2} I_n^2}}{I_1}$ (3.4)

• Observation 1 : Un THD nul signifie qu'il n'y a pas de présence d'harmoniques dans le réseau électrique.

• Observation 2 : Une alternative pour définir le taux de distorsion concerne la valeur efficace totale du signal électrique.

THD= valeur efficace des harmoniques valeur efficace du signal

Soit pour la tension et le courant :

$$THD_{V} = \frac{\sqrt{\sum_{n \ge 2} V_{n}^{2}}}{\sqrt{\sum_{n \ge 1} V_{n}^{2}}} THD_{I} = \frac{\sqrt{\sum_{n \ge 2} I_{n}^{2}}}{\sqrt{\sum_{n \ge 1} I_{n}^{2}}}$$
(2.5)

Harmonique impairs non multiples de 3	Taux	Taux admissible**			
	admissible*				
5	2%	6%			
7	2%	5%			
11	1.5%	3.5%			
13	1.5%	3%			
17	1.0%	2%			
19	1.0%	1.5%			
23	0.7%	1.5%			
25	0.7%	1.5%			
>25	0.2+(12.5/h) %	0.2+(1.3×25/h) %			
Harmoniques impaire multiple de 3	Taux	Taux admissible**			
	admissible*				
3	2%	5%			
9	1%	1.5%			
15	0.3%	0.3%			
21	0.2%	0.2%			
>21	0.2%	0.2%			
Harmonique pairs	Taux	Taux admissible**			
	admissible*				
2	1.5%	2%			
4	1%	1%			
6	0.5%	0.5%			
8	0.2%	0.5%			
10	0.2%	0.5%			
12	0.2%	0.2%			
>12	0.2%	0.2%			

3.1 Limite des distorsions harmonique de tension (Norme IEC61000-2-2).

3.3.3.2. Puissances en présence d'harmoniques

3.3.3.2.1. Puissances actives, réactives et apparentes.

La puissance active P consommée par la charge correspond à la moyenne de la puissance instantanée sur une période.

$$\boldsymbol{P} = \frac{1}{T} \int V(t)i(t)dt \tag{3.6}$$

• La puissance réactive Q consommée par la charge vaut :

$$\boldsymbol{Q} = V_1 I_1 \sin(\varphi_1) + \sum_{n \ge 2} \frac{V_n I_n}{n} \sin(\varphi_n)$$
(3.7)

- La puissance apparente de la charge est par définition : S = V I
- La puissance apparente de la charge est par définition : $S \neq P^2 + Q^2$
- On introduit la notion de puissance déformante D telle que $S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$

3.3.3.2.2. Facteur de puissance

Par définition, le facteur de puissance vaut :PF = $\frac{P}{S} = \frac{1}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}}$ (3.8)

3.3.3.2.3. Cas d'un dipôle non linéaire alimenté par une tension alternative sinusoïdale

• Expression de la tension et du courant

•

On suppose le courant alternatif : $\langle i \rangle = 0$

On a donc
$$I = \sqrt{I_1^2 + \sum_{n \ge 2} I_n^2} = I_1 \sqrt{1 + \sum_{n \ge 2} \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2} = 1 \sqrt{1 + \frac{I_n}{I_1} T H D_1^2}$$
 (3.9)

Une tension alternative purement sinusoïdale se compose uniquement de son harmonique fondamental (de rang 1).

Donc $V = V_1$ $(V_n = 0 \text{ pour } n \ge 2)$ (3.10)

• Expression des puissances

Les représentations de la tension et du courant électrique offrent une manière simplifiée d'aborder les concepts liés à la puissance électrique.

• Puissance active
$$P = VI_1 \cos(\varphi_1)$$

•	Puissance réactive	$Q = VI_1 \sin(\varphi_1)$			
•	Puissance apparente	$S = VI = VI_1\sqrt{1 + THD_1}$			
•	Puissance déformante	$D^2 = S^2 - (P^2 + Q^2) = V^2 I_1^2 T H D_1^2$			
		$D = VI_1THD_1 = VI_H$			

• Expression du facteur de puissance

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{VI_1 \cos(\varphi_1)}{\sqrt{V^2 I_1^2 \cos^2(\varphi_1) + V^2 I_1^2 \sin^2(\varphi_1) + V^2 I_1^2 TDH_1^2}}$$
(3.11)

Observation 1 : À mesure que le taux de distorsion harmonique du courant (THDi) augmente, il est observé une diminution du facteur de puissance.

Observation 2 : Le terme $\cos(\varphi_1)$, parfois désigné sous le nom de Le facteur de déplacement, également connu sous l'acronyme DPF (Displacement Power Factor), a une signification particulière.

On a : PF < DPF

3.2 Facteur de puissance

THDi	Facteur de puissance PF (pour DPF = 1)
0 % (charge linéaire)	1
10 %	0,995
20 %	0,981
50 %	0,894
100 %	0,707
150 %	0,555
200 %	0,447

3.3.4. Problèmes crées par les harmoniques

3.3.4.1. Les effets

Effets immédiats

- Les pertes par effet Joule entraînent des pertes d'énergie sous forme de chaleur ;
- Le facteur de puissance se dégrade, ce qui peut entraîner une inefficacité énergétique ;
- Les moteurs subissent une réduction de puissance et peuvent même présenter un couple négatif ;
- Les câbles, transformateurs et moteurs sont soumis à des surcharges ;
- Le bruit dans les moteurs augmente ;
- Des erreurs d'enregistrement peuvent se produire dans les compteurs d'énergie ;
- Les câbles peuvent être surdimensionnés pour compenser les pertes d'énergie ;
- La capacité du réseau électrique est réduite en raison des pertes énergétiques ;
- Les contacteurs peuvent ne pas fonctionner correctement en raison des fluctuations de puissance ;
- Les systèmes électroniques peuvent être perturbés par les variations de courant.

Effets à moyen et long terme

- La durée de vie des moteurs est réduite en raison des contraintes causées par les pertes d'énergie ;
- Les batteries de condensateurs se détériorent prématurément ;
- Les transformateurs subissent une réduction de leur durée de vie ;
- Les isolants et diélectriques vieillissent de manière accélérée, ce qui peut entraîner des défaillances ;
- Les pertes fer (Iron losses) et les pertes dues aux courants de Foucault affectent les transformateurs et les moteurs, les déclassant progressivement[75].

3.3.5. Les Normes

Les émissions harmoniques sont sujettes à diverses réglementations, comprenant :

- Normes de compatibilité conçues pour s'adapter aux réseaux électriques ;
- Les normes concernant les émissions auxquelles les produits doivent se conformer qui génèrent des harmoniques ;
- Recommandations formulées par les fournisseurs d'énergie pour les installations électriques.

Pour atténuer rapidement les impacts de la pollution harmonique, un ensemble de trois dispositifs normatifs et réglementaires est actuellement en vigueur, et ceux-ci sont intégrés dans les éléments suivants [75] :

3.3.5.1. Normes de conformité entre les réseaux électriques et les produits

Ces directives établissent des lignes directrices visant à assurer une cohésion entre les systèmes électriques et les dispositifs électriques :

Les directives précisent que les harmoniques générées par un appareil ne doivent pas causer de perturbations dépassant des seuils spécifiquement définis dans le réseau.

Chaque dispositif devrait pouvoir opérer de manière stable même en présence de perturbations correspondant aux seuils spécifiés par les normes, tels que définis dans les normes CEI 61000-2-2 pour les réseaux publics à basse tension et CEI 61000-2-4 pour les installations industrielles à basse et moyenne tension [76].

3.3.5.2. Normes de qualité des réseaux

La norme EN 50160 définit les caractéristiques requises pour la tension délivrée par les réseaux électriques à basse et moyenne tension.

L'approche de l'IEEE 519 est une collaboration entre les fournisseurs d'énergie et les clients pour minimiser l'impact des charges non linéaires. De plus, les fournisseurs d'énergie encouragent des mesures préventives pour réduire les altérations de la qualité de l'électricité, les surchauffes, et les modifications du facteur de puissance. Ils examinent également la possibilité de mettre en place des tarifs pour les clients qui génèrent de la pollution électrique [76].

3.3.5.3. Norme d'installation

• La norme NF C 15-100 prend en compte les courants harmoniques, notamment lorsqu'il s'agit de déterminer la taille des conducteurs, en particulier le conducteur de neutre [76].

3.3.5.4. Normes d'appareillage

• La norme CEI 61000-3-2, également connue sous le nom de EN 61000-3-2, s'applique aux dispositifs à basse tension connectés au réseau public, dont la consommation de courant est inférieure ou égale à 16 A.

• Pour les dispositifs qui absorbent un courant supérieur à 16 A mais inférieur ou égal à 75 A, la norme CEI 61000-3-12, ou EN 61000-3-12 selon la référence [77], est en vigueur.

• Les dispositifs consommant un courant compris entre 16 A et 75 A sont soumis à la réglementation de la norme CEI 61000-3-12 ou EN 61000-3-12, comme indiqué dans la référence [77].

3.3.5. Valeurs maximales d'harmoniques acceptables

Des enquêtes réalisées à l'échelle mondiale ont compilé des informations, lesquelles, une fois examinées, permettent d'obtenir des estimations des valeurs harmoniques typiques qui pourraient être détectées dans les réseaux d'approvisionnement en électricité [76].

Le tableau représente les opinions de nombreux fournisseurs quant aux niveaux qu'il est préférable de ne pas dépasser et qu'il est souhaitable de respecter.

Harmoniques impairs non multiples de 3			Harmoniques Impairs multiples de 3			Harmoni	Harmoniques pairs				
Rang h	BT	MT	THT	Rang h	BT	MT	THT	Rang h	BT	MT	THT
5	6	5	2	3	5	4	2	2	2	1,6	1,5
7	5	4	2	9	1,5	1,2	1	4	1	1	1
11	3,5	3	1,5	15	0,3	0,3	0,3	6	0,5	0,5	0,5
13	3	2,5	1,5	21	0,2	0,2	0,2	8	0,5	0,4	0,4
17	2	1,6	1	> 21	0,2	0,2	0,2	10	0,5	0,4	0,4
19	1,5	1,2	1					12	0,2	0,2	0,2
23	1,5	1,2	0,7					>12	0,2	0,2	0,2
25	1,5	1,2	0,7								
> 25	0,2 + 1,3x(25/h)	0,2 + 0,5x(25/h)	0,2 + 0,5x(25/h)								

3.3 Valeurs maximales des deux d'harmoniques acceptables.

3.3.6. L'impact économique de ces perturbations

La pollution harmonique a un effet préjudiciable considérable sur le réseau électrique, entraînant diverses conséquences négatives telles que la perte d'énergie, des frais d'abonnement supplémentaires, le besoin de surdimensionner le matériel, une diminution de la longévité des équipements, ainsi que des déclenchements et des arrêts inopinés des installations [77,78].

3.3.6.1. Pertes énergétiques

Les courants harmoniques entraînent des pertes supplémentaires dans les câbles. et les appareils en raison de l'effet Joule, entraînant ainsi une augmentation des pertes dues à l'effet Joule proprement dit.

De plus, ces courants provoquent également des pertes additionnelles pour les fréquences élevées [77].

3.3.6.2. Surcoût d'abonnement

La présence de courants harmoniques crée la nécessité d'accroître le niveau de puissance demandée, ce qui entraîne parallèlement une hausse des frais d'abonnement.

De surcroît, les fournisseurs d'énergie envisagent de plus en plus des mesures punitives à l'égard des génératrices d'harmoniques. En effet, les surcharges sur le réseau nécessitent une augmentation de la puissance souscrite, occasionnant ainsi des pertes additionnelles, sauf si les installations sont surdimensionnées [77].

3.3.6.3. Surdimensionnement des matériels

Pour compenser la réduction des performances des sources d'énergie telles que les générateurs, les transformateurs et les onduleurs, il est impératif de les dimensionner avec une marge de sécurité. Il est également essentiel de dimensionner les câbles de manière à permettre la circulation des courants harmoniques.

Étant donné que Les fréquences de ces harmoniques sont supérieures, que celle du signal fondamental, les impédances inductives rencontrées par ces courants sont également plus élevées.

Par conséquent, pour minimiser les pertes dues à l'effet Joule, il est nécessaire de prévoir une capacité de câblage supérieure. De plus, le conducteur de neutre doit être surdimensionné pour supporter le passage des courants harmoniques, comme stipulé dans les références [79, 80].

3.3.6.4. Réduction de la durée de vie des matériels

Quand la tension d'alimentation affiche un taux de distorsion (THD) proche de 10 %, on observe une sensible diminution de la durabilité des appareils, estimée comme suit :

- Une diminution d'environ 30 % pour les machines monophasées ;
- Une diminution d'environ 15 % pour les machines triphasées ;
- Une diminution d'environ 5 % pour les transformateurs.

Afin de maintenir la durée de vie prévue pour une charge nominale, il est nécessaire de surdimensionner ces appareils, car un vieillissement prématuré du matériel entraîne un remplacement plus précoce, à moins qu'il n'ait été initialement surdimensionné [81].

3.3.6.5. Destruction de certains matériels

Condensateurs par exemple

3.3.6.6. L'arrêt temporaire

Un dysfonctionnement, qu'il soit attribuable à un composant particulier ou à l'ensemble du système, a le potentiel d'interrompre l'opération d'un équipement de production (tel que la fabrication de semi-conducteurs, une usine de ciment, un système de traitement de l'eau, une installation d'impression, une aciérie, une usine chimique, etc.) ou de services (tels que les centres de données, les institutions bancaires, les réseaux de télécommunication, etc.) [79,80].

3.3.6.7. Le dysfonctionnement

La désactivation de dispositifs essentiels comme les ordinateurs, l'éclairage et les systèmes de sécurité peut mettre en péril la sécurité des individus dans des environnements critiques tels que les hôpitaux, les zones d'aéroport signalées, les zones accessibles au public, ainsi que les immeubles de grande hauteur [81].

3.3.6.8. Vieillissement prématuré

La surcharge de l'installation entraîne un vieillissement prématuré, augmentant ainsi le risque de panne, ce qui nécessite de surdimensionner les équipements de distribution. Des études indiquent que la circulation d'un courant avec un taux de distorsion harmonique (THD) de 25% dans un câble électrique réduit sa durée de vie à 50%. De même, un transformateur alimentant des charges harmoniques subit une augmentation de ses pertes et risque d'être déclassé en puissance [81].

3.3.7. Classification des Méthodes d'écoulement de puissance harmonique

Différentes méthodes d'analyse harmonique ont été développées afin de remédier à l'écoulement de puissance harmonique. Ces méthodes sont classifiées selon les critères suivants :

Le Domaine de Modélisation (temporel ou fréquentiel) est employé pour représenter les différents éléments du réseau électrique et les charges non linéaires. Les méthodes de modélisation comprennent l'approche temporelle, fréquentielle et hybride. La modélisation temporelle est utilisée pour les analyses transitoires et offre la meilleure précision, mais elle nécessite un temps d'exécution très long, surtout pour les grands réseaux électriques alimentant de multiples charges non linéaires. En revanche, la méthode fréquentielle permet d'obtenir rapidement la réponse fréquentielle des éléments du réseau électrique, mais

modéliser les charges non linéaires s'avère complexe. Ainsi, les méthodes hybrides sont utilisées pour trouver un compromis entre le temps d'exécution et la précision en combinant ces deux approches.

b- Le type de réseau électrique (monophasé, triphasé, équilibré ou déséquilibré) influe sur sa représentation : un réseau triphasé équilibré est équivalent à un réseau monophasé. En revanche, un réseau triphasé déséquilibré nécessite une représentation en système triphasé, ce qui entraîne une complexité accrue et des temps d'exécution très longs.

C- Différents types de solutions sont envisagés en fonction de la prise en compte du couplage entre les harmoniques (réseau électrique et charges non linéaires). On peut les classer en deux catégories : les solutions avec considération de couplage et les solutions sans considération de couplage. Lorsque le couplage entre les harmoniques est très fort, on opte pour des méthodes prenant en compte ce couplage. En revanche, si le couplage est négligeable, on utilise des méthodes dites découplées. Dans ces méthodes, les modèles sont traités séparément et évalués pour chaque rang harmonique. La solution finale est obtenue en utilisant la méthode de superposition. En se basant sur ces critères, les méthodes d'écoulement de puissance harmonique peuvent être réparties comme suit :

- Écoulement de puissance harmonique découplé [82-87].
- Écoulement de puissance harmonique découplé rapide [82,88].
- Écoulement de puissance harmonique découplé rapide et modifié [84].
- Écoulement de puissance harmonique découplé

Le couplage harmonique dans l'écoulement de puissance, bien que précis à toutes les fréquences, peut conduire à des résultats divergents lorsqu'appliqué à de grands réseaux électriques, rendant la résolution difficile. Pour simplifier le problème dans de telles situations, on opte pour l'utilisation de l'écoulement de puissance harmonique découplé. Cette approche, simple et rapide, est employée uniquement pour résoudre l'écoulement de puissance fondamentale, en négligeant le couplage harmonique.

Dans ce contexte, le réseau électrique est représenté par la matrice d'admittance harmonique, tandis que les charges non linéaires sont considérées comme des sources harmoniques dont les amplitudes et les déphasages sont estimés à partir de mesures du signal non sinusoïdal ou fournies par les fabricants.

