



ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE ABBES LAGHROUR DE KHENCHELA
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECNOLOGIE



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master (L.M.D)

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commandes Electriques

Présenté par : KHAMMAR Farid

Étude, modélisation et commande automatique d'un
transformateur de puissance dans un poste de distribution
60/30 kV pour la régulation de tension.

Soutenu le :15/06/2026

Membres du jury :

Président : BEDDIAF Yassine Prof. Université Abbes Laghrou de Khenchela

Encadrant : BEDDIAF Abdelaziz M.C.A Université Abbes Laghrou de Khenchela

Co-Encadrant : LABDANI Rafik M.A.A Université Abbes Laghrou de Khenchela

Examineur : SAIDI Abdelkader M. C. B Université Abbes Laghrou de Khenchela

Année Universitaire: 2025 /2026

Dédicace

À mon épouse,

pour sa patience, son soutien, sa compréhension et ses encouragements constants
durant toutes les étapes de ce travail.

À mes chers enfants,

source de joie, de motivation et d'espoir, à qui je souhaite un avenir plein de
réussite et de bonheur.

À mes frères et à mes sœurs,

pour leur présence, leur affection et leurs encouragements précieux.

À la mémoire de mes chers parents, que Dieu leur accorde Sa miséricorde,

eux qui m'ont élevé dans les meilleures conditions, m'ont transmis les valeurs
de l'effort, du respect et de la persévérance, et à qui je dois tout ce que je suis
aujourd'hui.

À toutes ces personnes , je dédie ce modeste travail.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le Tout-Puissant de m'avoir accordé la volonté, la patience et la force nécessaires pour mener à bien ce travail.

J'exprime mes sincères remerciements à mon encadrant, le Dr BEDDIAF Abdelaziz, ainsi qu'à mon co-encadrant, M. LABDANI Rafik, pour leur accompagnement, leurs conseils, leur dévouement, leurs orientations scientifiques et leur disponibilité tout au long de la préparation de ce mémoire.

Je remercie également les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'évaluer ce travail et pour leurs remarques constructives qui contribueront à l'amélioration de cette recherche.

Mes remerciements s'adressent aussi à l'ensemble des enseignants du Département de Génie Électrique de l'Université Abbès Laghrour Khenchela pour la qualité de la formation reçue durant mon cursus universitaire.

Mes remerciements s'adressent également à la Sonelgaz Transport Électricité et Opérateur Système (District de Khenchela, Région de Sétif). Je salue le professionnalisme de ses dirigeants ainsi que le soutien de l'ensemble de mes collègues à tous les niveaux de la hiérarchie. La contribution de cette entreprise nationale a été essentielle pour valoriser nos développements théoriques par des applications concrètes.

Je remercie particulièrement mon épouse et sa famille, mes enfants, mes frères et mes sœurs pour leur soutien moral, leur patience et leurs encouragements tout au long de mon parcours .

Enfin, j'adresse une pensée profonde et pleine de reconnaissance à la mémoire de mes chers parents, que Dieu leur accorde Sa miséricorde, pour l'éducation, les valeurs et les principes qu'ils m'ont transmis.

Résumé

La régulation de la tension constitue un enjeu majeur dans les réseaux électriques de transport et de distribution afin d'assurer la qualité et la continuité de l'alimentation électrique. Dans ce contexte, les transformateurs de puissance équipés de changeurs de prises en charge (OLTC) jouent un rôle essentiel en permettant l'adaptation du rapport de transformation et le maintien de la tension dans les limites admissibles.

Ce mémoire porte sur l'étude, la modélisation et la commande automatique d'un transformateur de puissance 60/30 kV destiné à la régulation de tension. Une étude bibliographique des principales techniques de régulation de tension a d'abord été réalisée. Ensuite, un modèle du transformateur équipé d'un régleur en charge a été développé et implémenté sous MATLAB/Simulink. Enfin, deux stratégies de commande ont été étudiées et comparées : le régulateur PI discret et la commande directe de la tension (DVC).

Les résultats de simulation ont montré que les deux approches permettent de maintenir la tension dans la plage de fonctionnement souhaitée malgré les variations de charge. Ils mettent également en évidence l'efficacité des stratégies proposées pour améliorer la stabilité et la qualité de la tension au sein du réseau électrique.

Mots-clés : Transformateur de puissance, OLTC, régulation de tension, commande PI discrète, commande directe de la tension (DVC), MATLAB/Simulink.

Abstract

Voltage regulation is a major challenge in electrical transmission and distribution networks to ensure power quality and continuity of supply. In this context, power transformers equipped with On-Load Tap Changers (OLTCs) play a key role by adjusting the transformation ratio and maintaining the voltage within acceptable limits.

This dissertation focuses on the study, modeling, and automatic control of a 60/30 kV power transformer for voltage regulation purposes. First, a literature review of the main voltage regulation techniques was carried out. Then, a model of the power transformer equipped with an OLTC was developed and implemented in MATLAB/Simulink. Finally, two control strategies were investigated and compared: a discrete PI controller and Direct Voltage Control (DVC).

Simulation results demonstrated that both approaches are capable of maintaining the voltage within the desired operating range under load variations. The obtained results also highlight the effectiveness of the proposed control strategies in improving voltage stability and power quality in electrical networks.

Keywords: Power transformer, OLTC, voltage regulation, discrete PI control, Direct Voltage Control (DVC), MATLAB/Simulink.

الملخص

تُعدّ عملية تنظيم الجهد الكهربائي من أهم التحديات في شبكات نقل وتوزيع الطاقة الكهربائية، لما لها من دور أساسي في ضمان جودة واستمرارية التغذية الكهربائية. وفي هذا الإطار، تؤدي محولات القدرة المزوّدة بمبدلات المآخذ تحت الحمل (OLTC) دوراً مهماً من خلال تعديل نسبة التحويل والمحافظة على الجهد ضمن الحدود المسموح بها. يتناول هذا العمل دراسة ونمذجة والتحكم الآلي في محول قدرة بجهد 30/60 كيلوفولت مخصص لتنظيم الجهد. تم في البداية إجراء دراسة شاملة لأهم تقنيات تنظيم الجهد الكهربائي. بعد ذلك تم تطوير نموذج لمحوّلة القدرة المزوّدة بمبدل مآخذ تحت الحمل وتنفيذه باستخدام برنامج MATLAB/Simulink. وأخيراً، تمت دراسة ومقارنة استراتيجيتين للتحكم هما المتحكم التناسبي التكاملي الرقمي (PI Discret) والتحكم المباشر في الجهد (DVC). أظهرت نتائج المحاكاة أن الطريقتين قادرتان على الحفاظ على الجهد ضمن مجال التشغيل المطلوب رغم تغيرات الحمل، كما بينت فعاليتهما في تحسين استقرار الجهد وجودة الطاقة الكهربائية في الشبكة.

الكلمات المفتاحية: محول قدرة، مبدل مآخذ تحت الحمل (OLTC)، تنظيم الجهد، متحكم PI رقمي، التحكم المباشر في الجهد (DVC)، MATLAB/Simulink.

Liste des figures

N°	Titre de la figure	Page
Figure I.1	Transformateurs à prise ajustable	19
Figure I.2	Changeur de prise hors tension	20
Figure I.3	Régleur en charge (OLTC - On Load Tap Changer)	21
Figure I.4	Schéma de l'OLTC à résistances	22
Figure I.5	Commutation des prises en charge sur une seule phase	23
Figure I.6	Schéma du OLTC à impédance	24
Figure I.7	Schéma de la circulation du courant	25
Figure II.1	Chute de tension dans une ligne	32
Figure II.2	Réglage direct de la tension	35
Figure II.3	Diagramme de régleur en charge (OLTC)	36
Figure II.4	Réglage indirect de la tension par compensation	37
Figure II.5	Transformateur HTA/BT à prises à vide	38
Figure II.6	Emplacement des batteries condensateurs sur le réseau de distribution	38
Figure II.7	Transformateur triphasé	44
Figure II.8	Transformateur supposé parfait	45
Figure II.9	Schéma électrique équivalent d'un transformateur réel	47
Figure II.10	Modèle Simulink du transformateur de puissance	49
Figure II.11	Modèle Simulink du régleur en charge (OLTC)	50
Figure III.1	Schéma de régulation de tension par commande intégrale discrète	57

Figure III.2	Architecture de la régulation de tension basée sur un régulateur PI discret	58
Figure III.3	Structure de la commande directe de la tension basée sur un OLTC	59
Figure III.4	Caractéristiques du système	63
Figure III.5	Résultats de simulation	65

Liste des tableaux

N°	Titre du tableau	Page
Tableau II.1	Avantages et inconvénients des différentes méthodes d'implantation des batteries condensateurs	39
Tableau III.1	Paramètres du transformateur	55
Tableau III.2	Caractéristiques des prises	55
Tableau III.3	Principales spécifications de la régulation	56

Liste des des symboles et abréviations

Abréviation	Signification
HTA	Haute Tension A
HTB	Haute Tension B
BT	Basse Tension
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission Systems
OCTC	Off-Circuit Tap Changer
OLTC	On-Load Tap Changer
PI	Proportionnel Intégral
PID	Proportionnel Intégral Dérivé
MPC	Model Predictive Control
AVR	Automatic Voltage Regulator
DVC	Direct voltage regulator
MATLAB	Matrix Laboratory
(f.é.m.)	force électromotrice
(TD)	tableaux divisionnaires

Table des matières (Sommaire)

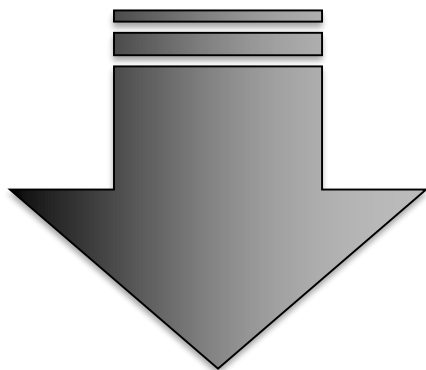
Dédicace	02
Remerciements	03
Résumé	04
Abstract	05
الملخص	06
Liste des abréviations	07
Liste des figures	08
Liste des tableaux	10
Introduction générale	13
Chapitre I : État de l'art	16
I.1 Introduction	17
I.2 Historique	17
I.3 Fonctionnement et caractéristiques des transformateurs de puissance	18
I.3.1 Système OCTC	19
I.3.2 Système OLTC	20
I.3.3 Types des régleurs en charge	21
I.4 Techniques classiques de régulation de tension	26
I.5 Commandes avancées pour la régulation de tension	28
I.6 Conclusion	29
Chapitre II : Étude et modélisation du système de régulation de tension	31
II.1 Introduction	32
II.2 Chute de tension dans les réseaux électriques	32
II.3 Méthodes de régulation de tension	34
II.4 Modélisation du transformateur de puissance	43
II.5 Modélisation du régleur en charge OLTC	47
II.6 Conclusion	51
Chapitre III : Conception de la commande automatique et validation par simulation	52
III.1 Introduction	53
III.2 Présentation du système étudié	53
III.3 Conception de la stratégie de commande	56
III.4 Résultats de simulation	61
III.5 Conclusion	66

Conclusion générale	67
Annexe	68
Références bibliographiques	69

...