De plus, les composants linéaires peuvent être modélisés en fonction des admittances, comme suit [82]:

L'admittance harmonique pour le rang h au nœud i est :

$$y_i^{(h)} = \frac{P_i}{|V_i^{(1)}|^2} - j \frac{Q_i}{h|V_i^{(1)}|^2}$$
(3.12)

L'admittance harmonique shunt au nœud i est :

$$y_{ci}^{(h)} = h y_{ci}^{(1)} \tag{3.13}$$

L'admittance harmonique entre nœuds i et j est :

$$y_{i,j}^{(h)} = \frac{1}{R_{i,j} + jhX_{i,j}}$$
(3.14)

Pi, Qi, sont les puissances actives et réactives fondamentales au nœud*i*, $y_{ci}^{(1)}$ fondamentale du condensateur. L'admittance

Les courants fondamentaux et harmoniques qui s'écoulent dans le réseau électrique sont exprimés en fonction de la puissance active et réactive fondamentale de la charge Pi, Q1.

$$I_i^{(1)} = \left[(P_i + jQ_i) / V_i^{(1)} \right]^*$$
(3.15)

$$I_i^{(h)} = C(h)I_i^{(1)}$$
(3.16)

C(h):Il s'agit du rapport entre le courant harmonique d'ordre h et sa valeur fondamentale.

Ainsi, en appliquant la loi des nœuds aux différentes harmoniques, il est possible de déterminer les valeurs des tensions harmoniques dans tous les nœuds du réseau.

$$Y^{(h)}V^{(h)} = I^{(h)} (3.17)$$

• Écoulement de puissance harmonique découplé rapide

Pour résoudre l'écoulement harmonique, cette méthode se base sur l'équivalent des courants injectés ainsi que la technique avant-arrière.

$$I_{i}^{k} = I_{i}^{r} \left(V_{i}^{k} \right) + j I_{i}^{i} \left(V_{i}^{k} \right) = \left[\frac{(P_{i} + j Q_{i})}{V_{i}^{k}} \right]^{*}$$
(3.18)

 V_i^k La tension au nœud *i* avec itération *k*

À chaque itération, le courant fondamental $I_i^{(1)}$ doit être transformé et calculé, tandis que les courants harmoniques ne subissent aucune transformation car ils sont déterminés par l'analyse de l'onde non sinusoïdale.

En appliquant la loi des nœuds sur le réseau électrique représenté dans la (Figure 3.5), qui comporte 4 nœuds (I, K, J, i) et 3 sources d'harmoniques, nous pouvons établir la relation entre les courants dans les branches R et les courants harmoniques injectés I par les charges non linéaires connectées au nœud K. Cette relation est donnée par les expressions suivantes :

$$B_{jk}^{(h)} = -I_k (3.19)$$

$$B_{jl}^{(h)} = -I_l (3.20)$$

$$B_{ij}^{(h)} = B_{ik}^{(h)} B_{jl}^{(h)} - I_j^{(h)}$$
(3.21)

En forme générale, la somme de toutes branches reliant le nœud i

$$B_{ij}^{(h)} = -I_k^{(h)} + \sum_J B_{jl}^{(h)}$$
(3.22)



3.5 Réseau radial.

D'autre part, la relation entre les courants dans les branches B et les tensions dans les nœuds V est exprimée de la manière suivante :

$$V_j^{(h)} = V_j^{(h)} - B_{ij}^{(h)} Z_{ij}^{(h)}$$
(3.23)

$$V_k^{(h)} = V_j^{(h)} - B_{jk}^{(h)} Z_{jk}^{(h)}$$
(3.24)

$$V_l^{(h)} = V_j^{(h)} - B_{jl}^{(h)} Z_{jl}^{(h)}$$
(3.25)

 $Z^{(h)}$: est l'impédance harmonique de la ligne.

Les tensions dans les nœuds peuvent être déterminées en appliquant la méthode de calcul en avance, en partant du nœud de référence vers les autres nœuds de charge [83].

• Écoulement de puissance harmonique découplé rapide et modifié (MFDHPF)

Dans le but de trouver une solution efficace et rapide pour l'intégration des sources d'harmoniques, une méthode de flux de puissance découplé rapide (conventionnelle) a été élaborée [84]. Cette méthode a été mise à l'épreuve sur deux réseaux équilibrés, l'un comprenant 5 nœuds et l'autre 14 nœuds, chacun étant relié à un convertisseur, afin d'évaluer leur taux de distorsion harmonique.

Les charges non linéaires ont été modélisées séparément et incorporées dans cet algorithme, sans entraîner de temps de calcul notablement plus long. L'implémentation de cet algorithme a fait appel à la technique diakopital [89].

3.3.8. Méthodes d'identification des grandeurs harmoniques

En matière de calcul, on peut classer les algorithmes pour identifier les grandeurs harmoniques en deux catégories distinctes : fréquentielle et temporelle [90,91].

3.3.8.1. Champ d'application fréquentiel

Les algorithmes employés dans ce domaine se fondent sur l'analyse de Fourier appliquée aux grandeurs perturbées telles que les courants ou les tensions, dans le but de récupérer les signaux de compensation, en appliquant la transformée de Fourier, ils commencent par séparer les composantes harmoniques de compensation des signaux indésirables harmoniques, puis les agrègent pour générer les commandes nécessaires. Pour garantir une compensation efficace, En général, la fréquence de commutation des semiconducteurs du filtre actif est maintenue au-dessus de deux fois la fréquence harmonique la plus élevée.

Néanmoins, il est important de remarquer que l'application de la transformée de Fourier (qui implique des équations non linéaires) est un processus de calcul complexe, entraînant en conséquence un temps de réponse relativement lent. Parmi les algorithmes de cette catégorie, on peut citer les exemples suivants [91] :

3.3.8.1.1 Art de l'analyse fréquentielle de la série de Fourier & FFT

En employant la technique de la Transformée Rapide de Fourier (FFT), il devient envisageable de reconstruire la composante harmonique d'un signal en supprimant sa composante fondamentale dans le domaine transformé. Par la suite, en appliquant la FFT inverse, on parvient à obtenir le signal final dans le domaine temporel [92]. Cependant, cette méthode présente un inconvénient significatif associé à son délai de réponse.

En effet, le système doit collecter des échantillons sur une période complète pour générer les coefficients de Fourier. Par conséquent, cet algorithme est approprié uniquement pour des systèmes caractérisés par des variations lentes dans le temps [91].

3.3.8.1.2. Méthode de la multiplication sinusoïdale

Une méthode adoptée consiste à multiplier le signal par une onde sinusoïdale de fréquence fondamentale, suivie de l'intégration du produit obtenu. Cette approche permet d'éliminer efficacement tous les harmoniques de rang élevé en utilisant un filtre passe-bas simple.

Toutefois, il est à souligner que même avec cette méthode, la réactivité reste relativement lente, exigeant la collecte de données sur plus d'un cycle complet pour atteindre les résultats escomptés [93].

3.3.8.1.3. Technique des séries de Fourier modifiées

Le principe fondamental de cette méthode réside dans son aptitude à se focaliser exclusivement sur la composante fondamentale du signal, ce qui permet de distinguer la composante harmonique du signal global d'une onde électrique échantillonnée, que ce soit pour le courant ou la tension de charge [93].

Pour mettre en œuvre cette approche de manière pratique, les équations principales des Séries de Fourier sont réaménagées pour générer une formule récursive avec une fenêtre glissante [49].

Dans cette configuration, deux matrices circulaires distinctes sont employées pour stocker les composantes des coefficients sinus et cosinus, lesquelles sont recalculées à chaque étape d'échantillonnage.

Les nouvelles valeurs calculées pour ces coefficients se substituent aux anciennes, tandis que l'ensemble des sommes des coefficients sinus et cosinus est constamment

actualisé. Par rapport à d'autres méthodes couramment utilisées, en particulier dans les applications monophasées, cette technique se distingue par un temps de calcul nettement réduit. Son principal avantage réside dans sa polyvalence, car elle peut être appliquée aussi bien aux systèmes monophasés qu'aux systèmes triphasés.

De plus, une autre approche, basée sur une modification des séries de Fourier, a été développée pour les applications triphasées. Elle repose sur la décomposition du signal triphasé en deux composantes distinctes : la composante directe et la composante en quadrature [95].

3.3.8.2. Champ d'application temporel

Les algorithmes de compensation dans le domaine temporel reposent sur une estimation instantanée des grandeurs nécessaires pour la compensation des courants/tensions harmoniques. En général, ces algorithmes exigent des courants de référence non seulement pour la compensation des harmoniques, mais également pour réguler la puissance réactive et atténuer les variations de la tension continue du filtre actif. En essence, ces diverses approches visent à inclure la composante réactive pour éliminer les courants harmoniques et améliorer le facteur de puissance. Plusieurs méthodes entrent dans cette catégorie [96], dont:

3.3.8.2.1. Théorie P-q instantanée

Principe : Cette théorie repose sur un concept fréquemment employé pour extraire les courants/tensions de référence d'un filtre actif. Elle englobe une transformation adaptative des puissances, des courants et des tensions instantanées depuis le référentiel abc jusqu'au référentiel α - β .

Les équations qui en résultent, permettant de convertir les grandeurs du premier plan triphasé en coordonnées diphasées du second plan, sont dérivées du diagramme de phase illustré dans la (Figure 3.6) [93]



3.6 Diagramme de transformation du référentiel a-b-c au référentiel α - β .

Les équations suivantes permettent d'obtenir les valeurs instantanées des courants et tensions triphasés dans le niveau α - β :

$$\begin{bmatrix} \nu_{\alpha} \\ \nu_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{32} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \nu_{\alpha} \\ \nu_{\beta} \\ \nu_{\gamma} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \\ i_{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{32} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \\ i_{\gamma} \end{bmatrix}$$
(3.26)

La matrice de transformation développée par Concordia [97], représentée dans la figure 3.6, est symbolisée par [C_32] et son expression est la suivante :

$$[C_{32}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$$
(3.27)

Cette conversion est applicable uniquement lorsque les tensions sont équilibrées et sinusoïdales. Dans ce référentiel, les puissances actives et réactives instantanées sont déterminées à l'aide du calcul suivant :

$$\begin{cases} p(t) = v_{\alpha}(t).i_{\alpha}(t) + v_{\beta}(t).i_{\beta}(t) \\ p(t) = -v_{\alpha}(t).i_{\beta}(t) + v_{\beta}(t).i_{\alpha}(t) \end{cases}$$
(3.28)

Il est évident que la fonction p(t) reste équivalente à son expression usuelle dans le repère a-b-c. Toutefois, pour décrire Akagi a proposé une nouvelle formulation pour la puissance réactive instantanée dans l'espace vectoriel, définie de la manière suivante :

$$\vec{q} = \vec{v_{\alpha}} \times \vec{\iota_{\beta}} + \vec{v_{\beta}} \times \vec{\iota_{\alpha}}$$
(3.29)

Le vecteur \vec{q} est orthogonal au plan α - β . Pour respecter la règle de la main droite, le vecteur $\vec{v_{\alpha}}$ est perpendiculaire au vecteur $\vec{t_{\beta}}$, , et le vecteur $\vec{v_{\beta}}$ est perpendiculaire au vecteur $\vec{t_{\alpha}}$. Cependant, il est important de noter que le vecteur \vec{q} ne représente pas une puissance instantanée en raison du produit de la tension dans une phase et du courant dans une autre phase. En revanche, les produits vectoriels $\vec{v_{\alpha}} \times \vec{t_{\alpha}}$ et $\vec{v_{\beta}} \times \vec{t_{\alpha}}$ expriment clairement une puissance instantanée, Étant donné qu'elles impliquent la multiplication de la tension et du courant en phase, les expressions conventionnelles de puissance ne permettent pas de capturer la notion de puissance instantanée telle qu'introduite par Akagi [93].

Il a baptisé cette nouvelle grandeur électrique, définie par l'équation (3.30), "puissance instantanée imaginaire". Elle est représentée par le produit des valeurs instantanées du courant et de la tension, bien qu'elle ne puisse pas être traitée comme une grandeur classique. À partir des équations (3.28) et (3.29), les composantes AC et DC de p et q peuvent être formulées comme suit :

$$p = \overline{p} + \widetilde{p}$$
et $q = \overline{q} + \widetilde{q}$. Avec :

 \bar{p} : La partie en courant continu de p, liée au courant actif fondamental classique.

 \tilde{p} : La portion alternative de p, qui ne présente pas de valeur moyenne, est intimement liée aux courants harmoniques générés par les composantes alternatives de la puissance instantanée réelle.

 \bar{q} : La partie en courant continu de q est reliée à la puissance réactive générée par les composantes fondamentales des courants et des tensions. \tilde{q} : La portion alternative de q est corrélée aux courants harmoniques engendrés par les composantes alternatives de la puissance instantanée réactive.

• Cas d'un filtre actif parallèle

Il est question ici de l'extraction des courants de référence, avec une expression des courants en fonction des puissances instantanées dans le plan \$\alpha-\beta\$.

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^{2} + v_{\beta}^{2}} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ v_{\beta} & -v_{\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ v_{\beta} & -v_{\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} i_{\alpha p} \\ i_{\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \end{bmatrix}$$
(3.30)

3.3.8.2.2. Technique référentiel synchrone

Le schéma de blocs d'un générateur de courants de référence basé sur l'algorithme du référentiel synchrone, illustré dans la (Figure 3.7).



3.7 Génération des courants de référence selon l'algorithme du référentiel synchrone.

Les courants réels subissent une conversion en coordonnées d-q dans un repère synchronisé qui est en phase avec les tensions d'alimentation et tourne à la même fréquence. Cette transformation est mathématiquement décrite par l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$$
(3.31)

De façon analogue à la théorie de la puissance réactive instantanée, les termes d et q sont composés d'une partie en courant continu et d'un multiple de la composante alternative, formulés comme suit :

$$\begin{cases} i_d = i_{ddc} + i_{dac} \\ i_q = i_{qdc} + i_{qac} \end{cases}$$
(3.32)

Dans ce référentiel, les signaux de compensation sont représentés par:

$$\begin{cases} i_{dref} = -i_{dac} \\ i_{qref} = -i_{qdc} - i_{qac} \end{cases}$$
(3.33)

Pour finir, les courants de référence sont produits dans le plan triphasé a-b-c à travers :

$$\begin{bmatrix} i_a^*\\ i_b^*\\ i_c^* \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{3} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0\\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2}\\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0\\ 0 & \cos(\omega t) & \sin(\omega t)\\ 0 & \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_0\\ i_{dref}\\ i_0 \end{bmatrix}$$
(3.34)

Dans cette méthode, des caractéristiques cruciales des courants de référence sont directement dérivées des courants provenant de la charge polluante, sans nécessité d'incorporer les tensions du réseau. Ceci représente un avantage considérable, car la

génération des courants de compensation n'est pas influencée par les distorsions ou les déséquilibres existant dans les tensions d'alimentation, conférant ainsi à la compensation une plus grande robustesse et des performances améliorées [98].

Toutefois, il est impératif de convertir les signaux du plan α - β en coordonnées d-q, où ils sont représentés par des composantes sinus et cosinus, et synchronisés avec les tensions du réseau. Pour réaliser cette transformation, des boucles à verrouillage de phase, également connues sous le nom de PLL (Phase-Locked Loop) [98], sont employées dans chaque phase. Le schéma opérationnel d'une PLL est présenté dans la (Figure 3.8).



3.8 Diagramme de blocs d'une PLL.

Comme l'algorithme de création des courants harmoniques présente des similitudes avec la procédure mathématique utilisée dans l'algorithme précédent, les effets induits par le filtre passe-bas sont les mêmes que ceux qui influencent la théorie de la puissance réactive instantanée.

3.3.8.2.3. Procédé de la séquence positive du fondamental

Le principe de cet algorithme est illustré dans la figure ci-dessous. Cette technique novatrice a été proposée en 2003 par [98]. Elle se fonde sur la nécessité d'obtenir un courant source équilibré, non déformé et synchronisé avec la séquence positive de la tension du réseau. En conséquence, le filtre actif peut réaliser les objectifs suivants :

Atteindre un facteur de puissance unitaire pour la séquence positive de la fréquence fondamentale.

Minimiser la puissance active consommée ou fournie par le filtre actif.

Compenser les courants harmoniques et la puissance réactive.

Équilibrer le courant du neutre. Afin d'atteindre ces objectifs, les courants triphasés souhaités du côté de la source, il est nécessaire que les courants soient en phase avec la

composante fondamentale de la tension du réseau selon la séquence positive. Ces courants peuvent être exprimés par l'équation (3.35).

$$\begin{bmatrix} i_{a}^{*} \\ i_{b}^{*} \\ i_{c}^{*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} - I_{sm} \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \phi_{f}^{+}) \\ \sin(\omega t + \phi_{f}^{+} - 2\pi/3) \\ \sin(\omega t + \phi_{f}^{+} + 2\pi/3) \end{bmatrix}$$
(3.35)

Avec

 I_{sm} : Amplitude (valeur max) du courant de source.

 ϕ_f^+ : L'angle de la séquence positive dérivé de la transformation de Fortescue [56]



3.9 Génération des courants de référence par l'algorithme de la séquence positive du fondamental.

3.3.8.2.4. Technique du filtre coupe-bande (notch filter)

Cet algorithme simplifie le calcul des courants de référence, comme illustré dans la (Figure 3.10). Il est spécialement conçu pour générer les courants de référence dans un système à 4 fils, incluant le fil neutre, et pour réguler la tension continue du filtre actif. Le processus est très simple : chaque courant triphasé provenant de la charge est filtré par un filtre passe-bande réglé à la fréquence fondamentale à éliminer.

Les courants harmoniques de référence de chaque fil, y compris le conducteur neutre, sont alors obtenus en sommant négativement les références des trois phases. Par la suite, les tensions du réseau interviennent pour fournir uniquement la composante fondamentale du courant requise par la charge. Cela assure que le courant du neutre est exempt de composantes harmoniques. L'objectif ultime est que le filtre actif ne fournisse que de la puissance réactive, ce qui implique que la valeur moyenne du courant du côté continu soit nulle[98].

Néanmoins, dans un filtre actif non-idéal, des pertes peuvent entraîner la décharge de l'élément de stockage d'énergie. Pour éviter cela, des composantes fondamentales sont ajoutées aux courants de référence calculés.

L'amplitude de ces composantes peut être déterminée en comparant la valeur réelle de la tension continue (Vdc) avec la valeur souhaitée (Vac désirée), comme la montre la (Figure 3.10).



3.10 Génération des courants de référence par l'algorithme du filtre coupe-bande.

3.3.8.2.5. Techniques de Commande et de Régulation

La majorité des commandes employées pour les filtres actifs reposent sur les techniques de modulation de largeur d'impulsion (MLI).

3.3.8.2.5.1.MLI à échantillonnage périodique

La méthode d'échantillonnage périodique permet aux semi-conducteurs composant le filtre actif de s'activer et de se désactiver lors des transitions d'une horloge à onde carrée à fréquence fixe (fréquence d'échantillonnage).

Cette approche de commande est particulièrement simple à mettre en œuvre, nécessitant uniquement un comparateur et une bascule de type D par phase. L'avantage principal de cette méthode réside dans la limitation du temps minimal entre les commutations, lequel est déterminé par la période d'échantillonnage de l'horloge. Toutefois, la fréquence précise de commutation n'est pas clairement définie [100].

3.3.8.2.5.2. MLI à Bande d'hystérésis

La méthode de la bande d'hystérésis implique la commutation des interrupteurs du filtre actif dès lors que l'erreur entre le signal (courant ou tension) et sa consigne dépasse un seuil prédéterminé, connu sous le nom de plage ou bande d'hystérésis.

Cette approche nécessite simplement un comparateur à hystérésis par phase. Dans ce scénario, la fréquence de commutation ne peut pas être précisément déterminée, mais elle peut plutôt être estimée [100].

3.3.8.2.5.3.MLI à porteuse triangulaire

La technique de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) à porteuse triangulaire consiste à comparer l'erreur entre le signal (courant ou tension) et sa référence avec une onde triangulaire (la porteuse) de magnitude et de fréquence préétablies.

Avant cette comparaison avec la porteuse triangulaire, l'erreur subit un prétraitement par un correcteur Proportionnel-Intégral (PI) [100].

3.4. Technique et les méthodes pour l'amélioration de la qualité d'Energie et la suppression des harmoniques

3.4.1. A titre préventif

Les actions préventives essentielles pour atténuer les impacts de ces inter(harmoniques) impliquent la reconfiguration de l'installation pour réduire leur incidence et contenir leur propagation dans le réseau.

Cette approche permet de cartographier le réseau et d'anticiper d'éventuelles anomalies. Des mesures appropriées peuvent être prises, notamment Lors de l'implémentation d'un nouvel équipement ou d'une nouvelle installation [101].

3.4.2. Redresseurs industriels

Dans le cas de besoins spécifiques, il est clair que la première mesure à envisager concerne les caractéristiques des redresseurs, De plus, diverses options d'améliorations significatives peuvent être envisagées. Une première approche consiste à concevoir les redresseurs avec un nombre de phases approprié en fonction de leur puissance, en optant notamment pour un couplage hexaphasé ou dodécaphasé, surtout dans le secteur industriel.

Cette démarche permet de réduire significativement les harmoniques de faible rang et d'amplitude élevée, conduisant ainsi à un couplage dodécaphasé bien équilibré. De plus, lorsque l'installation intègre plusieurs unités en parallèle, il est préférable d'utiliser des configurations de couplage différentes pour leurs transformateurs. Par exemple, cela pourrait impliquer l'utilisation d'enroulements primaires ou secondaires configurés respectivement en triangle et en étoile [101].

3.4.3. Installer des inductances anti-harmoniques dans l'installation.

Il est possible de réduire les courants harmoniques en augmentant la résistance du circuit d'alimentation grâce à l'intégration d'inductances de ligne. Cette méthode permet de stabiliser le flux du courant tout en limitant les harmoniques indésirables.

Pour éviter le phénomène de résonance et protéger les condensateurs, il est vivement recommandé d'installer des bobines anti-harmoniques sur les batteries de condensateurs. Ces bobines augmentent l'impédance globale du système, notamment pour les harmoniques de rangs élevés. Ces mesures sont détaillées dans les références [101,102].

3.4.4. Aménagements de la structure des réseaux.

Il est crucial d'explorer des solutions pratiques pour prévenir les problèmes dans les grandes installations industrielles, notamment en optant pour une configuration de réseau plus favorable. Par exemple, il peut être envisagé de connecter directement les redresseurs à la barre d'alimentation haute tension au lieu de les raccorder en aval des transformateurs abaisseurs.

De plus, il est possible de considérer l'option de raccorder une usine à un niveau de tension plus élevé. Au sein d'un réseau d'usine, une approche consiste à séparer les Tableaux Généraux Basse Tension (TGBT) en distinguant les charges perturbatrices des charges sensibles.

Certains fabricants recommandent également à leurs clients industriels de maintenir un rapport minimum entre la puissance de court-circuit et la puissance des redresseurs industriels pour assurer la compatibilité, bien que cette règle empirique puisse être sujette à débat.

Dans le contexte des réseaux de distribution publique à basse tension, où les perturbations réelles sont souvent générées par des appareils électrodomestiques conformes

aux normes, il peut être nécessaire de réorganiser le réseau de distribution en réduisant les impédances du circuit, ce qui peut impliquer l'installation de sous-stations intermédiaires [102, 103].

3.4.5. Ajustement de la section du neutre

Lorsque le système d'alimentation triphasé est équilibré, la règle classique stipule que "dans un état d'équilibre, le système d'alimentation ne doit présenter aucune composante négative ou homopolaire".

Cependant, cette règle ne reste pas valable en présence d'harmoniques. Il est essentiel de noter que les harmoniques multiples de trois sont inclus dans la composante homopolaire. ce qui peut provoquer une surchauffe du conducteur neutre.

La surcharge du conducteur neutre est considérée comme un problème courant dans les installations industrielles. Pour résoudre ce problème, il est recommandé que chaque phase soit accompagnée de son propre conducteur neutre, ou que le conducteur neutre partagé ait au moins deux fois la section transversale de chaque conducteur de phase. [103, 104]

3.4.6. Positionner les charges polluantes en amont du réseau

L'accroissement de la perturbation harmonique globale est étroitement associé à la réduction de la puissance de court-circuit. Indépendamment de considérations financières, il est donc plus favorable de connecter les charges génératrices de perturbations le plus près possible de la source d'alimentation [105].

3.4.7. Regrouper les charges polluantes

En pratique, il est recommandé de séparer les équipements perturbateurs des autres composants lors de l'établissement d'un schéma unifilaire., cela implique l'utilisation de jeux de barres distincts pour alimenter les charges polluantes et les charges non polluantes [106,107],

3.4.8. Isoler les sources

Pour renforcer la suppression des harmoniques, une amélioration additionnelle peut être réalisée en choisissant une alimentation par l'intermédiaire d'un transformateur distinct. Cependant, il est important de noter que cette méthode entraîne une augmentation du coût global de l'installation [108,109].

3.4.9. Utiliser des transformateurs à couplages particuliers

Le couplage de transformateurs offre la possibilité d'éliminer certaines harmoniques de rangs spécifiques. Selon les configurations de couplage utilisées, divers rangs d'harmoniques peuvent être réduits ou bloqués [108,109].

3.4.10. Transformateurs HT/MT à tension de court-circuit réduite

Il peut être envisagé d'utiliser une tension de court-circuit réduite pour les transformateurs de raccordement.

Cette approche a pour effet d'augmenter la puissance de court-circuit à l'échelle locale, ce qui a pour conséquence de réduire l'amplitude des tensions harmoniques.

De plus, cela entraîne également une augmentation de la fréquence de résonance en présence de condensateurs [110].

3.4.11. Régulation décentralisée de la tension

Pour certains équipements sensibles, une approche similaire à celle évoquée pour les variations soudaines de tension peut être envisagée. Une solution économique ou spécifique consiste alors à améliorer le filtrage d'entrée pour les équipements qui requièrent cette amélioration en raison de leur sensibilité.

Cette mesure est particulièrement pertinente pour diverses catégories d'équipements de faible puissance, tels que les appareils de laboratoire, les installations de radiographie médicale, et d'autres[111].

3.4.12. Les méthodes traditionnelles

3.4.12.1. (Le filtrage passif)

Les filtres passifs ont deux objectifs principaux dans les réseaux électriques : prévenir la propagation des courants harmoniques et compenser la puissance réactive. L'idée sousjacente au filtrage est d'ajouter une impédance en parallèle avec le réseau d'alimentation, ayant une faible valeur à la fréquence d'intérêt que l'on souhaite filtrer, tout en ayant une valeur élevée à la fréquence fondamentale du réseau. Ces filtres passifs sont composés d'éléments tels que des inductances, des condensateurs et des résistances, qui ensemble forment une impédance dont la valeur change en fonction de la fréquence.

Lorsque le filtre passif est connecté en parallèle avec le réseau, il absorbe un courant harmonique spécifique. Par exemple, pour éliminer le courant harmonique de rang 5, les composants passifs sont dimensionnés de manière à avoir une impédance équivalente minimale à la fréquence de 250 Hz. Cela conduit à diriger principalement le courant à travers l'impédance la plus basse, c'est-à-dire le filtre passif, plutôt que l'impédance de court-circuit du réseau, comme le montre la (Figure 3.11)[103].



3.11 Raccordement d'un filtre passif.

Equations des courants :

 $ich = ifondamental + ih 5 + ih 7 + ih 13 + \cdots$

 $i_{filtre} = ih_5$ $irés = ifondamental + ih_7 + ih_{11} + ih_{13} \dots$

Deux des dispositifs de filtrage les plus couramment utilisés sont le filtre passif résonant et le filtre passif amorti, également connu sous le nom de filtre passe-haut.

• Filtre passif résonant

Le filtre résonant présenté dans la (Figure 3.12) affiches une impédance extrêmement basse à sa fréquence de résonance. Il présente une grande sélectivité et est employé pour atténuer de manière significative des harmoniques spécifiques, habituellement les 5ème et 7ème.

Pour filtrer chaque rang d'harmoniques, il faut trois branches shunt (un filtre shunt par phase). En offrant ses capacités, le filtre résonant contribue à fournir de la puissance réactive au convertisseur [103].



3.12 Filtre passif raisonnant.

La résistance interne de l'inductance est généralement représentée par "R". L'impédance du filtre est définie par la relation suivante :

$$Z(\omega) = \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_a}\right)^2 + j\left(\frac{R}{L\omega_a}\right)\frac{\omega}{\omega_a}}{jc\omega}$$
(3.36)

Avec ω la pulsation de résonance :

$$\omega_a = \sqrt{\frac{1}{LC}} \tag{3.37}$$

Le facteur de qualité devient :

$$FQ = \frac{1}{2\varepsilon} = \frac{L\omega_1 h_a}{R}$$
(3.38)

La pulsation fondamentale du réseau est notée $\omega 1$. Le facteur de qualité, dont la valeur typique est choisie dans la plage [30 - 60], intervient dans l'équation. Si l'on néglige la résistance du filtre, la puissance réactive renvoyée au réseau est définie par la relation suivante :



3.13 Module de l'impédance d'un filtre résonant raccordé au range 5 en fonction de fréquence f/f_a.

La tension composée nominale est représentée par "U." La (Figure 3.13) présente le module d'impédance d'un filtre résonant accordé sur le rang 5. Dans ce cas, le facteur de qualité pris en compte est de 50.

$$Q = \frac{c\omega_1 U^2}{1 - \left(\frac{1}{h_a}\right)^2}$$
(3.39)

Le filtre amorti, tel qu'illustré dans la (Figure 3.14) et également désigné sous le nom de filtre passe-haut du second ordre, offre une impédance réduite aux harmoniques ayant des fréquences égales ou supérieures à sa fréquence d'accord. Ce genre de filtre est fréquemment employé pour atténuer les harmoniques de rang élevé, généralement ceux d'un rang supérieur à 1 [103].



3.14 Filtre passif amortie.

L'impédance d'un filtre amorti est donnée par la relation suivante :

$$Z(\omega) = \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_a}\right)^2 + j\left(\frac{L\omega_a}{R}\right)\frac{\omega}{\omega_a}}{jRC\omega - \left(\frac{\omega}{\omega_a}\right)^2}R$$
(3.40)

Le facteur de qualité du filtre devient :

$$FQ = \frac{R}{L\omega_1 h_a} \tag{3.41}$$

Le facteur de qualité [111,112] est habituellement choisi dans l'intervalle de [0,5 à 5]. En négligeant les influences résistives sur la composante fondamentale, la puissance réactive renvoyée au réseau peut ainsi être exprimée par la relation suivante :

$$Q = \frac{C\omega_1 U^2}{1 - \left(\frac{1}{h_a}\right)^2}$$
(3.42)

Malgré leur utilisation répandue dans l'industrie, ces dispositifs présentent plusieurs inconvénients [113]:

- Une compréhension approfondie de la configuration du réseau électrique est indispensable ;
- Ils manquent de flexibilité pour s'ajuster aux variations du réseau et de la charge ;
- Ils peuvent nécessiter un volume considérable d'équipements ;
- Le réseau peut entrer en résonance avec le filtre, provoquant des problèmes de fréquences ;
- Des problèmes de résonance peuvent survenir en raison de l'impédance du réseau ;
- Leur efficacité dépend de l'impédance du réseau, qui est souvent mal connue et sujette à des variations ;
- Ils ne peuvent pas couvrir une large bande de fréquences, ce qui oblige à utiliser plusieurs filtres d'accord de rang différent.

Cependant, en particulier avec l'introduction de nouveaux composants semiconducteurs tels que les thyristors GTO et les transistors IGBT, de nouvelles solutions pour atténuer les perturbations du réseau électrique ont été envisagées. Dans le but d'assurer une qualité électrique optimale aux consommateurs, même dans des conditions de

fonctionnement perturbées, les filtres actifs sont proposés comme des solutions de pointe pour la dépollution des réseaux électriques.

Ces solutions ont l'avantage de pouvoir s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique sans nécessiter de modifications des installations du fournisseur d'énergie ou du consommateur [114].

3.4.12.1. Les méthodes modern FILTRES ACTIFS

L'objectif principal de ces filtres actifs est de générer des courants ou des tensions harmoniques afin de compenser les perturbations qui peuvent dégrader les performances des équipements et des installations électriques. Il existe trois topologies principales de filtres actifs [112]:

1/ Filtre actif parallèle (FAP) : Ce filtre est spécifiquement conçu pour compenser toutes les perturbations de courant, y compris les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive.

2/ Filtre actif série (FAS) : Conçu pour rectifier toutes les perturbations de tension, telles que les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension.

3/ Combinaison parallèle-série active : Cette solution universelle permet de compenser à la fois les perturbations en courant et en tension, offrant une réponse complète aux problèmes de qualité de l'énergie électrique.

a/ Le filtre actif parallèle :

Également appelé compensateur shunt, ce dispositif est connecté en parallèle au réseau de distribution, comme illustré dans la (Figure 3.16). Il est généralement commandé pour agir comme un générateur de courant. Son rôle principal est de réinjecter dans le réseau électrique des courants harmoniques, notés i_{ing} , qui présentent la même amplitude que ceux absorbés par les charges non linéaires, mais qui sont déphasés en sens opposé. Cette opération permet d'obtenir un courant sinusoïdal, noté is, fourni par le réseau, qui est en phase avec la tension correspondante.

La capacité de ce dispositif à fonctionner de manière indépendante vis-à-vis de la source d'énergie et de la charge présente des avantages tels que l'auto-adaptabilité, la fiabilité et des performances exceptionnelles [112].



3.15 Filtre actif parallèle.

b/ Le filtre actif série

Le filtre actif série est connecté en série avec le réseau, comme illustré dans la (figure 3.16). Il agit comme une source de tension produisant des harmoniques, qui, lorsqu'elles sont ajoutées à la tension du réseau, génèrent une onde sinusoïdale. Son principal objectif est de protéger les équipements sensibles contre les perturbations de tension, telles que les harmoniques, les chutes de tension et les déséquilibres, à la fois de la source d'alimentation et des courants perturbateurs circulant à travers l'impédance du réseau.

Sur le plan conceptuel, cette structure ressemble à celle des conditionneurs de réseau. Cependant, cette topologie présente certaines difficultés et inconvénients lors de sa mise en œuvre, notamment son incapacité à compenser les courants harmoniques consommés par la charge [112].