INTRODUCTION

GÉNÉRALE



INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le développement des réseaux électriques modernes exige des systèmes capables d'assurer une alimentation électrique stable, fiable et de bonne qualité. Dans les réseaux de transport et de distribution, le maintien de la tension dans des limites admissibles représente un enjeu majeur afin de garantir le bon fonctionnement des équipements électriques et d'améliorer la continuité de service [1]. Les variations de charge, les perturbations du réseau ainsi que l'intégration croissante des sources d'énergie renouvelables rendent la régulation de tension de plus en plus complexe [2], [3].

Les transformateurs de puissance occupent une place essentielle dans les postes électriques puisqu'ils permettent l'adaptation des niveaux de tension entre les différents étages du réseau électrique. Dans les postes de distribution 60/30 kV, les transformateurs assurent le transfert de l'énergie électrique tout en participant activement à la stabilité et à la qualité de la tension fournie aux consommateurs [4]. Afin de compenser les fluctuations de tension dues aux variations de charge, les transformateurs modernes sont généralement équipés de systèmes de changement de prises, notamment les changeurs de prises en charge OLTC (*On Load Tap Changer*), permettant de modifier le rapport de transformation sans interruption de l'alimentation électrique [5].

La régulation automatique de tension des transformateurs constitue ainsi une fonction indispensable dans les réseaux électriques. Les méthodes classiques de commande, telles que les régulateurs automatiques de tension (AVR), les correcteurs PI/PID et les techniques de contrôle par droop, sont largement utilisées en raison de leur simplicité et de leur efficacité [6]. Toutefois, l'évolution des réseaux électriques et l'augmentation des exigences en matière de stabilité et de performance ont conduit au développement de méthodes de commande avancées telles que les commandes adaptatives, la logique floue et la commande prédictive MPC (*Model Predictive Control*) [7].

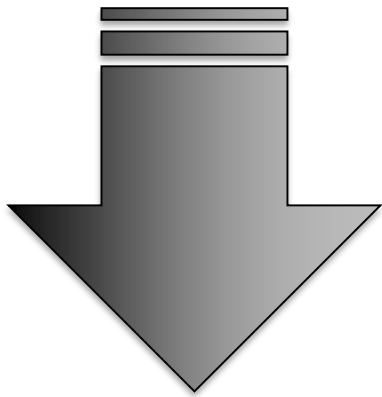
Dans ce contexte, ce mémoire porte sur l'étude, la modélisation et la commande automatique d'un transformateur de puissance dans un poste de distribution 60/30 kV destiné à la régulation de tension. L'objectif principal consiste à analyser le comportement du transformateur, développer un modèle représentatif du système et étudier les stratégies de commande permettant d'assurer une régulation efficace et stable de la tension.

Le mémoire est organisé comme suit :

INTRODUCTION GÉNÉRALE

- Le premier chapitre présente un état de l'art sur les transformateurs de puissance et les techniques de régulation de tension classiques et avancées.
- Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation du transformateur de puissance et du système de régulation.
- Le troisième chapitre présente la conception de la commande automatique, les résultats de simulation ainsi que l'analyse des performances du système proposé.

Chapitre I : État de l'art



I. Introduction

Les transformateurs de puissance constituent des éléments essentiels des réseaux électriques de transport et de distribution, notamment dans les postes 60/30 kV où ils assurent l'adaptation des niveaux de tension et la continuité de l'alimentation électrique [4]. Face aux variations de charge et aux perturbations du réseau, la régulation de tension devient une nécessité pour garantir la qualité et la stabilité de l'énergie distribuée [3].

Dans ce contexte, plusieurs méthodes de modélisation et de commande automatique ont été développées afin d'améliorer les performances des transformateurs de puissance, en particulier à travers les systèmes de réglage de prises en charge [6]. Ce chapitre présente un état de l'art des principales techniques utilisées pour l'étude, la modélisation et la régulation automatique des transformateurs dans les postes de distribution.

II. Historique

L'évolution du transformateur est marquée par plusieurs étapes importantes, allant de la découverte scientifique jusqu'à son intégration dans les applications industrielles modernes.

En 1831, Michael Faraday conçoit le premier prototype rudimentaire de transformateur. Cette expérience permet de démontrer le principe de l'induction électromagnétique, sans toutefois envisager encore les futures applications industrielles de cette découverte [8].

Entre 1881 et 1884, Lucien Gaulard et John Dixon Gibbs présentent à Londres un appareil appelé « générateur secondaire ». Cette invention est considérée comme le premier transformateur de puissance pratique. Le dispositif est ensuite acquis par la société Westinghouse et utilisé en 1884 à Turin pour l'alimentation des réseaux d'éclairage électrique. Les premiers transformateurs utilisaient un noyau de fer ouvert. Par la suite, ce système est remplacé par un noyau circulaire à circuit magnétique fermé, permettant d'obtenir un meilleur rendement et de réduire les pertes énergétiques [9].

Durant la période 1885-1886, William Stanley, ingénieur chez Westinghouse, améliore le transformateur en utilisant un noyau constitué de plaques de fer imbriquées en forme de « E ». Ce modèle est commercialisé dès 1886. Au même moment, les ingénieurs hongrois Károly

Zipernowsky, Ottó Bláthy et Miksa Déri, de la société Ganz, développent également un modèle à haut rendement basé sur les travaux de Gaulard et Gibbs [9].

En 1889, l'ingénieur russe Mikhail Dolivo-Dobrovolsky réalise une avancée majeure avec le développement du premier transformateur triphasé, ouvrant ainsi la voie aux réseaux électriques modernes [9].

III. Fonctionnement et caractéristiques des transformateurs de puissance

Les transformateurs de puissance jouent un rôle fondamental dans les réseaux électriques de transport et de distribution d'énergie. Leur fonction principale consiste à adapter les niveaux de tension afin de faciliter le transport de l'énergie électrique sur de longues distances avec des pertes réduites, puis à fournir une tension appropriée aux consommateurs [1]. Dans les postes de distribution 60/30 kV, les transformateurs assurent l'interconnexion entre les différents niveaux de tension tout en garantissant la stabilité et la qualité de l'alimentation électrique [4].

Le fonctionnement d'un transformateur repose sur le principe de l'induction électromagnétique. Lorsqu'une tension alternative est appliquée à l'enroulement primaire, un flux magnétique variable est créé dans le circuit magnétique. Ce flux induit une force électromotrice dans l'enroulement secondaire, permettant ainsi le transfert d'énergie électrique sans liaison électrique directe entre les deux circuits [10].

Les performances des transformateurs de puissance sont généralement caractérisées par plusieurs paramètres importants tels que la puissance nominale, le rapport de transformation, les pertes fer et cuivre, le rendement, la régulation de tension et l'impédance de court-circuit. Ces caractéristiques influencent directement la stabilité du réseau électrique ainsi que la qualité de la tension fournie aux charges [11].

Afin de maintenir une tension secondaire stable malgré les variations de charge et les fluctuations du réseau, les transformateurs de puissance sont souvent équipés de prises de réglage permettant de modifier le rapport de transformation [5]. Ces prises peuvent être installées du côté primaire ou secondaire selon les exigences du système électrique.

Les transformateurs à prise ajustable permettent d'augmenter ou de diminuer la tension secondaire en modifiant le nombre effectif de spires dans l'enroulement. Cette technique constitue l'une des solutions les plus utilisées pour la régulation de tension dans les postes électriques.

On distingue généralement deux types de réglage :

- le réglage hors charge (Off-Circuit Tap Changer – OCTC), nécessitant la mise hors tension du transformateur [12].
- le réglage en charge (On Load Tap Changer – OLTC), permettant le changement de prise sans interruption de l'alimentation [5].

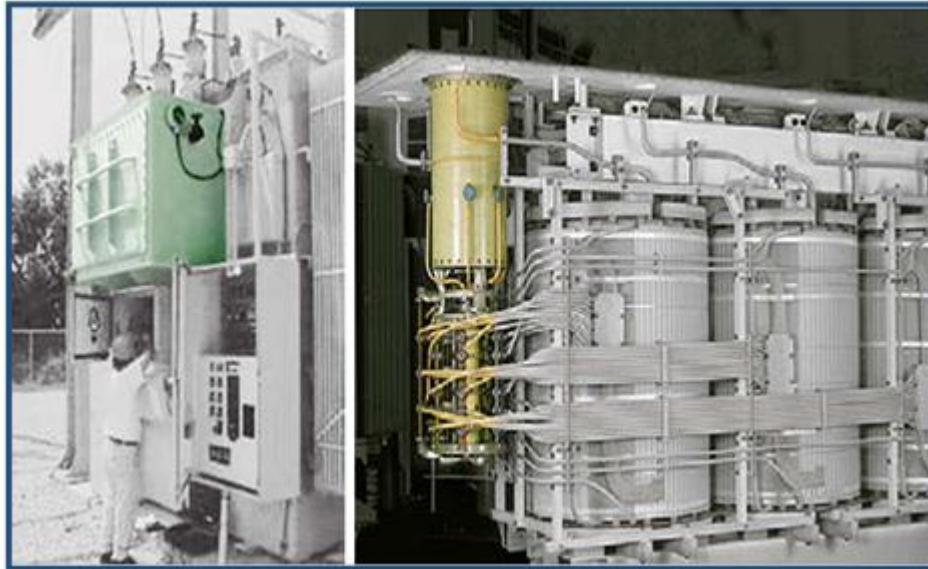


Figure I.1: Transformateurs à prise ajustable

III.1. Système OCTC (Off-Circuit Tap Changer)

Le changeur de prises hors tension, appelé OCTC (*Off-Circuit Tap Changer*), est un dispositif installé sur les transformateurs de puissance permettant de modifier le rapport de transformation en changeant le nombre effectif de spires d'un enroulement. Cette opération permet d'ajuster la tension secondaire du transformateur afin de compenser les variations de tension du réseau électrique.

Contrairement au système OLTC (*On Load Tap Changer*), le changement de prise avec un OCTC ne peut être effectué que lorsque le transformateur est totalement mis hors tension et déconnecté du réseau électrique. Cette interruption est nécessaire afin d'éviter l'apparition d'arcs électriques ou de courts-circuits lors de la commutation entre les différentes prises.

Le système OCTC est généralement constitué d'un sélecteur mécanique relié à plusieurs prises situées sur l'un des enroulements du transformateur, souvent du côté haute tension. Le réglage est réalisé manuellement ou à l'aide d'un mécanisme motorisé pendant les opérations de maintenance ou lors des changements de configuration du réseau.

Les changeurs de prises hors tension présentent plusieurs avantages, notamment :

- une structure simple.

- un coût réduit.
- une grande fiabilité mécanique.
- des besoins de maintenance limités.

Cependant, leur principal inconvénient réside dans l'obligation d'interrompre le fonctionnement du transformateur avant toute modification du rapport de transformation, ce qui les rend moins adaptés aux réseaux nécessitant une régulation continue de la tension.

Les systèmes OCTC sont principalement utilisés dans les transformateurs où les variations de tension sont peu fréquentes ou lorsque les ajustements de tension peuvent être réalisés durant des périodes d'arrêt planifiées.