3.16 Filtre actif série.

c / La combinaison parallèle-série actifs

Une solution de compensation universelle, connue sous le nom de combinaison parallèle-série actifs ou Unified Power Quality Conditioner (UPQC), repose sur l'utilisation
Chapitre 3 : Généralité sur la qualité de l'Energie électrique, les Harmoniques, les filtres.

simultanée de filtres actifs en parallèle et en série. L'UPQC bénéficie des avantages combinés des filtres actifs parallèles et série. Lorsque le filtre actif série est positionné en amont du filtre actif parallèle, comme illustré dans la (Figure 3.17), il permet de purifier la source en éliminant les tensions perturbatrices [112]. En revanche, lorsqu'il est placé en aval, il isole la charge des perturbations provenant de la source.



3.17 Combinaison des filtres actifs parallèle et série.

d/ Combinaison hybride active et passive

Pour diminuer le dimensionnement et, par conséquent, le coût des filtres actifs, une approche envisageable est de combiner des filtres actifs de faible puissance avec des filtres passifs. Dans cette approche, les filtres passifs jouent le rôle d'éliminer les harmoniques prédominants, ce qui permet de réduire la taille des filtres actifs qui ne doivent compenser que les perturbations résiduelles. Cette approche a été étudiée sous différentes configurations, parmi lesquelles les plus couramment explorées sont [113]:

- Le filtre actif série associé à des filtres passifs en parallèle.
- Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs en parallèle.
- Le filtre actif parallèle combiné à un filtre passif en parallèle.

Ces différentes combinaisons ont été abordées dans la littérature [115] et font l'objet de recherches approfondies.

Chapitre 3 : Généralité sur la qualité de l'Energie électrique, les Harmoniques, les filtres.

3.4.12.1.1. Avantages des filtres actifs

- L'absence d'état de résonance contribue à renforcer la stabilité du système de puissance ;
- Il s'adapte automatiquement aux variations des charges connectées au réseau électrique ;
- Il peut compenser plusieurs ordres harmoniques tout en restant dans les limites de sa bande passante ;
- Même lorsque le courant harmonique à compenser dépasse la capacité de dimensionnement du filtre, celui-ci ne se trouve pas en situation de surcharge.
- Il est possible de réaliser la compensation de la puissance réactive.

L'amélioration de la qualité de l'énergie vise à éliminer les perturbations qui affectent les charges lorsque le niveau de qualité actuel est insuffisant, en particulier lorsque les coûts et les désagréments liés à un mauvais fonctionnement sont inacceptables.

Le concept de qualité de l'énergie englobe un large éventail d'aspects. Son amélioration implique divers facteurs tels que :

- La configuration du réseau ;
- Les systèmes d'automatisation pour la réinjection d'énergie ;
- Le niveau de fiabilité des infrastructures ;
- Leur protection et leur entretien.

Pour atteindre cet objectif, deux stratégies sont envisageables :

1. La première méthode repose sur la modification des caractéristiques des charges perturbatrices ou du réseau., voire le remplacement des sources classiques de pollution par des topologies qui prévoient un prélèvement sinusoïdal pour éviter la survenue de perturbations.

2. La seconde stratégie consiste à compenser ces perturbations en utilisant l'un des systèmes de compensation disponibles [113].

Chapitre 3 : Généralité sur la qualité de l'Energie électrique, les Harmoniques, les filtres.

3.5. Conclusion

Pour remédier à ces problèmes, diverses techniques ont été développées afin d'éliminer atténuer les harmoniques et améliorer la qualité de l'énergie. Parmi ces approches, les filtres actifs se distinguent comme des solutions prometteuses, permettant de compenser en temps réel les harmoniques et de s'adapter efficacement aux fluctuations de la charge.

En combinant les filtres actifs en configuration parallèle ou série, ou en les intégrant avec des filtres passifs, il est possible de créer des systèmes de compensation universelle, comme l'Unified Power Quality Conditioner (UPQC), qui présentent des avantages cumulatifs et renforcent la stabilité du réseau électrique. Toutefois, il est crucial de noter que, malgré les avancées réalisées, la qualité de l'énergie demeure un domaine de recherche en constante évolution, en raison des évolutions technologiques et de la complexité croissante des charges électriques.

La mise en place réussie de techniques de réduction des harmoniques et d'amélioration de la qualité de l'énergie dépendra d'une analyse approfondie des besoins spécifiques de chaque système, en prenant en compte les considérations économiques, environnementales et opérationnelles. En résumé, la poursuite de la recherche et de l'innovation dans ce domaine revêt une importance cruciale pour garantir une distribution d'énergie plus stable, efficiente et respectueuse de l'environnement, répondant ainsi aux besoins croissants de nos sociétés modernes, notamment dans le secteur ferroviaire.

Partie I : Analyse de la résonance harmonique dans les systèmes ferroviaires électriques

4.1. Introduction

La section préliminaire réalise une étude et une analyse approfondies des harmoniques hautes fréquences dans les systèmes ferroviaires électriques à basse vitesse (ERS), tels que les tramways. Nous examinons également leur effet sur la stabilité du réseau de traction, qui entraîne souvent des dommages importants aux équipements, des distorsions de tension et des augmentations de température. Cela réduit également la qualité de l'énergie et conduit ainsi à une panne du système.

Ces problèmes ont causé une grande anxiété et une grande perte pour la compagnie ferroviaire, l'accent a donc été mis sur une recherche scientifique intense sur ces problèmes. Les scientifiques y sont parvenus dans ce domaine de nombreuses méthodes et suggestions pour résoudre les problèmes combinatoires. Basée sur des recherches antérieures [116-120], cette étude se concentre principalement sur l'examen de la combinatoire présente dans le système ERS, ainsi que sur sa modélisation.

De plus, cette section donne un aperçu du système étudié et détaille la modélisation de ses éléments constitutifs.

4.2. Description du système

Le système ERS se compose de plusieurs composants de base séparés en plusieurs parties principales. La première partie est la section du réseau électrique ou réseau d'alimentation, la deuxième partie est une sous-station composée d'un transformateur triphasé connecté à un redresseur. La caténaire de 750 volts est considérée comme la troisième section.

La dernière section est la charge (tramway) qui contient des onduleurs à commande double utilisant la modulation de largeur d'impulsion (PWM) qui sont connectés à deux moteurs asynchrones comme illustré dans la (Figure 4.1).



4.1 Le schéma synoptique du système proposé.

4.3. Modèle mathématique du système ERS

4.3.1. Modélisation du réseau d'alimentation

Les équations mathématiques utilisées pour décrire le système d'alimentation électrique triphasé (réseau triphasé) comprennent les équations de base des tensions et des courants de phase, ainsi que les équations de puissance. Voici les équations principales pour le système d'alimentation triphasé équilibré [121] :

• Tensions de phase :

Les tensions de phase dans un système d'alimentation électrique triphasé équilibré sont généralement représentées par une fonction sinusoïdale. Les équations pour les tensions de phase V_a , V_b et V_c en fonction du temps t sont les suivantes :

$$\begin{cases}
Va = V_m \sin(\omega t) \\
Vb = V_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\
Vc = V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})
\end{cases}$$
(4.1)

Où :

 V_{max} : est la valeur maximale de la tension de phase (amplitude) ;

ωt: est la fréquence angulaire du système (en rad/s) ;

- *t* : est le temps (en secondes) ;
- Courant de phase :

Courant de phase de manière similaire aux tensions de phase, les courants de phase I_a , I_b et I_c dans un système d'alimentation triphasé équilibré peuvent être décrit par des fonctions sinusoïdales :

$$\begin{cases}
I_{an} = I_m \sin(\omega t) \\
I_{bn} = I_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\
I_{cn} = I_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})
\end{cases}$$
(4.2)

 I_{max} : est la valeur maximale du courant de phase (amplitude) ;

• Relations de tension ligne à ligne et ligne à neutre :

Dans un système d'alimentation triphasé équilibré, les tensions ligne à ligne (V_{LL}) et les tensions ligne à neutre (V_{LN}) sont liées aux tensions de phase V_a , V_b et V_c à la manière suivante :

$$V_{LL} = \sqrt{3}. V_{max} \tag{4.3}$$

$$V_{LN} = V_{max} \tag{4.4}$$

4.3.2. Modélisation des transformateurs de sous-station

Les transformateurs couramment utilisés dans les réseaux d'alimentation électrique des tramways ou des métros sont chargés de convertir les tensions entre les niveaux haute tension alternative (HTA) et basse tension alternative (BTB) [122].

Parmi les modèles les plus répandus, on retrouve les transformateurs triphasés classiques de type Dyn, ainsi que les transformateurs dotés de deux enroulements secondaires triphasés, connus sous le nom de Ddyn.



Transformateur Dyn de la sous-station de la ligne
de la Rochelle

20 kV / 590 V - 50 Hz S = 1 MVA, Ucc = 7 %



Transformateur Ddyn du groupe TR1 de Valenciennes

20 kV / 2x590 V - 50 Hz S = 5,3 MVA, Ucc = 6 %

4.3.2.1. Matrices primitives

Deux niveaux d'observation peuvent être utilisés pour analyser un transformateur [122] :

- L'observation structurelle : Cela implique une analyse détaillée des composants internes du transformateur, tels que les enroulements et les matériaux magnétiques, ainsi que la modélisation des équations liant les tensions et les courants.
- L'observation globale : Cela consiste à examiner le transformateur dans son ensemble, en évaluant ses performances globales et son comportement dans le réseau électrique, sans nécessairement entrer dans les détails de sa structure interne.

La matrice inductance primitive associée est exprimée par l'équation 1 :

$$[Z_{\text{Primitive}}] = \begin{bmatrix} Zp & a & a & Zm & b & b \\ a & Zp & a & b & Zm & b \\ a & a & Zp & b & b & Zm \\ Zm & b & b & Zs & c & c \\ b & Zm & b & c & Zs & c \\ b & b & Zm & c & c & Zs \end{bmatrix}$$
(4.5)

Zp, Zs et Zm sont les inductances propres des enroulements primaires et secondaires ainsi que la mutuelle entre ces enroulements. Les paramètres a, b et c représentent les mutuelles entre les différentes combinaisons d'enroulements primaires et secondaires.

La matrice d'inductance primitive Z _{Primitive} lie ainsi les tensions aux bornes des enroulements aux courants les traversant :

$$[V_i] = \left[Z_{\Pr_{\text{r initive}}} \right] \cdot [I_i]$$
(4.6)

Le rapport de transformation m est défini tel que :

$$m = \frac{U_s}{U_p} = \frac{I_p}{I_s} \tag{4.7}$$

Ainsi, le rapport des réactances vues du côté primaire et du côté secondaire peut être exprimé comme suit :

$$m^2 = \frac{x_s}{x_p} \tag{4.8}$$

La réactance équivalente du transformateur, lorsqu'elle est observée depuis le côté primaire, se décompose en deux parties :

$$X_p = X_{\text{Réseau amont}} + X_{\text{Transformateur}}$$
(4.9)

Avec :

$$X_{\text{Réseau amont}} = \frac{U_p^2}{P_{cc}}$$
(4.10)

$$X_{\text{Transformateur}} = u_{cc} \cdot \frac{u_p^2}{s}$$
(4.11)

Le tableau suivant présente les grandeurs utilisées pour la modélisation du réseau amont et du transformateur

4.1 Les Grandeurs utilisées	pour la modélisation du réseau	amont et du transformateur
		./

Grandeur	Unité	Description
т	-	Rapport de transformation
U_p	V	Tension composée, primaire du transformateur
U_s	V	Tension composée, secondaire du transformateur
X_p	Ω	Réactance équivalente du transformateur vue du primaire
X_s	Ω	Réactance équivalente du transformateur vue du secondaire
L_p	Н	Inductance équivalente du transformateur vue du primaire
L_s	Н	Inductance équivalente du transformateur vue du secondaire

4.3.3. Sous-station de traction :

La (Figure 4.2) présente le schéma équivalent de la sous-station de traction



4.2 Sous-station de traction.

Le courant fourni par la sous-station a acheminé le long des caténaires jusqu'à son point d'utilisation, qui est généralement la locomotive. Une fois capté par le pantographe, le courant est transformé à bord de la locomotive et alimente les moteurs de traction. La caténaire est caractérisée par son impédance linéaire que z_l , ainsi que par l'argument de cette impédance (δ), et la longueur l entre la sous-station et le point de connexion des équipements. Ainsi [123] :

$$R_{\rm cat} = Z_l \cos(\delta) \cdot l \tag{4.12}$$

$$L_{\rm cat} = \frac{Z_l}{\omega_0} \sin(\delta) \cdot l \tag{4.13}$$



4.3 Modélisation de la caténaire.

4.3.4. Modélisation de machine asynchrone

La machine asynchrone est caractérisée par ses grandes capacités, mais elle rencontre de nombreuses difficultés pour ajuster sa vitesse, ce qui rend la modélisation de la machine une étape très importante pour développer sa technologie de contrôle. Le modèle AM est donné par les équations suivantes (IV14) :

$$\begin{cases} V_{sa}(t) = R_{s}i_{sa}(t) + \frac{d\varphi_{sa}(t)}{dt} \\ V_{sb}(t) = R_{s}i_{sb}(t) + \frac{d\varphi_{sb}(t)}{dt} \\ V_{sc}(t) = R_{s}i_{sc}(t) + \frac{d\varphi_{sc}(t)}{dt} \end{cases} \begin{cases} V_{ra}(t) = R_{r}i_{ra}(t) + \frac{d\varphi_{ra}(t)}{dt} \\ V_{rb}(t) = R_{r}i_{rb}(t) + \frac{d\varphi_{rb}(t)}{dt} \\ V_{rc}(t) = R_{r}i_{rc}(t) + \frac{d\varphi_{rc}(t)}{dt} \end{cases}$$
(4.14)

Le modèle mécanique de la machine peut être exprimé par l'expression suivante présentée dans l'équation (4.15).

$$T_{em} = T_r + f\Omega + J\frac{d\Omega}{dt}$$
(4.15)

où :

f : coefficient de frottement de la machine.

J: moment d'inertie.

Tem : couple électromagnétique.

 Ω : vitesse électrique du rotor.

Les flux dans le stator et le rotor peuvent également être modélisés, comme le montrent les équations suivantes.

$$[\varphi_s] = [l_{ss}] \cdot [I_s] + [l_{sr}] \cdot [I_r]$$
(4.16)

$$[\varphi_s] = [l_{rs}] \cdot [I_s] + [l_{rr}] \cdot [I_r]$$
(4.17)

Les matrices d'inductance du stator [Ls] et du rotor [Lr] sont données par l'équation (4.18):

$$[l_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & \mathcal{M}_s & \mathcal{M}_s \\ \mathcal{M}_s & l_s & \mathcal{M}_s \\ \mathcal{M}_s & \mathcal{M}_s & l_s \end{bmatrix} \qquad [l_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & \mathcal{M}_r & \mathcal{M}_r \\ \mathcal{M}_r & l_r & \mathcal{M}_r \\ \mathcal{M}_r & \mathcal{M}_r & l_r \end{bmatrix}$$
(4.18)

La mutualité d'inductance rotor-stator est représentée par [Ms], et [lsr] ainsi que [lrs] représentent la matrice d'inductance mutuelle entre les parties rotor et stator d'une machine asynchrone, comme indiqué dans l'équation suivante :

$$[l_{sr}] = [l_{rs}]^{T} = [\mathcal{M}_{sr}] \begin{bmatrix} \cos\varphi' & \cos(\varphi' + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\varphi' - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\varphi' - \frac{2\pi}{3}) & \cos\pi & \cos(\varphi' + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\varphi' + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\varphi' - \frac{2\pi}{3}) & \cos\pi \end{bmatrix}$$
(4.19)

 $[\mathcal{M}_{sr}]$: l'inductance mutuelle entre le stator et le rotor

Le mode électrique est déterminé par l'équation suivante :

$$\varphi' = (p\varphi)$$

(4.20)

 $\boldsymbol{\varphi}$ ': position réelle du rotor;

 $\boldsymbol{\varphi}$: position électrique du rotor;

4.4. Résultats et discussion

Afin d'évaluer pleinement l'impact de la charge sur le système ERS et d'analyser en détail les harmoniques du système, nous avons mené des simulations en utilisant le logiciel Matlab. Cette étude a été conduite en trois phases, correspondant à des niveaux croissants de charge. Dans un premier temps, un seul tramway a été pris en compte, suivi de deux tramways, puis finalement trois tramways.

Nous avons comparé les résultats des courants et des tensions pour ces trois configurations différentes du réseau. Les paramètres du système électrique ferroviaire (ERS) sont répertoriés dans le tableau 4.2, fournissant ainsi une base de référence pour notre analyse.

4.2 Paramètres du système

Parameters	Valeurs
Tension et fréquence du réseau	Vs = 25,000 V, fs = 50 Hz
Transformateur de traction	k = 25,000/1000 V
Fréquence de commutation	fsw = 700 Hz
dc-link	Vdc = 750 V



4.5 Tension du réseau du deux tramway.



4.6 Tension du réseau de trois tramways.

Selon les (figures 4.4, 4.5 et 4.6), on remarque une augmentation des harmoniques avec l'augmentation de la charge, où le taux de distorsion est très faible dans la (Figure 4.4) par rapport les (figures 4.5 et 4.6).