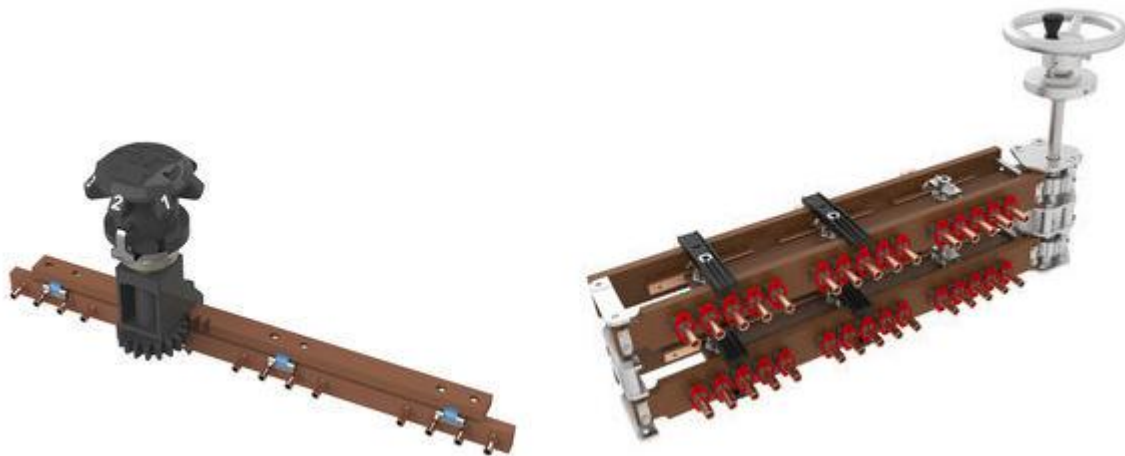


Figure I.2: Changeur de prise hors tension

III.2. Système OLTC (On Load Tap Changer)

Le changeur de prises en charge (OLTC) est un dispositif électromécanique permettant de modifier le rapport de transformation du transformateur tout en maintenant le transformateur sous tension et alimentant la charge. Cette technologie est largement utilisée dans les réseaux modernes en raison de sa capacité à assurer une régulation continue et automatique de la tension.

Le principe de fonctionnement de l'OLTC consiste à commuter entre différentes prises de l'enroulement à l'aide de contacts mécaniques et de résistances ou réactances de transition afin d'éviter les courts-circuits entre prises voisines. Le système OLTC est généralement commandé par un régulateur automatique de tension (AVR) qui compare la tension mesurée à une valeur de référence puis ordonne le changement de prise lorsque l'écart dépasse une certaine limite.

Les principaux avantages des systèmes OLTC sont :

- l'amélioration de la stabilité de tension ;
- la continuité de service sans interruption ;
- l'adaptation automatique aux variations de charge ;
- la réduction des pertes et des fluctuations de tension.

Cependant, les dispositifs OLTC présentent également certaines contraintes, notamment l'usure mécanique des contacts, les besoins de maintenance périodique et la complexité du système de commande.

Dans les réseaux électriques modernes intégrant des charges variables et des sources d'énergie renouvelables, les transformateurs équipés de systèmes OLTC constituent une solution essentielle pour assurer une régulation efficace de la tension et améliorer la qualité de l'énergie électrique.

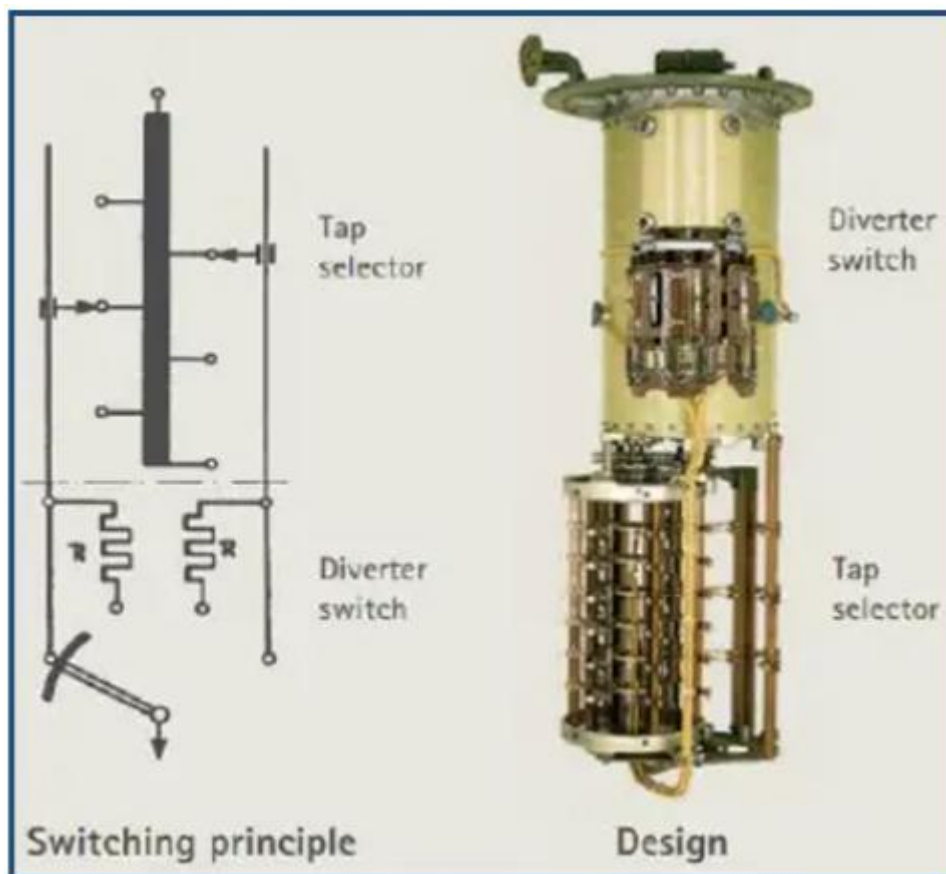


Figure I.3 Régleur en Charge (OLTC - On Load Tap Changer)

III.2.1. Types des régleurs en charge (OLTC - On Load Tap Changer)

a. OLTC à Résistances (Type à commutation rapide) [13]

Depuis la proposition par le Dr Jansen de sa célèbre théorie de la transition résistive à haute vitesse en 1927, Actuellement, la plupart des applications pratiques en ingénierie sont des

changeurs de prises en charge résistifs, C'est le type le plus courant et pour les transformateurs de transport (comme le **60/30 kV**).

- **Mécanisme de transition** : Il utilise des résistances pour limiter le courant de circulation pendant le passage d'un plot à l'autre.
 - **Vitesse d'action** : Le mécanisme de commutation rapide est généralement motorisé (quelques millisecondes) pour éviter que les résistances ne surchauffent, car elles ne sont pas conçues pour supporter le courant de charge en permanence.
 - **Arc électrique** : L'arc est généralement coupé dans l'huile ou dans des ampoules à vide pour réduire l'usure des contacts.
 - **Emplacement** : Souvent logé dans une cuve séparée remplie d'huile pour ne pas contaminer l'huile principale du transformateur avec les résidus de carbone issus des arcs.
- [10]

Par souci de clarté, l'enroulement primaire est représenté en deux sections. Seules trois prises sont visibles à l'autre extrémité de cet enroulement; la prise sélectionnée du transformateur est reliée à l'autre ligne par un mécanisme de commutation double.

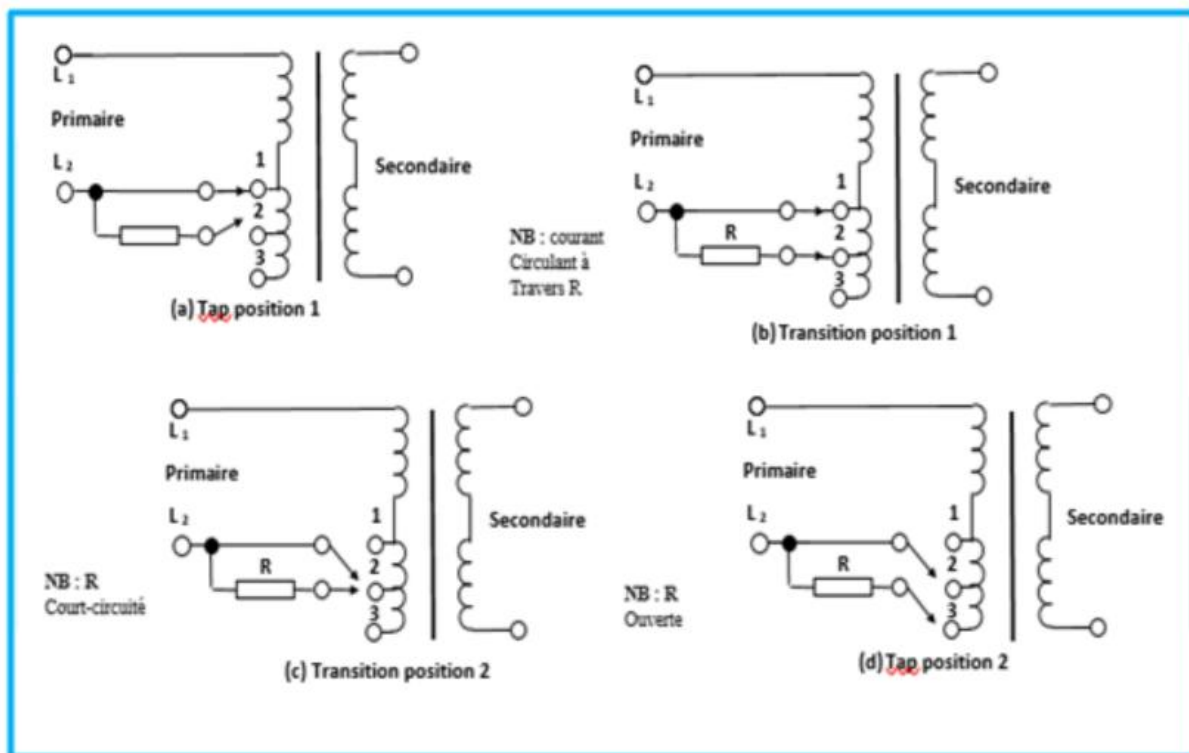


Figure I.4: Schéma de l'OLTC à résistances

Erreur ! Source du renvoi introuvable. **(a)**, l'une des lignes d'alimentation est connectée à la prise 1. L'autre partie du mécanisme de commutation est en circuit ouvert.

Erreur ! Source du renvoi introuvable. **(b)**, la commutation a été amorcée. La seconde partie du commutateur a connecté la résistance de faible valeur R à la prise 2. La différence de potentiel entre les prises 1 et 2 induit un courant de circulation dans la résistance.

Erreur ! Source du renvoi introuvable. **(c)**, le mécanisme de commutation a été connecté à la prise 2. La résistance R a été court-circuitée.

Erreur ! Source du renvoi introuvable. **(d)**, la résistance R est à nouveau isolée par le mécanisme de commutation. L'alimentation des lignes de transmission n'est pas interrompue, mais l'entrée du transformateur a été basculée sur une autre prise.



Figure I.5: Commutation des prises en charge sur une seule phase.

La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** illustre la commutation des prises en charge pour une seule phase. Dans un réseau triphasé, il existe évidemment trois systèmes de ce type, fonctionnant simultanément [14].

b. OLTC à Réacteurs (Type à impédance) [12], [13]

Se caractérise par une structure simple et un nombre d'étages de régulation de tension doublé à nombre de prises constant. De plus, il peut être alimenté par un moteur.

Très utilisé en Amérique du Nord et pour les applications à forte intensité.

- **Mécanisme de transition** : Il utilise des bobines d'inductance (réacteurs) pour limiter le courant de circulation.

- **Fonctionnement continu** : Contrairement aux résistances, les réacteurs peuvent rester en circuit pendant une durée indéterminée. Cela permet au transformateur de fonctionner sur une position "pontée" (entre deux prises), doublant ainsi le nombre de paliers de tension disponibles.
- **Vitesse d'action** : La commutation est beaucoup plus lente car il n'y a pas de risque de brûler l'élément de transition.
- **Taille** : Le dispositif est généralement plus encombrant car les réacteurs sont des composants magnétiques lourds.

La bobine **C** à point milieu à la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** empêche le court-circuit dans l'enroulement à point milieu. Les prises du transformateur sont connectées aux segments 1 à 5.

Pour modifier la prise du transformateur, la séquence d'opérations suivante sera effectuée étape par étape. Les étapes à suivre pour modifier la prise sont illustrées dans la figure ci-dessous.

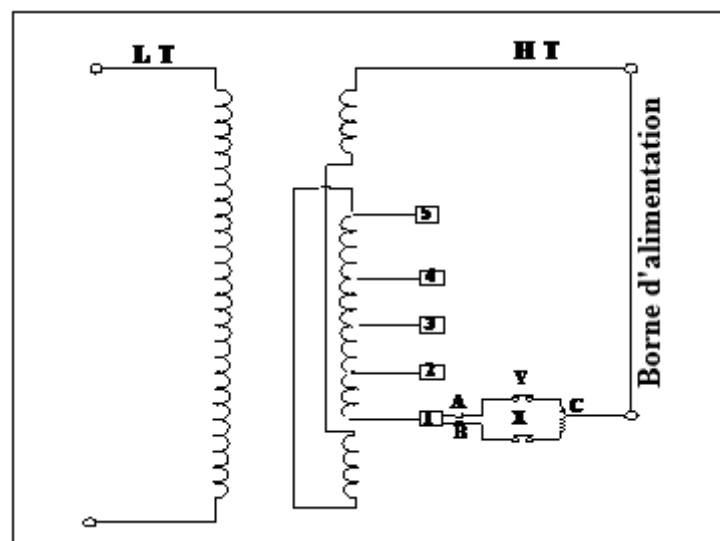


Figure I.1: Schéma du OLTC à impédance

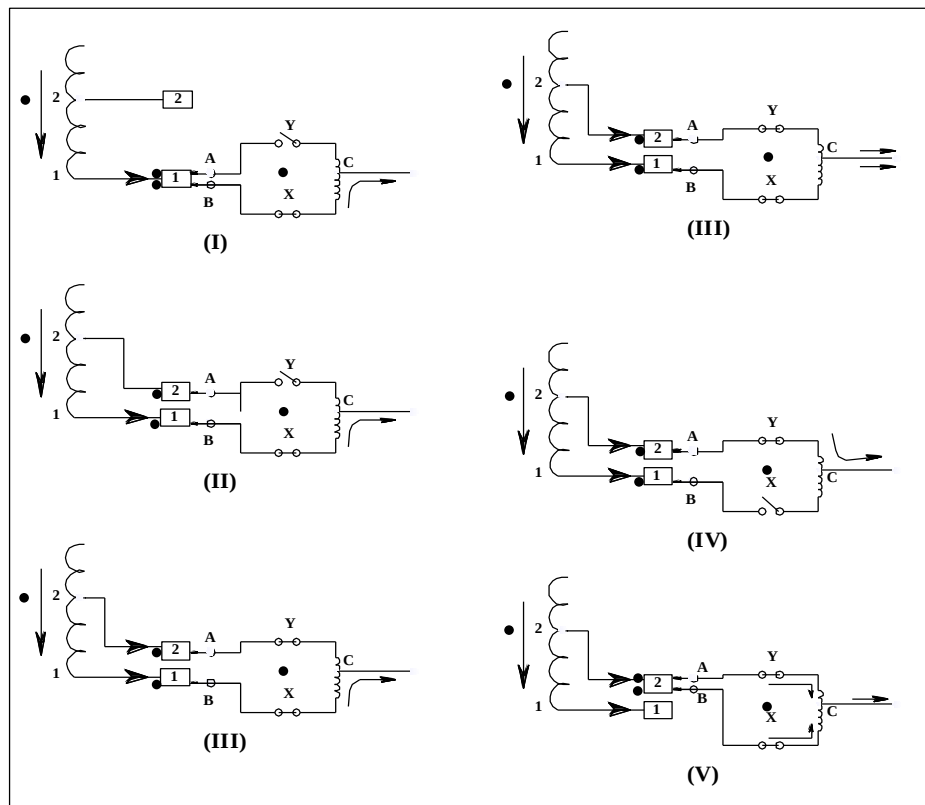


Figure I.7: Schéma de la circulation du courant

Étape 1 : Ouvrir l'interrupteur y

Le courant circule alors entièrement à travers l'interrupteur x et la partie inférieure du réacteur C. Ce dernier devient donc fortement inductif, engendrant une chute de tension importante. Le réacteur C doit être dimensionné pour supporter momentanément le courant de pleine charge.

Étape 2 : Déplacer le doigt B

L'interrupteur y étant ouvert, le doigt B ne transporte aucun courant et peut être déplacé vers le segment 2 sans risque d'étincelles.

Étape 3 : Fermer l'interrupteur y

Fermez maintenant l'interrupteur y. L'enroulement du transformateur entre les prises 1 et 2 est alors connecté via la réactance C. L'impédance de la réactance étant élevée pour un courant unidirectionnel, le courant circulant dans la réactance, le doigt A et le doigt B sera très faible. Ainsi, la réactance empêche tout court-circuit de l'enroulement connecté.

Étape 4 : Ouvrir l'interrupteur x

Le courant circulera alors entièrement depuis la partie supérieure du réacteur, provoquant une chute de tension importante à ses bornes.

Étape 5 : Déplacer le doigt A

L'interrupteur x étant ouvert, le doigt A n'est parcouru par aucun courant et peut être déplacé vers le segment 2 sans risque d'étincelles.

IV. Techniques classiques de régulation de tension

La régulation de tension constitue une fonction essentielle dans les réseaux électriques afin de maintenir la tension dans des limites admissibles malgré les variations de charge et les perturbations du réseau. Dans les postes électriques et les systèmes de production d'énergie, plusieurs techniques classiques sont utilisées pour assurer la stabilité de la tension et améliorer la qualité de l'alimentation électrique [6].

IV.1. Régulateur automatique de tension (AVR)

Le régulateur automatique de tension, appelé AVR (*Automatic Voltage Regulator*), est un dispositif de commande utilisé principalement dans les générateurs synchrones et certains systèmes de transformation afin de maintenir une tension de sortie constante.

Le principe de fonctionnement de l'AVR repose sur la comparaison entre la tension mesurée et une tension de référence. Lorsque la tension de sortie diminue en dessous de la valeur souhaitée, le régulateur augmente le courant d'excitation afin de compenser cette baisse. À l'inverse, lorsque la tension devient supérieure à la consigne, l'AVR réduit le courant d'excitation [6].

L'AVR permet :

- d'améliorer la stabilité de tension ;
- de réduire les fluctuations dues aux variations de charge ;
- d'augmenter la qualité de l'énergie électrique ;
- de renforcer la stabilité dynamique du réseau.

Les régulateurs AVR modernes utilisent généralement des correcteurs PI ou PID afin d'obtenir une réponse rapide et précise.

IV.2. Régulation par droop (Contrôle de pente)

La méthode de régulation par droop est largement utilisée dans les systèmes électriques comportant plusieurs générateurs ou transformateurs fonctionnant en parallèle. Cette technique

consiste à introduire une relation proportionnelle entre la variation de tension et la puissance réactive fournie par le système [15].

Le principe du droop repose sur une légère diminution volontaire de la tension lorsque la charge augmente. Cette caractéristique permet un partage équilibré de la puissance réactive entre plusieurs unités sans nécessiter de communication complexe entre les équipements.

Cette méthode présente plusieurs avantages :

- simplicité de mise en œuvre ;
- stabilité du partage de charge ;
- réduction des interactions entre les unités parallèles.

Cependant, elle entraîne une légère déviation permanente de la tension par rapport à la valeur nominale.

IV.3. Contrôle des transformateurs avec OLTC

Les transformateurs équipés d'un changeur de prises en charge OLTC (*On Load Tap Changer*) constituent l'une des solutions les plus utilisées pour la régulation de tension dans les réseaux de transport et de distribution.

Le système OLTC permet de modifier le rapport de transformation sans interrompre l'alimentation électrique. Le régulateur surveille continuellement la tension secondaire du transformateur et commande automatiquement le changement de prise lorsque la tension dépasse les limites définies [5].

Le principe de régulation consiste à :

- augmenter le nombre de spires lorsque la tension secondaire diminue.
- diminuer le nombre de spires lorsque la tension secondaire augmente.

Le contrôle des transformateurs OLTC permet :

- le maintien automatique de la tension.
- l'amélioration de la qualité de service.
- la compensation des variations de charge.
- la réduction des pertes dans le réseau.

Toutefois, les changements fréquents de prises peuvent provoquer une usure mécanique des contacts du système OLTC, ce qui nécessite une maintenance périodique.

Les techniques classiques de régulation de tension demeurent largement utilisées dans les réseaux électriques en raison de leur simplicité, de leur robustesse et de leur efficacité. Elles constituent

également la base de développement des méthodes de commande avancées utilisées dans les réseaux intelligents modernes [6].

V. Commandes avancées pour la régulation de tension des transformateurs de puissance

Dans les postes électriques de distribution, la régulation de tension constitue un enjeu essentiel pour garantir la stabilité du réseau électrique et assurer une alimentation conforme aux exigences des charges. Les méthodes de commande modernes appliquées aux transformateurs de puissance visent à améliorer les performances dynamiques, réduire les erreurs de régulation et renforcer la robustesse face aux perturbations du réseau [7].

V.1. Régulateurs PI et PID

Les régulateurs proportionnel-intégral (PI) et proportionnel-intégral-dérivé (PID) figurent parmi les stratégies de commande les plus utilisées dans les systèmes industriels en raison de leur simplicité de mise en œuvre et de leur efficacité. Dans les systèmes de régulation de tension des transformateurs, le régulateur PI permet d'éliminer l'erreur statique tout en assurant une bonne stabilité du système. Le régulateur PID améliore davantage les performances dynamiques grâce à l'action dérivée qui permet d'anticiper les variations rapides de la tension [7].

Ces régulateurs sont souvent utilisés dans les systèmes de changement de prises en charge (OLTC – On Load Tap Changer) afin de maintenir la tension secondaire du transformateur proche de la valeur de référence malgré les fluctuations de charge. Cependant, les performances des régulateurs classiques peuvent se dégrader dans les systèmes fortement non linéaires ou soumis à des perturbations importantes [6].

V.2. Commandes adaptatives

Les techniques de commande adaptative ont été développées afin d'améliorer les performances des systèmes dont les paramètres varient dans le temps. Dans le cas des transformateurs de puissance, les variations de charge, les changements des conditions du réseau et les phénomènes thermiques peuvent modifier les caractéristiques dynamiques du système.

La commande adaptative ajuste automatiquement les paramètres du régulateur en fonction de l'évolution du système, ce qui permet d'obtenir une meilleure robustesse et une meilleure précision de régulation. Ces méthodes sont particulièrement intéressantes dans les réseaux électriques modernes intégrant des sources d'énergie renouvelables, où les variations de tension sont plus fréquentes [15].

V.3. Commande floue (Fuzzy Logic Control)

La logique floue constitue une approche intelligente inspirée du raisonnement humain. Contrairement aux régulateurs classiques nécessitant un modèle mathématique précis, la commande floue utilise un ensemble de règles linguistiques de type « SI-ALORS » pour contrôler le système [16].