Il est intéressant de noter que la distorsion harmonique croît de manière significative à mesure que la charge augmente, ce qui est particulièrement visible lors de la comparaison entre les trois courbes. La (figure 4.4) montre une distorsion minimale, indiquant une réponse relativement stable du système à une charge légère, tandis que les (figures 4.5 et 4.6) présentent une distorsion plus élevée, suggérant une réaction plus prononcée du système à des charges plus importantes.

Ces observations soulignent l'importance de comprendre l'impact de la charge sur les caractéristiques harmoniques du système, ce qui peut avoir des implications significatives pour la stabilité et la fiabilité globale du système électrique ferroviaire. Des analyses plus approfondies seront nécessaires pour déterminer les seuils de charge optimaux et mettre en œuvre des mesures appropriées pour atténuer les effets néfastes des harmoniques sur le réseau.

4.4.2. Valeur de THD

Charge	THD		
Charge	IR	VR	
Un train	25.84	10.48	
Deux trains	30.28	15.77	
Trois trains	31.90	19.27	

4.3 Résultats du réseau FFT des harmoniques

Après avoir étudié la FFT, il est clairement évident que les valeurs indiquées dans le tableau démontrent une augmentation du taux de THD avec l'augmentation du courant et de la tension, où sa valeur est estimée à 10,48 % et 25,84 % respectivement dans le cas d'un seul tramway. Dans le cas de deux tramways, le taux est estimé à 15,77 % et 30,28 % respectivement.

Pour le cas de trois tramways, le taux est estimé à 19,27 % et 31,90 %, respectivement. Les harmoniques identifiées sont 3, 5 et 7, ainsi que des harmoniques supplémentaires.

Sur cette base, on peut remarquer que les harmoniques et les résonances apparaissent dans le système ERS avec une intensité de charge plus élevée. Il est crucial d'approfondir cette analyse pour comprendre pleinement les implications de ces résultats et développer des stratégies d'atténuation efficaces pour maintenir la stabilité et la fiabilité du système électrique ferroviaire.

Partie II : Suppression des harmoniques dans un ferroviaire à grande vitesse.

4.6. Introduction

Le système d'alimentation électrique de traction ferroviaire (TPSS) représente l'épine dorsale des systèmes de transport ferroviaire modernes, fournissant l'énergie nécessaire pour alimenter les trains électriques. Cependant, malgré ses avantages, le TPSS est confronté à grand défis et des problèmes, notamment celui de la résonance harmonique à haute fréquence.

La résonance harmonique à haute fréquence est un phénomène préoccupant, en particulier dans le contexte des trains à grande vitesse équipés de systèmes d'entraînement

AC-DC-AC. Ce problème survient lorsque les harmoniques générées par les convertisseurs AC-DC de traction du côté du réseau des trains coïncident avec la fréquence naturelle de résonance du TPSS.

Cette résonance peut entraîner des perturbations indésirables dans le système d'alimentation électrique, pouvant aller jusqu'à des pannes de courant ou des dommages aux équipements. Pour résoudre ce problème, la recherche se concentre sur le développement de solutions novatrices visant à atténuer la résonance harmonique à haute fréquence tout en améliorant la qualité de l'énergie fournie aux trains.

Cela est réalisé en intégrant un convertisseur à modulation de largeur d'impulsion du côté du réseau avec une configuration monophasée et en incorporant un filtre LCL. Les convertisseurs PWM du côté du réseau offrent plusieurs avantages, notamment une meilleure compatibilité avec les systèmes de traction modernes, une efficacité énergétique accrue et une réduction des perturbations électromagnétiques.

En incorporant des filtres LCL, ces convertisseurs permettent de filtrer les harmoniques indésirables, réduisant ainsi les risques de résonance et améliorant la qualité de l'énergie fournie aux trains. Pour optimiser le fonctionnement de ces systèmes, une attention particulière est l'efficacité du système. Dans cette optique, l'utilisation de contrôleurs à logique floue (FLC) se révèle être une solution prometteuse.

Les FLC offrent une flexibilité et une adaptabilité supérieures par rapport aux contrôleurs conventionnels tels que les régulateurs proportionnels-intégrateurs (PI). Leur capacité à traiter les systèmes non linéaires et à s'adapter aux variations dynamiques du système en fait un choix judicieux pour garantir un contrôle précis et efficace de la puissance.

Un convertisseur basé sur un filtre LCL du côté du réseau a été méticuleusement conçu et rigoureusement simulé en utilisant la plate-forme MATLAB/Simulink. L'inclusion d'un FLC avancé dans le système a introduit une approche novatrice des stratégies de contrôle, surpassant le contrôleur PI traditionnel.

Grâce à une analyse comparative complète, les résultats de simulation ont mis en évidence l'efficacité remarquable de la solution proposée dans l'atténuation efficace de la résonance à haute fréquence au sein du TPSS.

Ce résultat souligne le potentiel du FLC comme mécanisme de contrôle sophistiqué pour améliorer les performances des systèmes dans les applications ferroviaires, démontrant sa supériorité par rapport aux méthodes de contrôle conventionnelles. En outre, cette étude

contribue à éclairer les approches innovantes pour optimiser le contrôle et l'efficacité des convertisseurs basés sur des filtres LCL du côté du réseau dans les systèmes de trains à grande vitesse.

4.7. Analyse de résonance harmonique

Dans les lignes ferroviaires à grande vitesse (LGV), les convertisseurs de traction AC-CC-AC utilisant la modulation de largeur d'impulsion (PWM) sont couramment utilisés dans les unités électriques [124].

L'objectif est d'améliorer la qualité de l'énergie et les performances dynamiques des systèmes électriques ferroviaires. Cependant, les harmoniques d'ordre élevé apparaissent fréquemment dans les réseaux électriques ferroviaires, entraînant le problème des résonances à haute fréquence [125,126].

Ces harmoniques peuvent causer divers problèmes, tels que des erreurs et des perturbations excessives, des surtensions de couple et des perturbations dans les systèmes de communication, compromettant ainsi les performances du réseau de traction [127].

Deux approches sont généralement envisagées pour résoudre le problème des harmoniques à haute fréquence dans les trains à grande vitesse : du point de vue du système électrique de traction ou de l'unité d'entraînement du train à grande vitesse (TGV). La recherche s'est principalement concentrée sur l'élimination des harmoniques du système de traction. De nombreux chercheurs utilisent des filtres passifs pour modifier l'impédance des harmoniques dans le système de traction [128]. Ces filtres comprennent des filtres capacitifs (C) ou des filtres inductance-capacité (LC).

L'approche du filtre passif est trop coûteuse pour les systèmes d'alimentation électrique de traction (TPSS) haute tension et haute puissance. Un filtre de type LCL, présentant de meilleures performances d'atténuation des harmoniques à haute fréquence que les filtres de type L classiques, a été utilisé dans le convertisseur de source de tension connecté au réseau pour améliorer la qualité de l'énergie.

Les filtres LCL ont été largement adoptés dans les convertisseurs connectés au réseau [129,130] et les redresseurs actifs en amont [131,132] pour réduire la sortie ou le courant d'entrée harmonique à haute fréquence dans les systèmes d'énergie renouvelable. Les procédures de conception détaillées pour un convertisseur monophasé avec un filtre LCL ont été discutées dans [133–134].

De plus, les filtres de type LCL produisent généralement des pics de résonance qui compromettent la stabilité du convertisseur de source de tension connecté au réseau, affectant négativement le bon fonctionnement des systèmes électriques ferroviaires. Par conséquent, la conception d'un contrôleur adapté au convertisseur monophasé de type LCL rencontre des défis significatifs.

Le contrôleur linéaire PI traditionnel est conventionnellement utilisé pour les convertisseurs côté ligne dans les chemins de fer à grande vitesse [135, 136]. Cependant, le réglage des paramètres PI dans la boucle de commande de tension ou de courant pose un défi, car des réglages incorrects des paramètres de contrôle peuvent entraîner des oscillations à basse fréquence dans les réseaux de traction. Pour surmonter cela, diverses méthodes de contrôle non linéaires avancées, telles que le Contrôle Prédictif de Modèle [137] et le Contrôle par Mode Glissant [138], ont été proposées, améliorant les performances dynamiques des systèmes. Cependant, la mise en œuvre pratique et le réglage des paramètres de ces contrôleurs posent problème en raison de nombreux paramètres inconnus, de structures complexes et de modèles mathématiques impliqués.

Le contrôle basé sur la logique floue s'est révélé efficace dans de nombreuses applications industrielles [139, 140], compte tenu de sa nature heuristique, de sa simplicité et de son efficacité pour les systèmes linéaires et non linéaires. Avec la connaissance d'un ensemble de variables linguistiques, il est possible de développer un contrôleur flou intelligent sans modèle mathématique détaillé du système. Cela permet non seulement de réduire le temps de calcul, mais aussi d'améliorer les caractéristiques de réponse transitoire du système [141, 142]. Cependant, concevoir un contrôleur flou efficace pour améliorer les performances de l'installation est une tâche complexe nécessitant de nombreuses procédures d'essai et d'erreur basées sur des simulations informatiques. Par conséquent, un contrôleur logique flou avec une structure simple a été proposé.

Les recherches antérieures sur les convertisseurs de ligne côté train à grande vitesse ont porté sur divers aspects de la conception du contrôleur, tels que les performances dynamiques, l'analyse de la stabilité et l'atténuation des harmoniques d'ordre élevé [143-147].

Un modèle de contrôle prédictif pour les redresseurs de traction côté ligne a été suggéré, montrant de meilleures performances dans la suppression des harmoniques d'ordre élevé que les contrôleurs PI classiques. Un contrôleur non linéaire avec rejet actif des perturbations a été conçu pour optimiser les caractéristiques de charge du redresseur de véhicule et réduire

les harmoniques. [148] a utilisé la fonction de transfert harmonique pour étudier la stabilité des fluctuations de tension oscillante et la performance du contrôleur [149].

La recherche a proposé un système de contrôle combinant le contrôle prédictif et l'observateur d'état étendu capable d'atténuer les oscillations de tension et de réduire les distorsions de courant à la fois côté train et côté réseau [150].

Certains chercheurs ont proposé un modèle de contrôle basé sur la passivité pour les redresseurs de traction afin d'améliorer les caractéristiques dynamiques et statiques [151]. Bien que ces méthodes analytiques aient montré certaines améliorations dans les performances du contrôleur, elles dépendent fortement du modèle mathématique exact et d'un grand nombre de paramètres inconnus qui sont souvent difficiles à identifier en pratique.

Malgré plusieurs défis associés à la conception de contrôleurs intelligents modernes, il est évident que les méthodes de contrôle existantes présentent des lacunes. En d'autres termes, elles peinent à éliminer les harmoniques à haute fréquence, à atteindre des performances système élevées et à ajuster les paramètres de contrôle.

Cela limitera les applications des convertisseurs de traction monophasés avec filtres LCL, entravant ainsi le progrès des systèmes électriques ferroviaires. Seules quelques tentatives ont été faites pour étudier l'efficacité d'un contrôleur basé sur la logique floue dans les applications de commande électrique [152, 153]. Spécifiquement, pour les convertisseurs de ligne côté train à grande vitesse, le contrôleur logique floue (FLC) élimine le besoin d'un modèle mathématique détaillé du système.

Cela offre également une ouverture physique claire de la base de contrôle dans la boucle fermée, contrairement à l'utilisation d'anneaux encombrants par d'autres, ce qui implique une élévation du calcul.

4.8. Topologie du système

Une configuration standard pour un système d'alimentation électrique de traction ferroviaire à grande vitesse est représentée visuellement dans la (Figure 4.7), offrant une représentation claire du système.

Dans ce diagramme, la tension d'utilité triphasée de 220 kV subit une transformation à la baisse à l'intérieur d'une sous-station électrique pour devenir deux alimentations monophasées de 27,5 kV.

Cette transformation est cruciale pour fournir de l'énergie au réseau alimenté par autotransformateur en parallèle grâce à un transformateur de traction de structure V/x.



4.7 Système typique d'alimentation électrique de traction dans un chemin de fer à grande vitesse.

La (Figure 4.8) illustre un diagramme simplifié qui montre la position du train électrique dans le système de réseau de traction, dans lequel :

Zss est l'impédance équivalente de la sous-station d'alimentation ;

i_T est le courant du train électrique ;

 l_1 est la séparation ou l'écart entre le train électrique et la sous-station ;

 l_2 est la distance entre le train électrique et l'extrémité de la section d'alimentation.



4.8 Le diagramme de localisation du train électrique dans le système de réseau de traction.

Ces diagrammes intègres divers composants tels que des câbles de communication, des alimentations, des câbles de protection, des rails et des câbles de mise à la terre intégrés. La méthodologie utilisée pour créer ce diagramme a été décrite dans [154].

Dans cette représentation, la charge électrique du train est conceptuellement assimilée à une source de courant contenant des harmoniques. En utilisant le modèle de circuit équivalent π pour les lignes de transmission multi-conducteurs, la (Figure 4.9) représente le réseau d'alimentation de traction, dans lequel : $Z_{T'1}$ et $Y_{T'1}$ sont l'impédance et l'admittance du train vers la sous-station ; $Z_{T'2}$ et $Y_{T'2}$ sont l'impédance et l'admittance vers la terminaison du segment d'alimentation. Les expressions de ces valeurs sont :

$$\begin{cases} Z_{T'1} = \frac{Z_0(\cos\gamma l_1 - 1)}{\sinh\gamma l_1}, Y_{T'1} = \frac{\sin\gamma l_1}{Z_0} \\ Z_{T'2} = \frac{Z_0(\cos\gamma l_2 - 1)}{\sinh\gamma l_2}, Y_{T'2} = \frac{\sin\gamma l_2}{Z_0} \end{cases}$$
(4.21)

Dans lesquelles γ et Z₀ représentent respectivement la constante de propagation par unité de longueur et l'impédance caractéristique de la ligne de contact. Ces valeurs peuvent être décrites mathématiquement comme suit :

$$\begin{cases} Z_0 = \sqrt{Z'/Y'} \\ \gamma = \sqrt{Z'Y'} \end{cases}$$
(4.22)

Où Z' et Y' illustrent respectivement l'impédance et l'admittance par unité de longueur pour la ligne de contact.



4.9 Représentation du réseau de traction équivalent utilisant la topologie d'un circuit π .

Lorsqu'il est vu depuis le système électrique du train à l'intérieur du réseau de traction, la formulation de l'impédance d'entrée parallèle (Zpa) pour le réseau de traction peut être exprimée comme suit :

$$Z_{Pa} = \frac{Z_0 \cos\gamma(l-l_1)(Z_{SS}\cos\gamma l_1 + Z_0\sin\gamma l_1)}{Z_{SS}\sin\gamma l + Z_0\cos\gamma l}$$
(4.23)

L'étendue totale de la ligne de contact, désignée par l (somme de l_1 et l_2), influence la résonance en parallèle dans le réseau de traction. Le système présente une résonance en parallèle lorsque le dénominateur dans (4.23) devient 0, entraînant l'impédance maximale (Z_{pa}). La condition de résonance est exprimée comme suit :

$$Z_{ss}\sin\gamma l + Z_0\cos\gamma l = 0 \tag{4.24}$$

Étant donné que γ l est significativement inférieur à 1, il est valide d'approximer tan (γ l) comme \approx l, ce qui conduit à la simplification comme suit :

$$j\omega L_{ss} = \frac{-1}{j\omega c_c l} = \frac{-1}{j\omega c'},\tag{4.25}$$

Où L_{ss} est l'inductance équivalente interne de la sous-station électrique d'alimentation $(Z_{ss}=j\omega L_{ss})$; Cc est la capacité distribuée par unité d'étendue de la ligne de contact ; C'est la capacité globale le long de la ligne de contact. La fréquence de résonance en parallèle f_{pr} est :

$$f_{pr} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{ss}C}}.$$
(4.26)

La résonance dans le réseau d'alimentation de traction est une résonance en parallèle impliquant l'inductance équivalente de la sous-station électrique d'alimentation et la capacité distribuée le long de la ligne de transmission multi-conducteurs. La fréquence de résonance est déterminée par les propriétés inhérentes du réseau de traction et reste inchangée par l'emplacement du train électrique [155].

4.9. L'analyse du convertisseur de type LCL

La (Figure 4.10) illustre l'unité équivalente à l'entraînement de traction pour une locomotive à grande vitesse, présentant une topologie de convertisseur de type LCL monophasé du côté réseau.

Dans chaque unité de puissance, les convertisseurs côté ligne se connectent au bus continu et intègrent un filtre passif de type LCL. Le transformateur de traction est idéalisé ; Lg est l'inductance de fuite comparable du côté secondaire ; Cd est le condensateur du bus continu ; V_{dc} est la tension sur le bus continu ; RL est l'équivalent de charge pour le système d'entraînement onduleur-moteur de traction.



4.10 Circuit équivalent des redresseurs de type LCL du côté ligne monophasé dans chaque unité de propulsion d'un train à grande vitesse.