Dans les applications de régulation de tension, les contrôleurs flous permettent de gérer efficacement les non-linéarités et les incertitudes du réseau électrique. Plusieurs travaux ont montré que les régulateurs flous offrent de meilleures performances dynamiques et une réduction des oscillations de tension par rapport aux régulateurs PI conventionnels.

V.4. Commande prédictive (MPC – Model Predictive Control)

La commande prédictive basée sur un modèle (MPC) représente l'une des techniques de commande avancées les plus performantes dans les systèmes électriques modernes. Cette méthode utilise un modèle mathématique du système afin de prédire l'évolution future des variables de commande sur un horizon temporel donné.

Dans les systèmes de régulation de tension des transformateurs, la MPC permet d'optimiser les actions de commande tout en respectant les contraintes physiques du système, telles que les limites des prises du transformateur ou les contraintes de stabilité du réseau. Grâce à sa capacité d'anticipation, la commande MPC améliore considérablement la rapidité de réponse et réduit les variations de tension [17].

Toutefois, cette méthode nécessite une puissance de calcul plus importante ainsi qu'un modèle précis du système, ce qui peut compliquer son implantation dans certaines applications industrielles.

VI. Conclusion

Dans ce chapitre, une étude des transformateurs de puissance et des principales techniques de régulation de tension a été présentée. Les transformateurs à prise ajustable ainsi que les systèmes OLTC ont été étudiés en raison de leur rôle important dans le maintien de la stabilité de la tension dans les réseaux électriques.

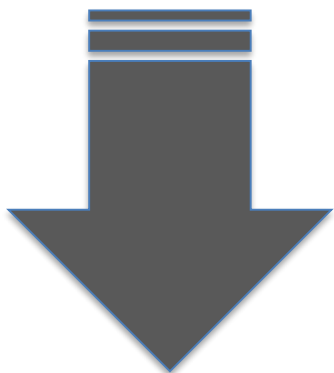
Les techniques classiques de régulation, telles que l'AVR, le contrôle par droop et la commande des transformateurs avec OLTC, ont également été abordées. De plus, les commandes avancées comme les régulateurs PI/PID, la logique floue, les commandes adaptatives et la commande

prédictive MPC ont été présentées afin d'améliorer les performances et la robustesse des systèmes électriques.

Cette étude bibliographique constitue une base théorique pour la modélisation et la commande du transformateur de puissance qui seront développées dans les chapitres suivants.

Chapitre II:

Étude et modélisation du système de régulation de tension



II.1 Introduction

Dans les réseaux électriques, les variations de charge et l'impédance des lignes provoquent des chutes de tension pouvant affecter la qualité de l'alimentation électrique. Afin de maintenir la tension dans les limites admissibles, les transformateurs de puissance utilisent des systèmes de régulation, notamment le régleur en charge (OLTC).

Ce chapitre présente les causes de la chute de tension ainsi que les méthodes de régulation utilisées dans les réseaux électriques. Ensuite, la modélisation du transformateur de puissance et du régleur en charge sera développée en vue de l'étude et de la simulation du système sous MATLAB/Simulink.

II.2 Chute de tension dans les réseaux électriques

II.2.1 Définition de la chute de tension

La chute de tension correspond à la diminution de la tension électrique entre le point de production et le point d'utilisation dans un réseau électrique. Elle est principalement causée par l'impédance des lignes et des équipements traversés par le courant électrique.

Dans les réseaux de distribution, la chute de tension influence directement la qualité de l'énergie électrique. Une tension inférieure à la valeur nominale peut entraîner un mauvais fonctionnement des équipements électriques, une augmentation des pertes ainsi qu'une réduction des performances des installations industrielles et domestiques. Il est donc nécessaire de maintenir la tension dans des limites admissibles afin d'assurer la stabilité et la fiabilité du réseau électrique.

II.2.2 Causes de la chute de tension

La chute de tension dans les réseaux électriques est provoquée par plusieurs facteurs liés aux caractéristiques du réseau et aux conditions d'exploitation.

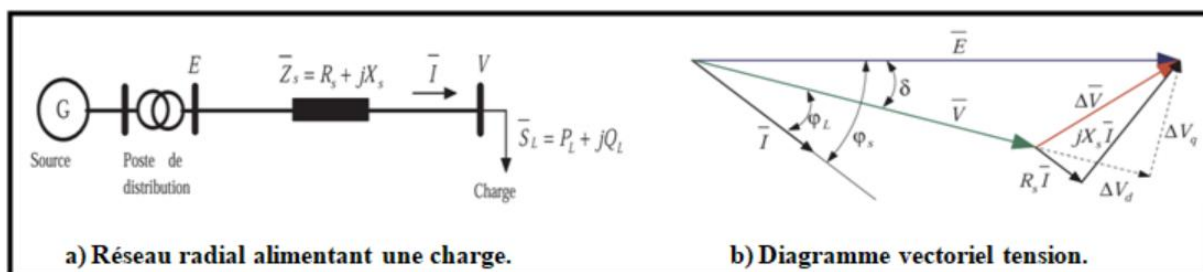


Figure 0.1 : Chute de tension dans une ligne.

Le réseau représenté par la Figure 0.1 correspond à une charge alimentée par un poste de distribution à travers une ligne d'impédance :

$$\bar{Z}_s = R_s + jX_s \quad (0.1)$$

Chapitre II:

Étude et modélisation du système de régulation de tension

La charge absorbe une puissance active P_L et une puissance réactive Q_L .

La tension au poste de distribution est supposée constante et elle est notée $\bar{E}$, tandis que la tension aux bornes de la charge est notée par $\bar{V}$. Si on note par $\bar{I}$ le courant absorbé par la charge sous tension $\bar{V}$, alors la chute de tension dans la ligne sera donnée par :

$$\Delta \bar{V} = \bar{E} - \bar{V} = \bar{Z} \cdot \bar{I} \quad (0.2)$$

Or, le courant peut être écrit en fonction des puissances absorbées comme :

$$\bar{I} = \frac{S^*_L}{\bar{V}} = \frac{P_L - jQ_L}{\bar{V}} \quad (0.3)$$

En remplaçant dans l'équation (II.2), la chute de tension s'écrit :

$$\Delta \bar{V} = (\mathbf{R}_S + j\mathbf{X}_S) \left(\frac{P_L - jQ_L}{\bar{V}} \right) = \frac{R_S P_L + X_S Q_L}{\bar{V}} + j \frac{X_S P_L - R_S Q_L}{\bar{V}} \quad (0.4)$$

Cette équation montre que la chute de tension dépend de deux paramètres ;

- ✓ Les puissances active et réactive absorbées par la charge.
- ✓ L'impédance de la ligne.

D'après le diagramme vectoriel sur la Figure 0.1.b, cette chute de tension a une composante directe par rapport à $\bar{V}$, notée V_d (en phase avec $\bar{V}$) et une composante en quadrature V_q (déphasée de 90° par rapport à $\bar{V}$). Ainsi, si on prend V comme référence des phases, on peut écrire :

$$\Delta \bar{V} = \frac{R_S P_L + X_S Q_L}{V} + j \frac{X_S P_L - R_S Q_L}{V} = \Delta V_d + j \Delta V_q \quad (0.5)$$

Maintenant, d'après le diagramme de la Figure 0.1.b on peut déduire que :

$$E = \sqrt{(V + \Delta V_d)^2 + \Delta V_q^2} = \sqrt{\left(V + \frac{R_S P_L + X_S Q_L}{V} \right)^2 + \left(\frac{X_S P_L - R_S Q_L}{V} \right)^2} \quad (0.6)$$

Les principales causes sont les suivantes :

- ✓ **Variation des charges** : l'augmentation de la demande en puissance entraîne une augmentation du courant circulant dans les lignes, ce qui provoque une chute de tension plus importante.
- ✓ **Longueur et impédance des lignes** : plus les lignes électriques sont longues, plus leur résistance et leur réactance augmentent, ce qui accentue les pertes de tension entre la source et les charges.
- ✓ **Puissance réactive** : la circulation de la puissance réactive dans le réseau entraîne une augmentation des chutes de tension, notamment dans les réseaux fortement inductifs.
- ✓ **Déséquilibre du réseau** : une répartition inégale des charges entre les phases provoque des déséquilibres de tension et dégrade la qualité de l'alimentation électrique.

- ✓ **Surcharges** : lorsque le réseau fonctionne au-delà de ses limites nominales, le courant augmente considérablement, ce qui entraîne des chutes de tension importantes ainsi qu'une augmentation des pertes électriques.

II.2.3 Conséquences de la chute de tension

La chute de tension dans les réseaux électriques peut avoir des répercussions importantes sur le fonctionnement des installations et sur la qualité de l'énergie distribuée. Lorsque la tension aux bornes des récepteurs devient inférieure à la valeur nominale, certains équipements électriques peuvent fonctionner dans des conditions dégradées. Les moteurs électriques, par exemple, subissent une diminution de leur couple de démarrage et une augmentation du courant absorbé, ce qui peut entraîner un échauffement excessif et une réduction de leur durée de vie.

Par ailleurs, la chute de tension est généralement accompagnée d'une augmentation du courant circulant dans les lignes afin de satisfaire les besoins en puissance des charges. Cette augmentation du courant provoque une élévation des pertes par effet Joule, exprimées par :

$$p_j = RI^2 \quad (0.7)$$

où p_j représente les pertes Joule, (R) la résistance de la ligne et (I) le courant qui la traverse. Ces pertes se traduisent par une diminution du rendement global du réseau et une augmentation des coûts d'exploitation.

Enfin, des niveaux de tension insuffisants dégradent la qualité de service offerte aux consommateurs. Les fluctuations de tension peuvent entraîner des dysfonctionnements des équipements sensibles, une baisse des performances des installations industrielles ainsi qu'une diminution du confort des utilisateurs. Il est donc essentiel de maintenir la tension dans les limites admissibles afin de garantir la fiabilité, la stabilité et la qualité de l'alimentation électrique.

II.3 Méthodes de régulation de tension

II.3.1 Techniques classiques de régulation

II.3.1.1 Réglage de la tension

Le réglage de la tension consiste à maintenir un niveau de tension acceptable aux niveaux de tous les jeux de barres du réseau. L'équation (II.6) montre que le niveau de tension à un jeu de barres donné dépend de la tension de source qui l'alimente, de la réactance de ligne qui le sépare de cette source et des puissances active et réactive à son niveau. Ainsi, si la tension au jeu de barres en question n'est pas dans une limite acceptable, des modifications sur un ou plusieurs de ces paramètres sont alors nécessaires.

Chapitre II:

Étude et modélisation du système de régulation de tension

➤ Réglage directe

Il consiste à agir directement sur la tension elle-même (Figure 0.2 : Réglage directe de la tension).

Dans cette catégorie, le réglage de la tension de charge V est réalisé soit par la modification de la tension V elle-même, soit par la modification de la tension de source E . Parmi les solutions qu'on peut trouver dans cette catégorie, il y a :

- ✓ La correction du niveau de la tension V , qui fait appel à un autotransformateur (Tap-load changer) aux niveaux des postes de distribution.
- ✓ La correction du niveau de la tension E , soit par autotransformateurs s'il s'agit d'une tension à la sortie d'un poste source, soit par modification de l'excitation s'il s'agit de la tension à la sortie d'un alternateur.