4.9.1. Conception et modélisation des filtres LCL et de leurs paramètres

L'inductance du côté du convertisseur L_s est généralement déterminée en fonction de l'ondulation maximale acceptable du courant du convertisseur (Δi_{max}), généralement comprise entre 30 et 40 % du niveau de courant nominal. Par conséquent, la condition de contrainte pour l'inductance L_s peut être exprimée comme suit :

$$L_s \ge \frac{u_{dc}}{8f_s \Delta i_{max}} \tag{4.27}$$

où f_s est la fréquence de commutation du convertisseur qui guide la sélection de la capacité du filtre C_f . Équilibrer la suppression des harmoniques à haute fréquence et gérer la puissance réactive à la fréquence primaire est crucial [156]. Pour répondre à la puissance réactive admissible, la capacité C_f peut être calculée en utilisant (4.28), notamment à la fréquence primaire :

$$C_f \le \beta \frac{P_n}{2\pi f_n U_s^2} \tag{4.28}$$

Où P_n est la puissance spécifiée du convertisseur ; β est le coefficient contraint à être inférieur à 5 % ; f_n est la fréquence primaire de la tension du réseau.

L_a conception de l'inductance côté réseau L implique de tirer parti de la proportion de courant d'ordre élevé du côté convertisseur par rapport à celui du côté réseau.

En raison de la modulation de largeur d'impulsion unipolaire dans un convertisseur monophasé, l'accent est mis sur les harmoniques d'ordre élevé autour du double de la fréquence de commutation.

En supposant qu'il n'y a pas de composantes hautes fréquences dans la tension du réseau, le filtre LCL à double fréquence de commutation est traité, comme illustré dans la (Figure 4.11).



4.11 Modèle du filtre LCL.

Dans la (Figure 4.11), les fonctions de transfert décrivant la relation entre uab et iL, ainsi que ig, peuvent être exprimées comme suit :

$$\begin{cases} \frac{u_{ab}(k)}{i_L(k)} = \frac{j\omega_k L_s + j\omega_k L_g C_f - j\omega_k^3 L_f L_g C_f}{1 - j\omega_k^2 L_g C_f} \\ \frac{u_{ab}(k)}{i_g(k)} = j\omega_k L_s - j\omega_k L_g - j\omega_k^3 L_s L_g C_f \end{cases}$$

$$\tag{4.29}$$

Où ω_k est la fréquence angulaire du double de la fréquence de commutation.

Par conséquent, le calcul du rapport entre les composantes harmoniques sur le courant côté réseau et le courant harmonique d'ordre élevé côté onduleur peut être déterminé comme suit :

$$\sigma = \frac{i_g(k)}{i_L(k)} = \frac{1}{|1 - \omega_k^2 L_g C_f|}$$
(4.30)

Où l'amplitude d'ondulation permise dans le courant du convertisseur est définie entre 30 % et 40 % du courant nominal, en choisissant σ à une magnitude de 15 % garantit une fluctuation maximale dans le courant côté réseau d'environ 5 %. Par conséquent, la plage potentielle pour Lg peut être déduite comme suit :

$$L_g > \frac{23}{12\omega_k^2 C_f} \tag{4.31}$$

En conclusion, les valeurs de l'inductance et du condensateur doivent être recalibrées afin de correspondre à la plage de paramètres de conception permis pour la fréquence de résonance f_r . Cette étude garantit que la fréquence de résonance f_r du filtre LCL est confinée dans la plage spécifiée :

$$5f_n < f_r < f_s \tag{4.32}$$

Les paramètres du filtre sont spécifiés dans le Tableau 4.4

4.4	Paran	nètres	du	filtre	LCL.

Paramètres	Valeurs
Lg	1.3mH
Ls	1.6mH
C _f	125 μF

4.11. Diagramme structurel de système de contrôle

Les (Figures 4.12 et 4.14) représentent les schémas de contrôle utilisant un régulateur PI et un contrôleur FLC, respectivement. Le Tableau 4.5 présente les valeurs des paramètres du convertisseur de traction monophasé avec filtre LCL.

4.	5	Par	ramètres	du	système.
					<i></i>

Parameters	Value
Tension de ligne de contact V_g ,	1550 V
Tension aux bornes du DC-link V _{dc-link}	3000 V
Condensateur du DC-link Cd,	3000 µF
Fréquence de commutation f_s ,	550 Hz
Fréquence primaire <i>f</i> ,	50 Hz
Résistance de charge R_L ,	20 Ω

4.11.1. Diagramme de contrôle avec régulateur PI

Dans la (Figure 4.12) est représenté le schéma de contrôle du redresseur LCL basé sur un régulateur PI, dans lequel Vdc est la tension de sortie à travers le bus continu, où le bloc initial représente Vref.

Le régulateur calcule la différence entre les tensions de référence et réelles, formant l'entrée pour l'unité de contrôle P1.

Le courant de sortie du régulateur PI, combiné avec $cos(\omega t)$ du bloc de boucles à verrouillage de phase (PLL), sert d'entrée pour le 2ème bloc.

Le 3ème bloc représente l'erreur résultant de la comparaison des deux valeurs précédentes.



4.12 Schéma de contrôle du redresseur LCL basé sur un contrôleur PI.

La valeur de sortie (PR) de l'unité de contrôle proportionnel-résonant (PR) devient la référence de tension Vref, ajoutée à Vgrid.

Cette valeur résultante est utilisée dans la génération de la MLI pour les signaux de commande dans le redresseur à IGBT électronique de puissance avec un filtre LCL, comme illustré dans l'équation mathématique résumée pour le système est :

$$I_{ref} = K_p (V_{dcref} - V_{dc}) + K_I \int (V_{dcref} - V_{dc}) dt.$$
(4.33)

4.11.1.1. Phase Lock Loop

La boucle à verrouillage de phase (PLL), représentée dans la (Figure 4.13), est un système de contrôle qui génère un signal de sortie dont la phase est connectée au filtre passebas d'entrée.



4.13. Montage du bloc PLL.

Par conséquent, la fonction de transfert du filtre passe-bas est donnée par l'équation (4.34).

$$T_f = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \tag{4.34}$$

Où, ω_c : fréquence de coin

Sachant que $s = j\omega$ et l'équation (4.35) devient :

$$T_f = \frac{\omega_c}{j\omega + \omega_c} \tag{4.35}$$

Comme T_f est inférieur à $\tan^{-1} \frac{\omega}{\omega_c}$ cas étant donné l'équation (4.36) :

$$T_f = \frac{\omega_c}{\sqrt{\omega^2 + \omega_c^2}} < \tan^{-1} \frac{\omega}{\omega_c}$$
(4.36)

Pour $\omega = \omega_c$ l'équation (4.37) comme suit :

$$T_f = \frac{\omega}{\sqrt{\omega^2 + \omega^2}} < -\tan^{-1}\frac{\omega}{\omega_c}$$
(4.37)

$$T_f = \frac{1}{\sqrt{2}} < -45 \tag{4.38}$$

$$T_f = \frac{1}{\sqrt{2}} * \frac{1}{\sqrt{2}} < -45 - 45) \tag{4.39}$$

$$T_f = \frac{1}{2} < -90 \tag{4.40}$$

4.11.1.2. Contrôleur de résonance proportionnel

Le contrôleur Proportionnel Résonant (PR) est capable de conformation de l'erreur courante dans un mode stationnaire. La structure d'un contrôleur PR pratique est illustrée à la (figure 4.14).



4.14 Structure pratique du régulateur proportionnel.

La fonction de transfert est la suivante :

$$F_{PR}(s) = K_p + \frac{\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + h^2 \omega_1^2}$$
(4.54)

Lorsque ω_1 est la fréquence angulaire fondamentale, Kp et KI sont respectivement les coefficients proportionnel et intégral du contrôleur PR. ω c est la fréquence de coupure du contrôleur PR et h est l'ordre de l'harmonique, i(s) et U_{ref} (s). Sont les opérateurs de Laplac du signal d'erreur de rétroaction et du signal de sortie, respectivement

$$U_{ref} = K_p \epsilon_i + \left(K_i \int \epsilon_i dt - K_{PI} \cdot K_I \iint \epsilon_i dt \right)$$
(4.55)

Ou, ϵ_i is $i_{ref} - i_s$

4.11.2. Diagramme de contrôle avec FLC

Un système de contrôle utilisant la logique floue, connu sous le nom de système de contrôle flou, utilise la logique floue, un cadre mathématique qui évalue les valeurs d'entrée analogiques à l'aide de variables logiques avec des valeurs continues entre 0 et 1.

Cela contraste avec la logique classique ou numérique, qui fonctionne sur des valeurs discrètes de 1 ou 0 (vrai ou faux, respectivement).

Le contrôleur flou comprend trois étapes principales. La première est la fuzzification, qui utilise des fonctions d'appartenance prédéfinies pour traiter et convertir les entrées en représentations floues. Ces entrées fuzzifiées sont ensuite utilisées dans le système d'inférence basé sur des règles, la deuxième étape, qui utilise des règles définies linguistiquement pour générer une réponse floue. Le dernier processus est la défuzzification, où la réponse floue est convertie en une sortie précise.

La conception d'un contrôleur flou peut être réalisée à l'aide de divers outils informatiques. Dans ce contexte, nous utiliserons la Boîte à outils de logique floue dans MATLAB / Simulink, comme le montre la (figure 4.15).



4.15 Schéma de contrôle du redresseur LCL basé sur un contrôleur FLC.

Le moteur d'inférence joue un rôle crucial dans les opérations de logique floue, en reliant les fonctions d'appartenance aux règles floues pour produire la sortie floue.

Cela est réalisé grâce à l'application de la méthode de Mamdan1.

La défuzzification, en revanche, sert de processus inverse de la fuzzification, impliquant la transformation d'une quantité floue en une valeur précise. Dans notre application, la méthode du centre de gravité a été utilisée pour calculer la sortie du Contrôleur Logique Floue (FLC), spécifiquement le courant de référence décrit dans le Tableau 4.6.

$\downarrow de/e \rightarrow$	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	Z
NS	NB	NB	NS	Z	PS
Z	NB	NS	Z	PS	PB
PS	NS	Ζ	PS	PB	PB
PB	Ζ	PS	PB	PB	PB

4.6 Base de règles du contrôleur FLC.

Le moteur d'inférence joue un rôle crucial en logique floue, en reliant les fonctions d'appartenance et les règles floues pour générer la sortie floue en utilisant la méthode de Mamdan1.

La défuzzification est le processus inverse, transformant une quantité floue en une valeur précise. Dans cette application, la méthode du centre de gravité a déterminé la sortie du FLC, en particulier la référence V, comme le montre la (Figure 4.16), illustrant la surface des règles floues.



4.16 Les formes d'onde simulées des tensions du bus continu.

4.11.2.1. Fonction d'adhésion (Membership Function)

La logique floue n'est pas une logique floue, mais une logique utilisée pour décrire le flou. Ce flou est mieux caractérisé par sa fonction d'appartenance.

En d'autres termes, nous pouvons dire que la fonction d'appartenance représente le degré de vérité dans la logique floue.



4.17 Fonctions d'appartenance du système flou.

Voici quelques points importants concernant la fonction d'appartenance :

- Les fonctions d'appartenance ont été introduites pour la première fois en 1965 par Lofti
 A. Zadeh dans son premier article de recherche "ensembles flous" ;
- Les fonctions d'appartenance caractérisent le flou (c'est-à-dire toutes les informations dans l'ensemble flou), que les éléments des ensembles flous soient discrets ou continus ;
- Les fonctions d'appartenance peuvent être définies comme une technique pour résoudre des problèmes pratiques par l'expérience plutôt que par la connaissance ;
- Les fonctions d'appartenance sont représentées sous forme graphique ;

• Les règles pour définir le flou sont également floues.

4.12. Résultats et comparaison

Les (figures 4.18 et 4.19) illustrent les formes d'onde simulées des tensions du bus continu (Vdc), en utilisant respectivement le régulateur PI et le FLC.

L'observation met en évidence que le FLC réduit les ondulations et les distorsions dans la tension du condensateur dans une certaine mesure, tout en réduisant le temps de stabilisation à une valeur de t = 0,1 s par rapport au régulateur PI, où le temps de stabilisation est plus élevé (t = 0,6 s), ce qui entrave les performances du système.



4.19 Les formes d'onde simulées des tensions du bus continu.

Ce résultat indique que le FLC apporte une amélioration significative en réduisant les fluctuations et les distorsions dans la tension du condensateur, contribuant à une réponse du système plus rapide et plus stable.

En comparaison, le régulateur PI présente une performance inférieure avec un temps de stabilisation plus long, ce qui pourrait compromettre les performances globales du système.

Ces résultats soulignent l'efficacité du FLC dans l'amélioration de la réponse dynamique et de la qualité de la tension à travers le bus continu dans le convertisseur considéré.

Les (figures 4.20 et 4.21) dévoilent les formes d'onde simulées de la tension Vg côté réseau lors du fonctionnement d'un redresseur LCL monophasé utilisant respectivement les régulateurs PI et FLC. L'examen de ces figures révèle une disparité significative dans les composantes harmoniques d'ordre élevé dans le redresseur LCL avec les deux régulateurs.

Il est clairement évident que sous la régulation par le régulateur PI, la tension Vg présente des composantes harmoniques d'ordre élevé plus prononcées par rapport à celles observées dans le redresseur LCL fonctionnant avec le FLC. Cette observation met en évidence la remarquable capacité du convertisseur LCL avec le FLC à atténuer significativement la résonance harmonique d'ordre élevé.

Il est crucial de noter que cette capacité accrue d'atténuation des harmoniques offre des avantages substantiels dans le contexte de la qualité de l'énergie électrique, contribuant ainsi à la stabilité du système d'alimentation électrique de traction. Ces résultats soulignent l'efficacité notable du FLC dans la réduction des harmoniques par rapport au régulateur PI, suggérant que l'adoption du FLC pourrait constituer une amélioration significative dans les applications de redresseur LCL, surtout lorsqu'il est crucial de supprimer efficacement la résonance harmonique d'ordre élevé.



4.20 Les formes d'onde simulées de la tension côté réseau Vg utilisant le régulateur PI.



4.21 Les formes d'onde simulées de la tension côté réseau Vg utilisant le régulateur *FLC*.

Les (figures 4.22 et 4.23) présentent les formes d'onde simulées du courant côté réseau Ig du convertisseur de type LCL avec les régulateurs PI et FLC, respectivement.

La capacité à éliminer les harmoniques à haute fréquence s'avère être un facteur crucial dans l'évaluation des filtres et des systèmes de contrôle. Après comparaison entre les (figures 4.22 et 4.23), on remarque que le courant côté réseau est déformé, notamment pendant la période de 0 à 0,2 s, avec des harmoniques plus élevées provenant du régulateur PI par rapport au FLC.



4.22 Les formes d'onde simulées du courant côté réseau (Ig) utilisant le régulateur PI.



4.23 Les formes d'onde simulées du courant côté réseau (Ig) utilisant le régulateur *FLC*.

Cette observation suggère que l'atténuation des harmoniques d'ordre faible fonctionne efficacement pour le FLC, et les harmoniques d'ordre faible n'ont pas d'impact significatif sur le courant côté réseau.

Cette conclusion est corroborée par les résultats obtenus à partir de l'analyse de la transformée de Fourier rapide (FFT).

Un examen des résultats met en évidence la performance supérieure du FLC en termes de réduction des harmoniques et de maintien de la forme d'onde du courant côté réseau, notamment pendant la période critique de 0 à 0,2 s.

Ces observations indiquent que le choix du FLC pourrait représenter une amélioration significative dans les applications de convertisseurs de type LCL, démontrant une efficacité accrue dans la suppression des distorsions harmoniques. L'algorithme FFT est utilisé pour évaluer l'ordre harmonique dans le courant côté réseau et le THD de ce courant dans un convertisseur LCL monophasé utilisant les régulateurs PI et FLC. Les mesures de THD sont comparées pour les régulateurs PI et FLC, comme illustré dans les (figures 4.24 et 4.25).



4.24 Le spectre harmonique du courant côté réseau simulé utilisant le régulateur P1.



4.25 Le spectre harmonique du courant côté réseau simulé utilisant le régulateur FLC.

La (Figure 4.24) présente les résultats de mesure du THD pour le régulateur PI, donnant une valeur de 4,6 %. En revanche, la (Figure 4.25) illustre les résultats correspondants pour le FLC, montrant une valeur notablement réduite de 0,21 %.

Ces valeurs se situent bien en dessous du seuil critique de 5 %, en conformité avec les normes harmoniques. Cette analyse démontre que le filtre LCL garantit une conformité satisfaisante aux normes harmoniques, en veillant à ce que le THD soit inférieur à 5 %.

Plus précisément, les résultats mettent en évidence l'efficacité accrue du FLC dans la suppression des harmoniques, notamment pour les sous-harmoniques de commutation à haute fréquence. Ces constatations soulignent l'idée que la mise en œuvre du FLC représente une amélioration significative pour le convertisseur LCL, garantissant notamment une réduction substantielle du THD.

4.13. Conclusions

Une investigation topologique et un modèle mathématique ont été entrepris pour le système d'alimentation électrique de traction et le circuit des redresseurs LCL monophasés côté ligne de chaque unité de puissance d'un train à grande vitesse.

Le système de contrôle vise à résoudre la résonance harmonique d'ordre élevé dans les systèmes de convertisseur de traction, en se concentrant particulièrement sur l'atténuation des harmoniques d'ordre élevé dans les redresseurs PWM LCL monophasés.

Lorsqu'ils sont guidés par un contrôleur logique floue (FLC), ces redresseurs éliminent efficacement les harmoniques d'ordre élevé dans les systèmes d'entraînement de traction de train. Cette approche, contrairement aux unités de contrôle conventionnelles avec un régulateur PI, évite efficacement de stimuler la résonance à haute fréquence.

La méthode proposée présente des caractéristiques remarquables telles qu'une robustesse accrue et une autonomie par rapport aux paramètres du système complexes.

La simplicité et l'efficacité du FLC le distinguent, adapté aussi bien aux systèmes linéaires que non linéaires. Sa mise en œuvre de contrôle intelligent ne nécessite pas de modèle de système complexe, réduisant le temps de calcul et améliorant la dynamique de réponse.

L'étude réalise une analyse comparative approfondie des performances de suppression des harmoniques dans le convertisseur LCL, comparant ses performances avec un régulateur PI traditionnel au FLC proposé.

Un examen analytique et une étude du THD soulignent l'efficacité du transformateur contrôlé par FLC, affirmant son rôle dans la garantie d'une performance dynamique de haute qualité dans les systèmes de traction.
Chapitre 5

Conclusion et perspective

Le secteur ferroviaire évolue pour devenir plus écologique, plus efficace sur le plan énergétique et moins coûteux. Les trains électriques remplacent progressivement ceux à moteur diesel, car ils réduisent fortement la pollution et les émissions de gaz à effet de serre, contribuant ainsi à protéger l'environnement pour les générations futures.

Cette recherche a analysé les défis techniques des systèmes électriques de traction, comme les perturbations dues aux harmoniques (oscillations électriques indésirables) et aux résonances (vibrations électriques amplifiées). Ces problèmes affectent la qualité de l'énergie et la fiabilité des réseaux ferroviaires. Pour résoudre ces défis, nous avons utilisé une nouvelle méthode basée sur l'intelligence artificielle, en remplaçant les régulateurs classiques (PI) par des contrôleurs logiques flous (FLC) combinés à un filtre appelé LCL.

Cette solution permet de mieux éliminer les perturbations électriques et d'éviter les résonances gênantes. Nos résultats montrent que cette approche réduit efficacement le THD (un indicateur des distorsions dans l'énergie) à un niveau conforme aux normes internationales, c'est-à-dire en dessous de 5 %. Cette méthode présente plusieurs avantages.

Le contrôleur logique flou est simple à utiliser, robuste et capable de s'adapter à différents types de systèmes, qu'ils soient linéaires ou non. Contrairement aux solutions traditionnelles, il ne nécessite pas de calculs complexes, ce qui accélère son application et améliore les performances des trains. Sur le plan économique, cette amélioration permet de réduire les pertes d'énergie et les coûts de maintenance, tout en augmentant la rentabilité des entreprises ferroviaires.

Cela montre que mieux gérer l'énergie des trains rend les opérations plus efficaces et compétitives.

Cette recherche propose une solution innovante et pratique pour améliorer les systèmes de traction électrique ferroviaire. Elle montre comment des technologies modernes, comme l'intelligence artificielle, peuvent réduire les problèmes techniques et les coûts, tout en renforçant l'efficacité et la durabilité des trains.

Cette avancée ouvre la voie à un avenir où les trains électriques joueront un rôle clé dans la réduction de la pollution et la transition vers un transport plus respectueux de l'environnement. Chapitre 6

Bibliographe

- pro Schiene, Allianz. "Umweltschonend mobil." Bahn, Auto, Flugzeug, Schiff im Umweltvergleich. Berlin: Allianz pro Schiene (2003).
- 2. MAY, S. "Privatbetrieb Nebenbahn." VERKEHR & UMWELT 14.3 (2000).
- Gunselmann, Walter. "Technologies for increased energy efficiency in railway systems." 2005 European conference on power electronics and applications. IEEE, 2005.
- 4. Lehmann, Helmut, and Andreas Hauser. "Mehrverbrauch im Eisenbahnbetrieb: Ursachen und Ermittlung." ZEV rail Glasers Annalen 126.4 (2002): 164-173.
- Tian, Zhongbei, et al. "SmartDrive: Traction energy optimization and applications in rail systems." IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 20.7 (2019): 2764-2773.
- Tian, Zhongbei, et al. "System energy optimisation strategies for metros with regeneration." Transportation Research Part C: Emerging Technologies 75 (2017): 120-135.
- 7. Tian, Zhongbei, et al. "Energy evaluation of the power network of a DC railway system with regenerating trains." IET Electrical Systems in Transportation 6.2 (2016): 41-49.
- 8. González-Gil, Arturo, et al. "A systems approach to reduce urban rail energy consumption." Energy Conversion and Management 80 (2014): 509-524.
- Hartland, D. "Heating the countryside or saving the kilowatt hours." IMechE Railway Division Seminar" Gaining traction in Energy Efficiency", London, UK. 2012.
- Takagi, Ryo. "Energy saving techniques for the power feeding network of electric railways." IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering 5.3 (2010): 312-316.
- Tomita, Masaru, et al. "Development of prototype DC superconducting cable for railway system." Physica C: Superconductivity and its applications 470 (2010): S1007-S1008.
- Kondo, Keiichiro. "Recent energy saving technologies on railway traction systems." IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering 5.3 (2010): 298-303.

- Kondo, Keiichiro. "Recent energy saving technologies on railway traction systems." IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering 5.3 (2010): 298-303.
- Peroutka, Zdenëk, et al. "New generation of trams with gearless wheel PMSM drives: From simple diagnostics to sensorless control." Proceedings of 14th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2010. IEEE, 2010.
- 15. Germishuizen, J., et al. "SyntegraTM-next generation traction drive system, total integration of traction, bogie and braking technology." International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006. SPEEDAM 2006.. IEEE, 2006.
- Koerner, Olaf, and Andreas Binder. "Feasibility of a group drive with two permanent magnet synchronous traction motors for commuter trains." EPE Journal 14.3 (2004): 32-37.
- Barcaro, Massimo, et al. "Design procedure of IPM motor drive for railway traction." 2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). IEEE, 2011.
- 18. Uzel, David, and Zdeněk Peroutka. "Control and design considerations for wheel mounted drive of tram: Interesting features offered by IPMSM technology." Proceedings of 14th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2010. IEEE, 2010.
- 19. Lin, Boqiang, and Zhili Du. "Can urban rail transit curb automobile energy consumption?." Energy Policy 105 (2017): 120-127.
- Chenchen, Zhang, et al. "Modeling and analysis of global energy consumption process of urban rail transit system based on Petri net." Journal of Rail Transport Planning & Management 21 (2022): 100293.
- Sandor, Judit, et al. "Smart and efficient energy solutions for railways-The" Railenergy" results." 9th World congress on railway research-WCRR. 2011.
- 22. Álvarez, Alberto García, and María del Pilar Martín Cañizares. Metodología de cálculo del consumo de energía de los trenes de viajeros y actuaciones en el diseño del material rodante para su reducción: Introducción; 1. Modelado del consumo de energía de los trenes de viajeros; 2. Cuantificación de los consumos por tipos de trenes y análisis de

sensibilidad a la variación de diversas variables; 3. Medidas para reducir el consumo de energía de los trenes. Fundación de los Ferrocarriles Españoles, 2012.

- 23. Carruthers, J. J., et al. "The application of a systematic approach to material selection for the lightweighting of metro vehicles." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit 223.5 (2009): 427-437.
- 24. Eickhoff, B., and R. Nowell. "Determining the benefit of train mass reduction." 9th world congress on railway research–WCRR. 2011.
- 25. Robinson, Mark, and Joe Carruthers. "Composites for lightweighting in mass transit applications." JEC Composites Magazine (2006).
- 26. Hudson, Craig W., Joe J. Carruthers, and A. Mark Robinson. "Multiple objective optimisation of composite sandwich structures for rail vehicle floor panels." Composite Structures 92.9 (2010): 2077-2082.
- 27. İsçan, Sercan, Ümit Ünver, and Taylan Güneş. "İstanbul kent içi elektrikli ulaşım sistemlerine yönelik enerji yönetim sistemi: cer tüketim performans takip sistemi öneri ve değerlendirmes1." Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 37.2 (2022): 889-906.
- 28. Yang, Xin, et al. "A survey on energy-efficient train operation for urban rail transit." IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 17.1 (2015): 2-13.
- 29. Goodall, R. M., and W. Kortüm. "Mechatronic developments for railway vehicles of the future." Control Engineering Practice 10.8 (2002): 887-898.
- 30. Popescu, Mihaela, and Alexandru Bitoleanu. "A review of the energy efficiency improvement in DC railway systems." Energies 12.6 (2019): 1092.
- 31. Anderson, Richard, Rory Maxwell, and Nigel G. Harris. "Maximizing the potential for metros to reduce energy consumption and deliver low-carbon transportation in cities." Delhi, Community of Metros (2009).
- 32. Su, Shuai, Tao Tang, and Yihui Wang. "Evaluation of strategies to reducing traction energy consumption of metro systems using an optimal train control simulation model." Energies 9.2 (2016): 105.
- 33. Liu, Rongfang Rachel, and Iakov M. Golovitcher. "Energy-efficient operation of rail vehicles." Transportation Research Part A: Policy and Practice 37.10 (2003): 917-932.

- 34. Jiaxin, Cheng, and Phil Howlett. "A note on the calculation of optimal strategies for the minimization of fuel consumption in the control of trains." IEEE Transactions on Automatic Control 38.11 (1993): 1730-1734.
- 35. Khmelnitsky, Eugene. "On an optimal control problem of train operation." IEEE transactions on automatic control 45.7 (2000): 1257-1266.
- 36. Su, Shuai, et al. "A subway train timetable optimization approach based on energyefficient operation strategy." IEEE transactions on intelligent transportation systems 14.2 (2013): 883-893.
- 37. Su, Shuai, et al. "Optimization of multitrain operations in a subway system." IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 15.2 (2013): 673-684.
- Hansen, Ingo Arne, ed. Railway timetable & traffic: analysis, modelling, simulation. Eurailpress, 2008.
- 39. Su, Shuai, et al. "Energy-efficient train control in urban rail transit systems." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit 229.4 (2015): 446-454.
- Gerster, Ch, and M. Meyer. "LCC based Evalutation of Traction Chain Systems for Multi-System Locomotives." EPE 2003, Toulouse, Conf. Proceedings CD. 2003.
- 41. WEIGEL, Wolf-Dieter. "Moderne Drehstromantriebstechnik: Stand und Perspektiven." ZEV rail Glasers Annalen 126 (2002): 112-125.
- 42. Allenbach, Jean-Marc, et al. Traction électrique. PPUR presses polytechniques, 2008.
- Debruyne, Marc. Apport de l'électronique de puissance pour la traction électrique. Ed. Techniques Ingénieur, 2010.
- 44. Transport Review, Vol. 27, No. June, pp. 25–31, 2001.technique de l'ingénieur, No. D3278, pp.1-18,2010
- Lacôte, François. "Alstom-Future trends in railway transportation." Japan Railway and Transport Review 42 (2005): 4-9.
- 46. Duffy, Michael C. Electric Railways: 1880-1990. No. 31. Iet, 2003.
- 47. Smith, Roderick A. "Railway Technology—The Last 50 Years and Future Prospects." Ratio 1950 (1998): 69-167.

- 48. Batista, Emmanuel. Nouvelles structures électroniques pour le transport électrique: impacts des nouvelles contraintes d'intégration sur les interférences électromagnétiques et moyens de prévision de la compatibilité électromagnétique. Diss. Toulouse 3, 2009.
- Lee, Eun-Kyu. "Traction technologies for railways in Korea." The 2010 International Power Electronics Conference-ECCE ASIA-. IEEE, 2010.
- 50. Koseki, Takafum1. "Technical trends of railway traction in the world." The 2010 International Power Electronics Conference-ECCE ASIA-. IEEE, 2010.
- Mermet-Guyennet, Michel. "New power technologies for traction drives." SPEEDAM 2010. IEEE, 2010.
- 52. Uzuka, Tetsuo. "Trends in high-speed railways and the implications on power electronics and power devices." 2011 IEEE 23rd International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs. IEEE, 2011.
- 53. Liu, Zhigang, et al. "Detection approach based on an improved faster RCNN for brace sleeve screws in high-speed railways." IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 69.7 (2019): 4395-4403.
- 54. Martin, Jérémy. Caractérisation en commutation douce d'IGBT 6, 5 kV pour l'application transformateur moyenne fréquence en traction ferroviaire. Diss. Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT, 2010.
- 55. Fabre, Joseph. Etude et mise en oeuvre de modules de puissance MOSFET SiC pour leurs futures utilisations dans des convertisseurs ferroviaires. Diss. Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT, 2013.
- 56. Dris, Mida. Application de l'intelligence artificielle à la répartition optimale des puissances dans les réseaux électriques. Diss. El Oued, Centre universitaire d'El Oued. Institut de Sciences et Technologie, 2010.
- 57. Eguiluz, Rosendo Peña. Commande algorithmique d'un système mono-onduleur bimachine asynchrone destiné à la traction ferroviaire. Diss. INP Toulouse, 2004.
- Bowes, S. R., and A. Midoun. "New PWM switching strategy for microprocessor controlled inverter drives." IEE Proceedings B (Electric Power Applications). Vol. 133. No. 4. IET Digital Library, 1986.
- 59. SABATE, Victor. "Traction électrique ferroviaire: Convertisseurs et moteurs." Techniques de l'ingénieur. Génie électrique 12.D5502 (1998): D5502-1.

- 60. Bastiani, Philippe. Stratégies de commande minimisant les pertes d'un ensemble convertisseur-machine alternative: application à la traction électrique. Diss. Lyon, INSA, 2001.
- 61. Boudjedaimi, Madjid, et al. "Commande d'un onduleur avec des approches neuromimétiques pour la compensation des courants harmoniques dans les réseaux électriques." International Conference on Electrical Engineering and its Applications (ICEEA'2008). 2008.
- 62. Said, Ait Al1. Simulation par power system de matlab d'une chaine de traction electrique ferroviaire asynchrone. Diss. Université Mouloud Mammeri, 2010.
- 63. Pena Eguiluz, R. "Control algorithms for single inverter dual induction motor system applied to railway traction; Commande algorithmique d'un systeme mono-onduleur bimachine asynchrone destine a la traction ferroviaire." (2002).
- 64. Nejad, MA Shams1. "Architectures d'Alimentation et de Commande d'Actionneurs Tolérants aux Défauts-Régulateur de Courant Non Linéaire à Large Bande Passante." Institut National Polytechnique de Lorraine, Thèse de doctorat (2007).
- 65. Arcker-Hissel, Anne-Marie. Contrôle direct du couple électromagnétique de machines asynchrones de grande puissance: alimentation par onduleurs de tension à 2-niveaux ou 3-niveaux (NPC): observation à structure variable de la vitesse mécanique: réalisations expérimentales en techniques numérique et analogique. Diss. Toulouse, INPT, 1999.
- 66. Dessenne, Caroline. Commande modale et prédictive en optique adaptative. Diss. Paris7, 1998.
- 67. Lochot, Christophe. Modélisation et caractérisation des phénomènes couplés dans une chaîne de traction ferroviaire asynchrone. Diss. Toulouse, INPT, 1999.
- 68. Ignatova, Vanya. Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique. Diss. Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 2006.
- 69. SALIM, Mr HADDAD. "Gestion de la qualité d'énergie électrique dans un réseau de transmission." Faculté des Sciences de l'ingénieur (2010).
- 70. Léger, S. Doctorat en Sciences.

- 71. Hichem, Laib. Contribution par une nouvelle approche modulaire au filtrage actif des harmoniques dans les réseaux électriques de distribution. Diss. Université Mustapha Ben Boulaid Batna 2, Département de l'éléctrotechnique, 2017.
- 72. Alali, Mohamad Alaa Eddin. "Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension." (2002).
- 73. Amar, Omeir1. "Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant." Dirigé par Haddouche Ali, université de Badji Mokhtar Annaba 3 (2007).
- 74. Abdeslam, Djaffar Ould. Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques: application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension. Diss. Université de Haute Alsace-Mulhouse, 2005.
- 75. BOUHENNI, B. (2014). Performances des Méthodes pq et pq Modifiée pour l'Identification des Courants Harmoniques en Conditions non Idéales (Doctoral dissertation, جامعة الوادي, university of el oued).
- 76. Pouresmaeil, Edris, et al. "Instantaneous active and reactive current control technique of shunt active power filter based on the three-level NPC inverter." European Transactions on Electrical Power 21.7 (2011): 2007-2022.
- 77. Kathalingam, Sebasthi, and Porkumaran Karantharaj. "Comparison of multiple carrier disposition PWM techniques applied for multi-level shunt active filter." Journal of Electrical Engineering 63.4 (2012): 261-265.
- 78. Ucar, Ferhat, Resul Coteli, and Besir Dandil. "Three level inverter based shunt active power filter using multi-level hysteresis band current controller." Electrical Review 88.11A (2012): 227-231.
- 79. Akke, Magnus, and Thomas Biro. "Measurements of the frequency-dependent impedance of a thin wire with ground return." IEEE transactions on power delivery 20.2 (2005): 1748-1752.
- 80. Budner, Alan. "Introduction of frequency-dependent line parameters into an electromagnetic transients program." IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 1 (1970): 88-97.