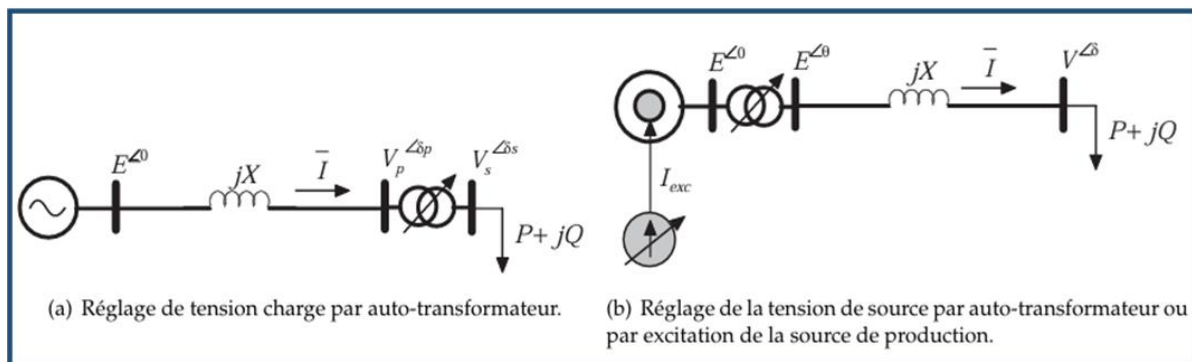


Figure 0.2 : Réglage directe de la tension

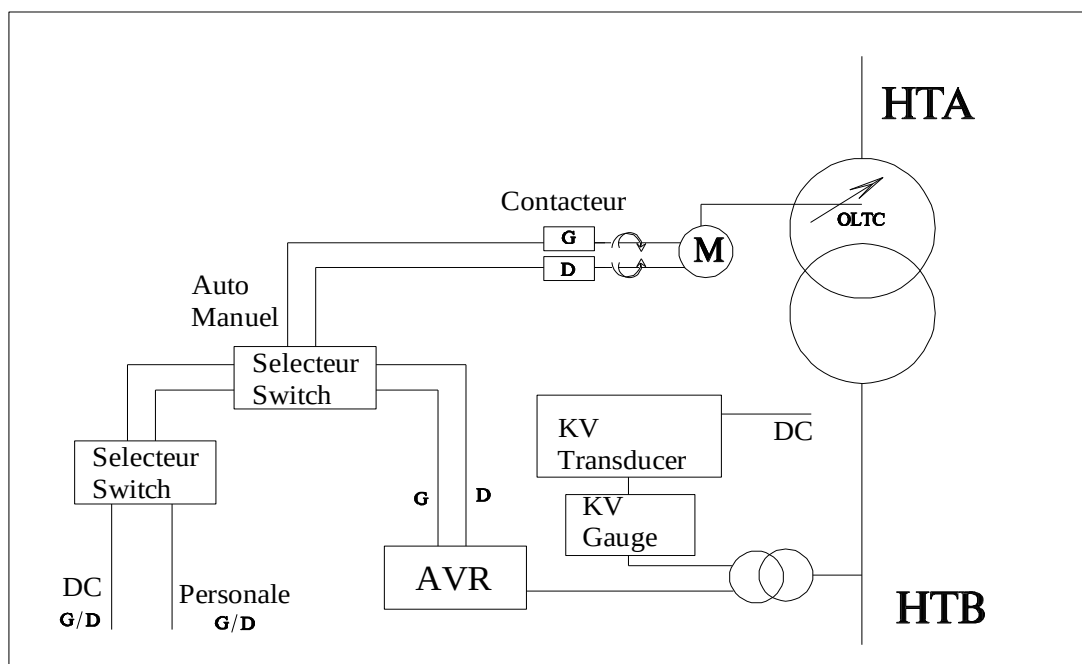


Figure II.3 : Diagramme de Régleur en charge (OLTC)

➤ Réglage indirecte

Dans cette catégorie on trouve un ensemble de solutions pour modifier la chute de tension en modifiant les caractéristiques des charges ou du réseau. Principalement, ces solutions consistent à utiliser des compensateurs pour modifier l'écoulement de puissance réactive. Les solutions qu'on peut trouver dans cette catégorie sont :

- ✓ La compensation de puissance réactive : D'après l'équation (II.5), la puissance réactive est en grande partie responsable des chutes de tension. Ainsi, la compensation d'une partie de la puissance réactive demandée par la charge permet de réduire ces chutes de tensions.
- ✓ Les compensateurs de puissance réactive peuvent être statique comme les batteries de condensateurs, les FACTS (Flexible Alternating Current Transmission systems), et parfois même des inductances. Le moteur synchrone peut être utilisé comme compensateur dynamique de puissance réactive. En effet, ce type de moteur produit de la puissance réactive quand il est sur-excité et en consomme lorsqu'il est sous-excité.
- ✓ Modification de la réactance de la ligne : Toujours d'après l'équation (II.5), on peut remarquer qu'il est possible de modifier les chutes de tension en modifiant la réactance de la ligne X .

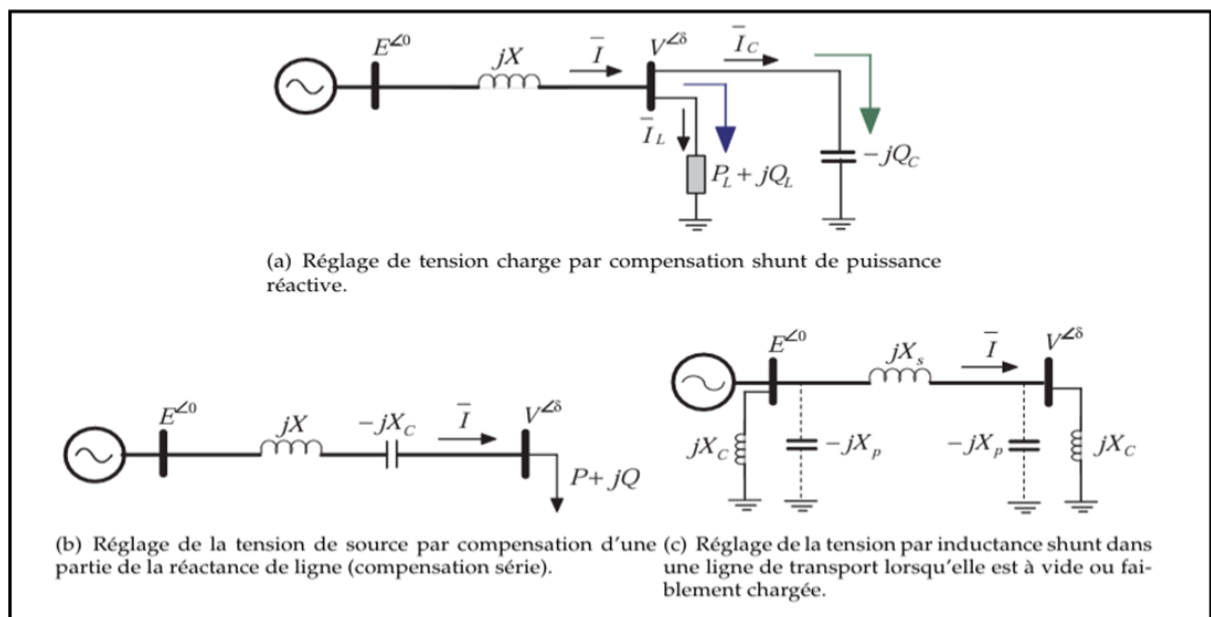


Figure II.4: Réglage indirecte de la tension par compensation en utilisant des condensateurs ou des inductances.

II.3.2 Régulation côté distribution (ou charge)

II.3.2.1 Prises à vide du transformateur HTB /BT :

Généralement, les transformateurs **HTB/BT** sont munis des prises en nombre de 5 (0, 1, 2, 3, 4). Le changement manuel des prises des transformateurs **HTB /BT** est également une solution existante pour augmenter ou diminuer la tension dans un endroit bien identifié.

Cette intervention peut être réalisée soit pendant l'arrivée de la période d'été soit lors de l'arrivée de la période d'hiver où la demande de puissance chute par rapport à la période d'été. Cette solution n'est pas adaptée aux variations fréquentes de tension dans le réseau de distribution.

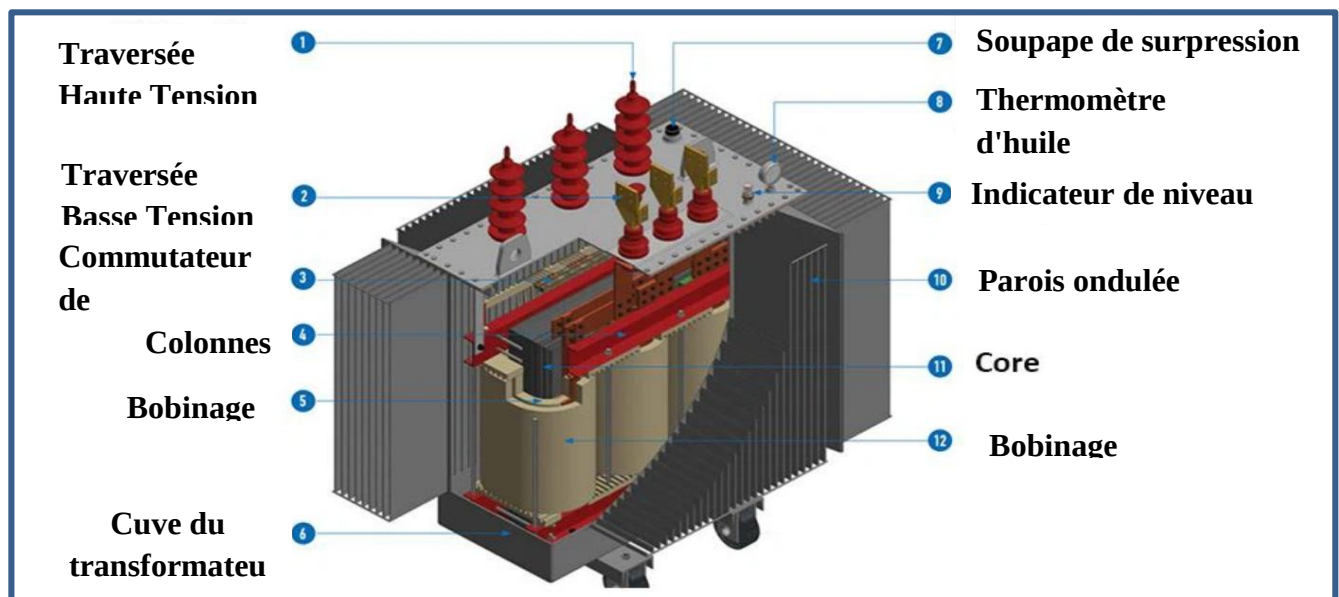


Figure II.6 Transformateur HTA/BT à prises à vide

II.3.2.2 Batteries condensateurs

La circulation de l'énergie réactive a des incidences techniques sur le choix des matériels, le fonctionnement des réseaux et par conséquent des incidences économiques.

La circulation de l'énergie réactive sur les réseaux électriques de transport et distribution entraîne :

- ✓ Des surcharges au niveau des transformateurs.
- ✓ Des chutes de tension en bout de ligne.
- ✓ L'échauffement des câbles des lignes, par conséquent des pertes d'énergie active.
- ✓ Le surdimensionnement des protections lié aux harmoniques.

Le mode de compensation dépend du plan de tension adapté, le gestionnaire de réseau installe des batteries condensateurs (gradins) au niveau des postes 60/30kV et aux niveaux des postes HTB/BT et des postes clients HTB (batteries fixes).

La Figure II.6 montre l'emplacement des batteries condensateurs sur le réseau de distribution.

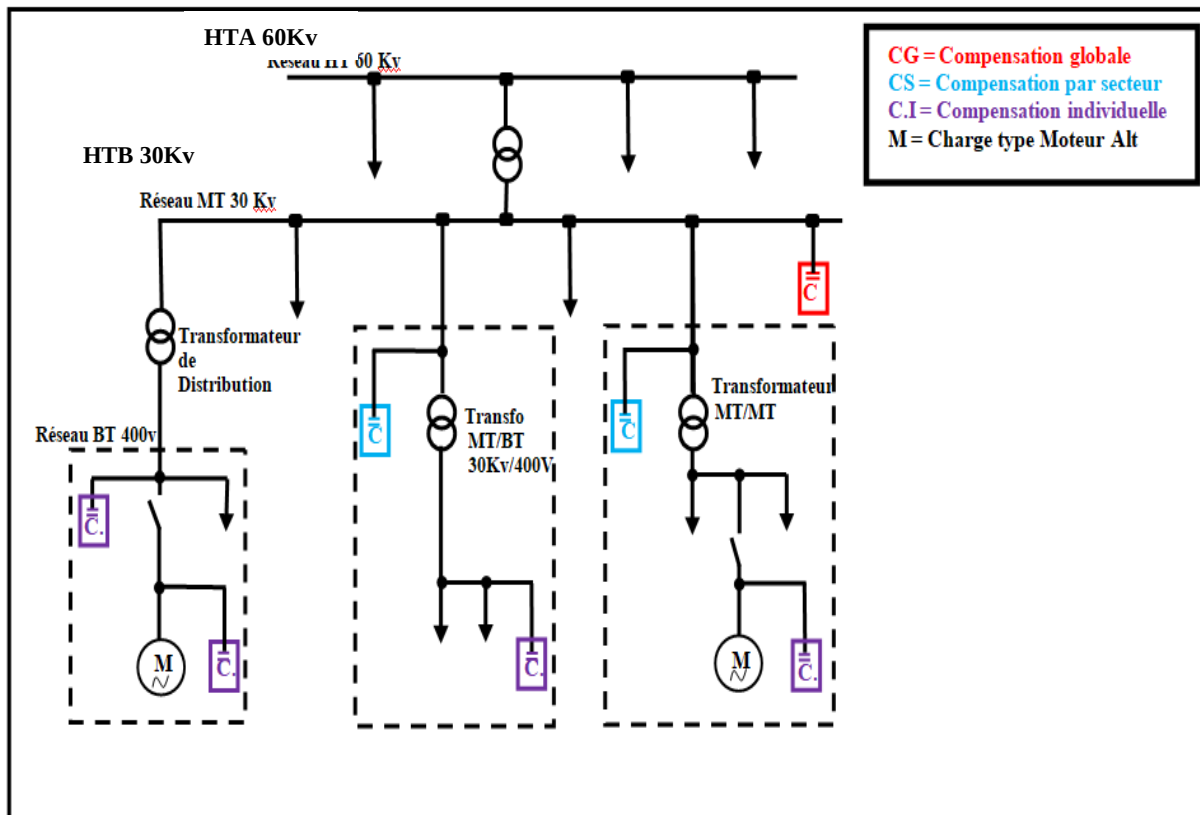


Figure II.6: Emplacement des batteries condensateurs sur le réseau de distribution.

Détermination de la zone d'implantation

Suivant l'architecture de l'installation, la localisation et la puissance des récepteurs consommant du réactif on peut réaliser :

- ✓ **Compensation Globale (CG) :** Au niveau du jeu de barre 30 kV, privilégier une batterie automatique ou dynamique.
- ✓ **Compensation par Secteur (CS) :** Au niveau des tableaux divisionnaires (TD) exemple: TD atelier privilégier une batterie automatique ou dynamique.
- ✓ **Compensation Individuelle (C.I) :** Au plus près de la charge consommatrice de l'énergie réactive suivant la variation des charges une batterie fixe, [18].

Tableau 0.1: Avantages et inconvénients des différentes méthodes d'implantation des batteries condensateurs.

	COMPENSATION GLOBALE	COMPENSATION PAR SECTEUR	COMPENSATION INDIVIDUELLE
AVANTAGES	Suppression de la facturation d'énergie réactive	Suppression de la facturation d'énergie réactive	Suppression de la facturation d'énergie réactive
	Augmentation de la puissance disponible au secondaire du transformateur	Réduction des pertes en ligne entre le transformateur et les TD secteur	Réduction des pertes sur toute la ligne entre le transformateur et la charge
	Solution la plus économique	Solution économique	Compensation d'énergie réactive au plus près des appareils consommant du réactif.
INCONVENIENTS	Pas de réduction de pertes en ligne (chutes de tension pour les charges éloignées de la batterie de condensateurs)	Solution généralement utilisée pour réseau usine très étendu	Solution la plus onéreuse compte tenu de la multiplicité des installations
	Pas d'économies sur le dimensionnement des équipements électriques		

Les bancs de condensateur installés au poste source permettent d'injecter la puissance réactive au jeu de barre 30 kV. La puissance réactive injectée est exprimée par l'équation :

$$Q_C = \omega \cdot C_{eq} \cdot U^2 \quad (0.8)$$

Où

Q_C : est la puissance réactive injectée par le condensateur en MVAR.

ω : est la pulsation du réseau $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, (soit 314.16 rad/s) pour un réseau à 50 Hz.

C_{eq} : est la capacité équivalente par phase.

La puissance réactive injectée par le condensateur est capable de compenser la puissance réactive transférée via le transformateur et donc réduire le transit de puissance réactive depuis le réseau amont. La compensation par les bancs de condensateurs permet d'améliorer le facteur de puissance vis-à-vis du réseau de transport et donc d'y réduire les chutes de tension. Cela permet aussi de diminuer les pertes actives du réseau de transport puisqu'il y a moins de transits de courant.

Les condensateurs sont des moyens de compensation et non de pilotage de la tension. De ce fait, le condensateur seul n'est pas un moyen fiable pour répondre à une variation rapide du profil de tension due au caractère intermittent de la production décentralisée [19].

Les bancs de condensateurs sont utilisés pour corriger le facteur de puissance dans le cas de fortes charges inductives. Le but est de compenser la somme de puissance réactive absorbée par le réseau MT et par le transformateur HTB/HTA. Ainsi, le banc de condensateur permet de compenser cette puissance réactive consommée en mettant en service le bon nombre d'éléments pour une compensation optimale toutes les 10min.

Un régulateur automatique de tension (AVR) joue un rôle essentiel dans le réseau électrique. Ceci encourage les efforts visant à améliorer les performances de l'AVR et à garantir une réponse efficace et stable aux variations transitoires de la tension aux bornes. La technique de contrôle la plus courante et largement utilisée par les chercheurs pour améliorer la capacité de l'AVR à maintenir une meilleure réponse est le régulateur proportionnel-intégral-dérivé (PID) classique. Ce contrôle présente une conception simple et permet de gérer les variations du réseau.

II.3.3 Régulation par changement de prises

La régulation de tension par changement de prises est l'une des méthodes les plus utilisées dans les réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique. Elle consiste à modifier le rapport de transformation du transformateur afin de maintenir la tension secondaire dans une plage de valeurs prédéfinie malgré les variations de charge ou les fluctuations de la tension du réseau.

Le dispositif permettant cette régulation est appelé changeur de prises ou régleur en charge (On-Load Tap Changer – OLTC). Il est généralement installé sur l'un des enroulements du transformateur et permet de modifier le nombre effectif de spires sans interrompre l'alimentation des charges.

II.3.3.1 Principe du changeur de prises

Le principe de fonctionnement du changeur de prises repose sur la modification du nombre de spires actives de l'enroulement du transformateur. En augmentant le nombre de spires, la tension secondaire diminue, tandis qu'une diminution du nombre de spires entraîne une augmentation de la tension secondaire.

Le rapport de transformation du transformateur est défini par :

$$m = \frac{N_2}{N_1} \quad (0.9)$$

où :

N_1 est le nombre de spires de l'enroulement primaire.

N_2 est le nombre de spires de l'enroulement secondaire.

m est le rapport de transformation.

Ainsi, toute modification du nombre de spires réalisée par le changeur de prises entraîne une variation du rapport de transformation et, par conséquent, de la tension délivrée au secondaire.

Cette technique permet de compenser efficacement les chutes de tension dans le réseau et d'assurer le maintien de la tension aux bornes des charges dans les limites réglementaires.

Le transformateur à prise ajustable, ou transformateur avec régleur en charge, est l'organe moteur de la régulation de tension dans un poste 60/30 kV.

II.3.3.2 Caractéristiques de fonctionnement

- ✓ Rapport de transformation variable : Contrairement à un transformateur fixe, l'OLTC permet de modifier le nombre de spires actives sur l'un des enroulements (généralement le côté haute tension) sans interrompre le flux d'énergie.
- ✓ Relation des tensions : Les tensions aux bornes des enroulements sont des tensions simples liées par le rapport de transformation.
- ✓ Déphasage : Il est important de noter que les tensions secondaires sont déphasées de 30° par rapport aux tensions primaires.

Le régleur en charge (*On-Load Tap Changer – OLTC*) est un dispositif intégré au transformateur permettant de modifier le rapport de transformation sans interrompre l'alimentation des charges. Son rôle principal est de maintenir la tension secondaire à une valeur proche de la tension de consigne malgré les variations de charge ou les fluctuations de la tension du réseau.

Le fonctionnement de l'OLTC repose sur la sélection de différentes prises situées sur l'un des enroulements du transformateur. Lorsque la tension mesurée s'écarte de la plage admissible, un régulateur de tension envoie un ordre de changement de prise. Le mécanisme du régleur déplace alors le contact mobile vers une prise supérieure ou inférieure afin de corriger la tension.

Afin d'éviter toute interruption du courant ou tout court-circuit entre prises adjacentes, le changement de prise est réalisé à l'aide d'un système de commutation comportant des résistances ou des réactances de transition. Ce dispositif assure un transfert progressif du courant entre les prises pendant l'opération de commutation.

Les régulateurs en charge offrent généralement plusieurs positions de réglage, permettant une variation de la tension autour de sa valeur nominale par pas successifs. Cette caractéristique confère au transformateur une grande capacité d'adaptation aux conditions d'exploitation du réseau et contribue à l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique distribuée.

II.3.3.3 Influence du régulateur en charge sur la tension secondaire

Le régulateur en charge agit directement sur la tension secondaire du transformateur en modifiant son rapport de transformation. Lorsque la tension secondaire devient inférieure à la valeur de consigne, le régulateur sélectionne une prise permettant d'augmenter la tension. À l'inverse, lorsque la tension dépasse la valeur souhaitée, il commute vers une autre prise afin de réduire la tension délivrée.

La tension secondaire est liée au rapport de transformation par la relation :

$$U_2 = U_1 \frac{N_2}{N_1} \quad (0.10)$$

où :

U_1 : est la tension primaire ;

U_2 : est la tension secondaire ;

N_1 et N_2 représentent respectivement le nombre de spires des enroulements primaire et secondaire.

Ainsi, toute modification du nombre de spires effectives réalisée par le régulateur en charge entraîne une variation de la tension secondaire. Cette action permet de compenser les chutes de tension provoquées par les variations de charge et les conditions d'exploitation du réseau.

Grâce à cette régulation, la tension aux bornes des consommateurs est maintenue dans les limites admissibles, ce qui améliore la qualité de l'énergie électrique et assure le bon fonctionnement des équipements raccordés au réseau.