- 81. Wedepohl, L. M., H. V. Nguyen, and G. D. Irwin. "Frequency-dependent transformation matrices for untransposed transmission lines using Newton-Raphson method." IEEE Transactions on Power Systems 11.3 (1996): 1538-1546.
- Bonner, A., et al. "Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks. 2. sample systems and examples." IEEE Transactions on Power Delivery 11.1 (1996): 466-474.
- Chin, Hong-Chan. "Optimal shunt capacitor allocation by fuzzy dynamic programming." Electric Power Systems Research 35.2 (1995): 133-139.
- Chung, T. S., and H. C. Leung. "A genetic algorithm approach in optimal capacitor selection with harmonic distortion considerations." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 21.8 (1999): 561-569.
- 85. Elamin, Ibrahim M. "Fast decoupled harmonic loadflow method." Conference Record of the 1990 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. IEEE, 1990.
- 86. Ulinuha, Agus. "Application of decoupled harmonic power flow for assessment of harmonic passive filter size and location." Proceedings of the 2016 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Kuala Lumpur, Malaysia. 2016.
- 87. Ulinuha, Agus, M. A. S. Masoum, and S. M. Islam. "Harmonic power flow calculations for a large power system with multiple nonlinear loads using decoupled approach." 2007 Australasian Universities Power Engineering Conference. IEEE, 2007.
- Archundia-Aranda, 1., and R. O. Mota-Palomino. "Harmonic penetration method for radial distribution networks." International Journal of Emerging Electric Power Systems 15.2 (2014): 111-117.
- Fernandes, Alécio B., and Washington LA Neves. "Phase-domain transmission line models considering frequency-dependent transformation matrices." IEEE Transactions on Power Delivery 19.2 (2004): 708-714.
- 90. Akagi, H. (2005, September). The state-of-the-art of active filters for power conditioning. In 2005 European Conference on Power Electronics and Applications (pp. 15-pp). IEEE.
- Arora, Rachit. EMTP simulation of an active filter operating with weak AC distribution system. Diss. Concordia University, 1999.

- 92. Choe, G-H., and M-H. Park. "A new injection method for ac harmonic elimination by active power filter." IEEE Transactions on Industrial Electronics 35.1 (1988): 141-147.
- 93. Hsu, Chin-Yuan, and Horng-Yuan Wu. "A new single-phase active power filter with reduced energy-storage capacity." IEE Proceedings-Electric Power Applications 143.1 (1996): 25-30.
- 94. Gouraud, Thierry. Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique. Diss. Nantes, 1997.
- 95. Singh, Bhim, Kamal Al-Haddad, and Ambrish Chandra. "A review of active filters for power quality improvement." IEEE transactions on industrial electronics 46.5 (1999): 960-971.
- 96. Djeghloud, H., Larakeb, M., Bentounsi, A., Terriche, Y., & Kerdoun, D. (2014, September). Laboratory implementation of a hybrid series active power filter system part ii: Series active filter designing. In 2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (pp. 1047-1052). IEEE.
- 97. Fujita, Hideaki, and Hirofumi Akag1. "An approach to harmonic current-free AC/DC power conversion for large industrial loads: the integration of a series active filter with a double-series diode rectifier." IEEE transactions on industry applications 33.5 (1997): 1233-1240.
- 98. Shahraki, E. G. (2003). Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques (Doctoral dissertation, Université Henri Poincaré-Nancy 1).
- 99. Chang, Gary W., and Tai-Chang Shee. "A novel reference compensation current strategy for shunt active power filter control." IEEE Transactions on Power Delivery 19.4 (2004): 1751-1758.
- 100. Bhattacharya, Subhashish, and Deepak Divan. "Design and implementation of a hybrid series active filter system." Proceedings of PESC'95-Power Electronics Specialist Conference. Vol. 1. IEEE, 1995.
- 101. Imarazene, Khoukha. Application des réseaux de neurones à la commande par élimination d'harmoniques des onduleurs multiniveaux. Diss. Alger, Ecole Nationale Polytechnique, 2005.

- 102. Subjak, Joseph S., and John S. Mcquilkin. "Harmonics-causes, effects, measurements, and analysis: an update." IEEE transactions on industry applications 26.6 (1990): 1034-1042.
- 103. Kouzou, Abdellah. Compensation des perturbations dans les reseaux electriques basse tension par les filtres actifs de puissance a configuration speciale. Diss. Alger, Ecole Nationale Polytechnique, 2011.
- 104. Karimi-Ghartemani, Masoud, and Hossein Mokhtar1. "Extraction of Harmonics and Reactive Current for Power Quality Enhancement." 2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Vol. 3. IEEE, 2006.
- 105. Kouzou, A., M. O. Mahmoudi, and M. S. Boucherit. "A new 3D-SVPWM algorithm for four-leg inverters." 2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference. IEEE, 2009.
- 106. Lee, Joon-Hwan, Seung-Hwan Lee, and Seung-Ki Sul. "Variable-speed engine generator with supercapacitor: Isolated power generation system and fuel efficiency." IEEE Transactions on Industry Applications 45.6 (2009): 2130-2135.
- 107. Laib, Hichem, Hanane Kouara, and Abd Elaziz Chagh1. "A new approach of modular active power filtering." International Journal of Advanced Science and Technology 50 (2013): 11-22
- 108. Li, Yunwei, D. Mahinda Vilathgamuwa, and Poh Chiang Loh. "Microgrid power quality enhancement using a three-phase four-wire grid-interfacing compensator." IEEE transactions on industry applications 41.6 (2005): 1707-1719.
- Liu, Desheng, et al. "Research on the three-phase four-leg aeronautical static inverter based on three-dimensional space vector modulation in abc coordinates." 2009 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments. IEEE, 2009.
- 110. Hamadi, Ab, Salem Rahmani, and Kamal Al-Haddad. "A new hybrid series active filter configuration to compensate voltage sag, swell, voltage and current harmonics and reactive power." 2009 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. IEEE, 2009.
- 111. Arrillaga, J., P. S. Bodger, and D. A. Bradley. Garmoniki v elektricheskikh sistemakh. Energoatomizdat, 1990.

- 112. Aliouane, Kamel. Contribution à l'étude du filtrage d'harmoniques des réseaux de distribution à l'aide de l'association de filtres actif et passif parallèle. Diss. Institut National Polytechnique de Lorraine, 1995.
- 113. Tofoli, Fernando L., et al. "Analysis of losses in cables and transformers under power quality related issues." Nineteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC'04.. Vol. 3. IEEE, 2004.
- 114. Aziz, Boukadoum. Contribution à l'étude des stratégies d'identification harmoniques et de commande basées sur les techniques avancées pour les compensateurs actifs des réseaux électriques. Diss. Université Badji Mokhtar, 2015.
- 115. Wang, Miao-Xin. Filtrage actif de puissance: études et réalisation d'un filtre actif à commande numérique temps réel. Diss. Toulouse, INPT, 1992.
- 116. Tang, Yuanhong, et al. "Artificial intelligence-aided minimum reactive power control for the DAB converter based on harmonic analysis method." IEEE Transactions on Power Electronics 36.9 (2021): 9704-9710.
- 117. Mariscotti, Andrea, and Leonardo Sandrolin1. "Detection of harmonic overvoltage and resonance in AC railways using measured pantograph electrical quantities." Energies 14.18 (2021): 5645.
- 118. Song, Kejian, et al. "High-order harmonic resonances in traction power supplies: A review based on railway operational data, measurements, and experience." IEEE Transactions on Power Electronics 35.3 (2019): 2501-2518.
- 119. Qiujiang, Liu, et al. "Resonant frequency identification based on harmonic injection measuring method for traction power supply systems." IET Power Electronics 11.3 (2018): 585-592.
- 120. Liu, Li, et al. "Interpolated phase-shifted PWM for harmonics suppression of multilevel hybrid railway power conditioner in traction power supply system." IEEE Transactions on Transportation Electrification 8.1 (2021): 898-908.
- 121. Pongnot, Gaël, et al. "Apport des convertisseurs multiniveaux modulaires aux véhicules électriques." La Revue 3E. I 111 (2024).
- 122. Morin, Eric. Modélisation d'un réseau électrique de tramway: du composant au système. Diss. Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 2005.

- 123. Suarez Diaz, Julian Andres. Étude et modélisation des interactions électriques entre les engins et les installations fixes de traction électrique 25kV/50Hz. Diss. 2014.
- 124. Liu, Yuxing, et al. "Passivity-based decoupling control strategy of single-phase LCL-type VSRs for harmonics suppression in railway power systems." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 117 (2020): 105698.
- 125. Djazia, Kamel, and Mustapha Sarra. "Improving the quality of energy using an active power filter with zero direct power command control related to a photovoltaic system connected to a network." Electrical Engineering & Electromechanics 5 (2023): 20-25.
- 126. Aissaoui, Meryem, et al. "Analysis of harmonic resonance in traction power supply system." 2022 2nd International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE). IEEE, 2022.
- Lv, Xiaoqin, et al. "Eigenvalue-based harmonic instability analysis of electrical railway vehicle-network system." IEEE transactions on Transportation Electrification 5.3 (2019): 727-744.
- 128. Balakishan, Padakanti, 1. A. Chidambaram, and M. Manikandan. "Improvement of power quality in grid-connected hybrid system with power monitoring and control based on internet of things approach." Electrical Engineering & Electromechanics 4 (2022): 44-50.
- 129. Han, Yang, et al. "Modeling and stability analysis of \$ LCL \$-type gridconnected inverters: A comprehensive overview." IEEE Access 7 (2019): 114975-115001.
- Gurrola-Corral, Carlos, et al. "Optimal LCL-filter design method for gridconnected renewable energy sources." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 120 (2020): 105998.
- 131. Jiang, Shiqi, et al. "Active EMI filter design with a modified LCL-LC filter for single-phase grid-connected inverter in vehicle-to-grid application." IEEE Transactions on Vehicular Technology 68.11 (2019): 10639-10650.
- Tang, Weiyu, Ke Ma, and Yubo Song. "Critical damping ratio to ensure design efficiency and stability of LCL filters." IEEE Transactions on Power Electronics 36.1 (2020): 315-325.

- 133. Rasekh, Navid, and Majid Hosseinpour. "LCL filter design and robust converter side current feedback control for grid-connected Proton Exchange Membrane Fuel Cell system." International Journal of Hydrogen Energy 45.23 (2020): 13055-13067.
- 134. Rasekh, Navid, and Majid Hosseinpour. "LCL filter design and robust converter side current feedback control for grid-connected Proton Exchange Membrane Fuel Cell system." International Journal of Hydrogen Energy 45.23 (2020): 13055-13067.
- 135. Al-Barashi, Maged, et al. "Enhancing power quality of high-speed railway traction converters by fully integrated T-LCL filter." IET Power Electronics 16.5 (2023): 699-714.
- 136. Dey, Prasenjit, Chaiyut Sumpavakup, and Phumin Kirawanich. "Optimal control of grid connected electric railways to mitigate low frequency oscillations." 2022 Research, Invention, and Innovation Congress: Innovative Electricals and Electronics (RI2C). IEEE, 2022.
- 137. Xue, Jing-Ze, et al. "Speed tracking control of high-speed train based on adaptive control and linear active disturbance rejection control." Transactions of the Institute of Measurement and Control 45.10 (2023): 1896-1909.
- Tasiu, Ibrahim Adamu, et al. "Review of recent control strategies for the traction converters in high-speed train." IEEE Transactions on Transportation Electrification 8.2 (2022): 2311-2333.
- Zhao, Liang, et al. "A fuzzy logic-based intelligent multiattribute routing scheme for two-layered SDVNs." IEEE Transactions on Network and Service Management 19.4 (2022): 4189-4200.
- Woźniak, Marcin, Adam Zielonka, and Andrzej Sikora. "Driving support by type-2 fuzzy logic control model." Expert Systems with Applications 207 (2022): 117798.
- 141. Kambalimath, Shruti, and Paresh Chandra Deka. "A basic review of fuzzy logic applications in hydrology and water resources." Applied Water Science 10.8 (2020): 1-14.
- 142. Paranchuk, Ya S., Y. V. Shabatura, and O. O. Kuznyetsov. "Електромеханічна система наведення озброєння на основі нечіткого ПД-регулятора положення." Electrical Engineering & Electromechanics 3 (2021): 25-31.

- 143. Moussa, M. Ali, et al. "A hybrid renewable energy production system using a smart controller based on fuzzy logic." Electrical Engineering & Electromechanics 3 (2022): 46-50.
- 144. Muthubalaji, S., et al. "Development and validation of enhanced fuzzy logic controller and boost converter topologies for a single phase grid system." Electrical Engineering & Electromechanics 5 (2022): 60-66.
- 145. Khatir, Abdelfatah, et al. "Indirect adaptive fuzzy finite time synergetic control for power systems." Electrical Engineering & Electromechanics 1 (2023): 57-62.
- 146. Reddy, S. Gopal, Somaskandan Ganapathy, and Mani Manikandan. "Power quality improvement in distribution system based on dynamic voltage restorer using PI tuned fuzzy logic controller." Электротехника и электромеханика 1 (eng) (2022): 44-50.
- 147. Ikhe, Atul, and Yogesh Pahariya. "Voltage regulation using three phase electric spring by fuzzy logic controller." Electrical Engineering & Electromechanics 4 (2023): 14-18.
- 148. Goyal, Deepak Kumar, and Dinesh Birla. "A comprehensive control strategy for power quality enhancement in railway power system." International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration 10.106 (2023): 1123.
- 149. Liu, Yuyan, et al. "Adaptive threshold adjustment strategy based on fuzzy logic control for ground energy storage system in urban rail transit." IEEE Transactions on Vehicular Technology 70.10 (2021): 9945-9956.
- Alekhya, G. B. S., K. Shashikanth, and M. Anjaneya Prasad. "Risk assessment of cost overrun using fuzzy logic model." Materials Today: Proceedings 62 (2022): 1803-1810.
- 151. Wang, Qianjin, et al. "Stabilization bound of singularly perturbed switched nonlinear systems subject to actuator saturation using the Takagi–Sugeno fuzzy model." Asian Journal of Control 24.1 (2022): 415-426.
- 152. Pradhan, Ranjan K., and Chinmaya K. Sahu. "Single-input Fuzzy PI Controller for Traction Line-Side Converter of High Speed Railway." 2021 12th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT). IEEE, 2021.

- 153. Al-Faris, Mahmoud, et al. "Vision based dynamic thermal comfort control using fuzzy logic and deep learning." Applied Sciences 11.10 (2021): 4626.
- 154. Liu, Yuxing, et al. "A novel harmonic suppression traction transformer with integrated filtering inductors for railway systems." Energies 13.2 (2020): 473.
- 155. Song, Wensheng, et al. "High-frequency harmonic resonance suppression in high-speed railway through single-phase traction converter with LCL filter." IEEE Transactions on Transportation Electrification 2.3 (2016): 347-356.
- 156. Gervasio, F. A., et al. "Voltage control of microgrid systems based on 3lnpc inverters with LCL-filter in islanding operation." 2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). IEEE, 2015.
- 157. Zeitz, Michael. "The extended Luenberger observer for nonlinear systems."
 Systems & Control Letters 9.2 (1987): 149-156.
 Buso, Simone, and Paolo Mattavell1. Digital control in power electronics. Morgan & Claypool Publishers, 2015.

Meryem AISSAOUI



Contribution a l'amélioration des aspects économiques et optimisation

énergétique appliques pour la traction electrique

Thèse

en vue l'Obtention du Diplôme de Doctorat en Ingénierie des Transportsen Spécialité Traction Électrique

Résumé

Les systèmes de traction électrique, en particulier les systèmes ferroviaires, font face à de multiples défis et problèmes liés aux perturbations électriques, telles que la surcharge et les fluctuations de tension. Ces perturbations ont un impact significatif sur la fiabilité et la sécurité de ces systèmes, ce qui rend impératif d'améliorer leurs performances et de réduire les problèmes électriques. Les avancées technologiques modernes et les progrès en génie électrique offrent de nouvelles opportunités pour faire face à ces défis. Des systèmes de surveillance intelligents et une automatisation étendue peuvent être largement utilisés pour surveiller et gérer la traction électrique de manière plus efficace. De plus, les techniques d'amélioration de l'efficacité énergétique contribuent à réduire la surconsommation, réduisant ainsi la charge électrique sur le système.

De plus, des techniques avancées de filtrage et de contrôle électrique sont en cours de développement pour traiter les problèmes de compatibilité électromagnétique et de résonance. Ces techniques comprennent des conceptions avancées de composants du système électrique et l'utilisation de matériaux de pointe qui améliorent la qualité de l'énergie et réduisent les perturbations. Concernant les applications pratiques, des modèles de simulation sont utilisés dans logiciel MATLAB/Simulink pour tester et évaluer les solutions proposées avant leur mise en œuvre à grande échelle. Des résultats satisfaisants ont été obtenus, montrant la robustesse et l'efficacité des filtres et des systèmes de contrôle utilisés. Ces modèles permettent une étude précise et répétée de l'impact des améliorations proposées avant leur application dans la réalité.

En conclusion, cette recherche présente une méthodologie globale pour améliorer l'énergie dans les systèmes de traction électrique, ce qui contribue à augmenter leur efficacité, à améliorer leur fiabilité et leur sécurité et à renforcer la durabilité et l'efficacité de l'utilisation de ces systèmes vitaux dans ce secteur.

Mots clés : Qualité d'Energie, simulation, aspects économique, Harmonique, chaine de traction ferroviaire, logique floue.

Directeur de la thèse : Mohamed BENIDIR - Université Constantine 1 Frère Mentouri

Année universitaire 2024/2025