II.3.3.4 Enjeux du réglage

Le régulateur en charge (OLTC) assure une compensation en temps réel des variations de tension en ajustant automatiquement le rapport de transformation afin de compenser les fluctuations de la charge ou les variations de la tension du réseau amont (60 kV). Cette régulation permet de maintenir la tension secondaire à un niveau proche de la valeur de consigne. Par ailleurs, la technologie « en charge » garantit la continuité de service lors des opérations de changement de prises. En effet, le passage d'une prise à une autre est réalisé à l'aide de résistances ou de réactances de transition, ce qui évite toute interruption du courant ainsi que tout risque de court-circuit entre prises adjacentes.

II.3.4 Augmentation de la tension de départ

L'une des solutions les plus efficaces pour compenser les chutes de tension dans les réseaux de distribution consiste à augmenter la tension de départ au niveau du poste source à l'aide du régulateur en

charge du transformateur. Cette action permet de maintenir une tension satisfaisante aux extrémités du réseau malgré les variations de charge et les pertes de tension dans les lignes.

L'augmentation de la tension de départ contribue directement à la compensation de la chute de tension provoquée par l'impédance des lignes et la circulation des puissances active et réactive. En ajustant le rapport de transformation du transformateur, le régleur en charge adapte la tension secondaire aux conditions d'exploitation du réseau et réduit les écarts entre la tension réelle et la tension de consigne. Cette stratégie permet également de maintenir la tension aux bornes des consommateurs dans les limites admissibles imposées par les normes de qualité de l'énergie électrique. Ainsi, les risques de sous-tension sont réduits, ce qui améliore la continuité de service, le rendement des équipements et la stabilité globale du réseau de distribution.

II.4 Modélisation du transformateur de puissance

II.4.1 Hypothèses de modélisation

Afin de développer un modèle mathématique du transformateur de puissance adapté à l'étude de la régulation de tension, certaines hypothèses simplificatrices sont adoptées. Ces hypothèses permettent de représenter le comportement du transformateur avec une précision suffisante tout en réduisant la complexité du modèle.

Le transformateur est supposé fonctionner en régime sinusoïdal permanent à la fréquence nominale du réseau. Les tensions, courants et flux magnétiques sont ainsi considérés comme des grandeurs sinusoïdales de fréquence constante, ce qui permet l'utilisation de la représentation complexe (phasorielle) pour l'analyse du système.

Le circuit magnétique est supposé linéaire, ce qui signifie que le flux magnétique est proportionnel au courant magnétisant. Les phénomènes de saturation du noyau magnétique ainsi que les effets d'hystérésis sont négligés dans le cadre de cette étude. Cette hypothèse permet de considérer les inductances du transformateur comme constantes.

Par ailleurs, plusieurs simplifications sont retenues afin d'obtenir un modèle exploitable pour la simulation. Les capacités parasites entre spires et entre enroulements sont négligées, de même que les phénomènes transitoires rapides liés aux commutations internes. Les paramètres électriques du transformateur (résistances et réactances) sont supposés constants et indépendants de la température. Enfin, le transformateur est considéré comme équilibré, ce qui permet de limiter l'étude à un modèle monophasé équivalent représentant le fonctionnement du système en régime triphasé équilibré.

Ces hypothèses constituent la base de la modélisation adoptée dans ce travail et permettent d'établir le schéma électrique équivalent du transformateur utilisé dans les simulations de régulation de tension.

II.4.2 Équations électriques du transformateur

Le transformateur est constitué de deux enroulements (ou plus) couplés sur un noyau magnétique, comme à la (Figure II.7)

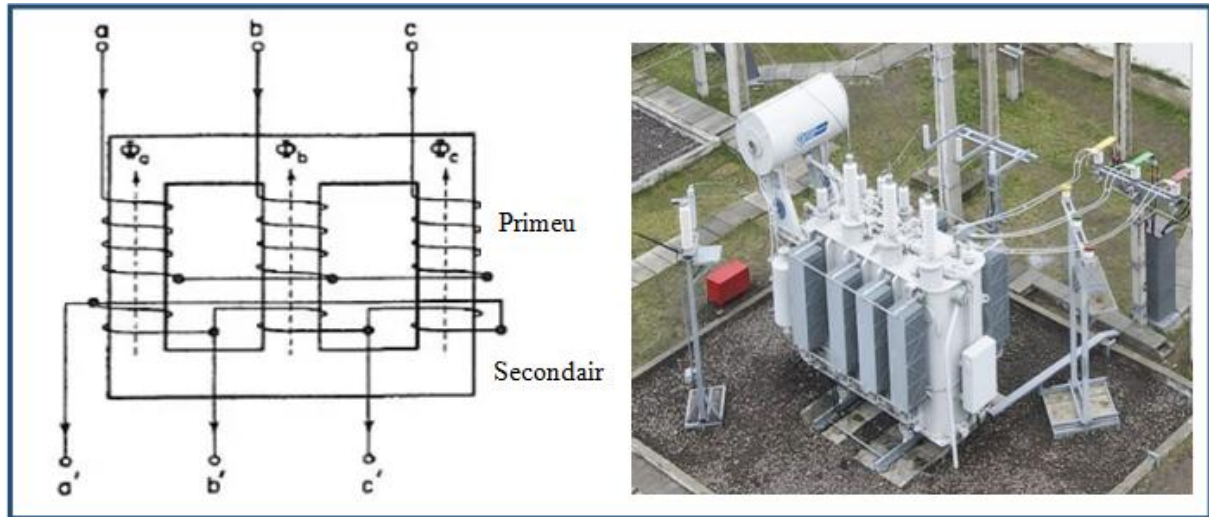


Figure II.7 : Transformateur triphasé

Le coté de la source est appelé le primaire; il comporte n_1 spires, une résistance R_1 et une tension V_1 . Le coté de la charge est appelé le secondaire; il comporte n_2 spires, une résistance R_2 et une tension V_2 . Le flux Φ représente le flux magnétique mutuel entre les deux enroulements. Les signes $\bullet$ indiquent la polarité des tensions selon la convention des points. Par convention, un courant entrant par une borne repérée par $\bullet$ produit un flux positif. [6]

Il faut remarquer qu'il n'existe aucune connexion électrique entre le primaire et le secondaire. Tout le couplage entre les deux enroulements est magnétique.

Lorsqu'on applique une tension alternative à la source, ceci crée un flux alternatif dans le noyau magnétique.

D'après la loi de Faraday, le flux magnétique variable dû au courant du primaire induit une force électromotrice (**f.é.m.**) dans le secondaire.

Le primaire absorbe une puissance.

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (0.11)$$

Le secondaire alimente une charge sous une puissance.

$$P_2 = V_2 I_2 \cos \varphi_2 \quad (0.12)$$

Le flux ϕ est le flux commun aux 2 enroulements, ce flux circule dans le circuit magnétique. Les enroulements sont épais, cela entraîne qu'un certain nombre de lignes de champ se referment dans l'air

Chapitre II:

Étude et modélisation du système de régulation de tension

(Figure 0.8Figure). Ce phénomène est à l'origine du flux de fuite au primaire et au secondaire ϕ_{f1} et ϕ_{f2} respectivement.

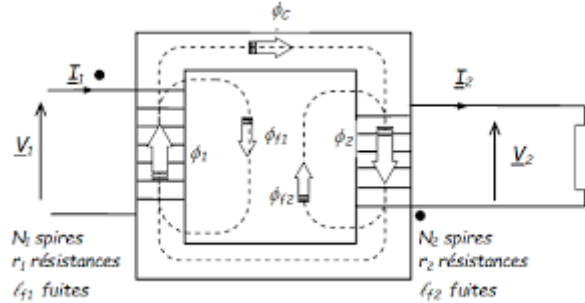


Figure 0.8: Transformateur suppose parfait

Le flux total traversant une spire du primaire est : [7]

$$\bar{\Phi}_1 = \bar{\Phi} + \phi_{f1} \quad (0.13)$$

Le flux total traversant une spire du secondaire est :

$$\bar{\Phi}_2 = \bar{\Phi} + \phi_{f2} \quad (0.14)$$

En régime sinusoïdal (en supposant le circuit magnétique non saturé) :

$$\bar{V}_1 = R_1 \bar{I}_1 + j n_1 \omega \bar{\Phi}_1 \quad (0.15)$$

$$\bar{V}_2 = R_2 \bar{I}_2 + j n_2 \omega \bar{\Phi}_2 \quad (0.16)$$

L'analyse d'un circuit magnétique dans le cadre de l'approximation linéaire d'Hopkinson implique des circuits magnétiques parfaits, c'est-à-dire linéaire (μ_r constant) et exempts de fuites magnétiques.

$$F. m. m = \mathbb{R} \cdot \phi \text{ avec } \mathbb{R} : [H^{-1}] \quad (0.17)$$

$$\mathbb{R} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{S} \quad (0.18)$$

l, S : longueur et section du circuit magnétique et d'après le théorème d'Ampère :

$$\int H \cdot dl = \sum I = n \cdot I = F. m. m \quad (0.19)$$

$$H = \frac{B}{\mu} = \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \cdot \frac{\phi}{S} \quad (0.20)$$

Chapitre II:

Étude et modélisation du système de régulation de tension

$$F. m. m = H. l = \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \cdot \frac{\Phi_1}{S} \Rightarrow \mathbb{R} = \frac{1}{\mu_s} \quad (0.21)$$

Le flux commun ϕ est donné par la relation d'Hopkinson

$$n_1 \cdot \bar{I}_1 + n_2 \cdot \bar{I}_2 = \mathbb{R} \bar{\Phi} \quad (0.22)$$

$$n_1 \bar{\Phi} f_1 = l_1 \cdot \bar{I}_1 \quad (0.23)$$

l_1 : inductance de fuite du primaire

$$n_2 \bar{\Phi} f_2 = l_2 \cdot \bar{I}_2 \quad (0.24)$$

l_2 : inductance de fuite du secondaire

Finalement, on obtient l'ensemble des équations du transformateur :

$$\begin{aligned} \bar{V}_1 &= R_1 + j\omega l_1 \bar{I}_1 + jn_1 \omega \bar{\Phi} \\ \bar{V}_2 &= -R_2 + j\omega l_2 \bar{I}_2 + jn_2 \omega \bar{\Phi} \end{aligned} \quad (0.25)$$

$$n_1 \cdot \bar{I}_1 + n_2 \cdot \bar{I}_2 = \mathbb{R} \bar{\Phi}$$

Il reste à introduire les pertes du circuit magnétique, les équations se simplifient et deviennent

$$\begin{aligned} \bar{V}_1 &= j n_1 \omega \bar{\Phi} \\ \bar{V}_2 &= j n_2 \omega \bar{\Phi} \Rightarrow \frac{V_2}{V_1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{I_1}{I_2} \end{aligned} \quad (0.26)$$

$$n_1 \cdot \bar{I}_1 = n_2 \cdot \bar{I}_2$$

$$m = \frac{n_2}{n_1} \text{ est appelé le rapport de transformation}$$

II.4.3 Schéma électrique équivalent

Un schéma équivalent d'un transformateur s'articule autour d'éléments modélisant les phénomènes magnétiques pour le circuit magnétique, et les phénomènes électromagnétiques et électrostatiques pour les bobinages, en intégrant le couplage, les inductances et les résistances.

Chapitre II:

Étude et modélisation du système de régulation de tension

Ce schéma équivalent complet décrit bien le fonctionnement d'un transformateur réel, monophasé, peut être électriquement modélisé selon la Figure II.9.

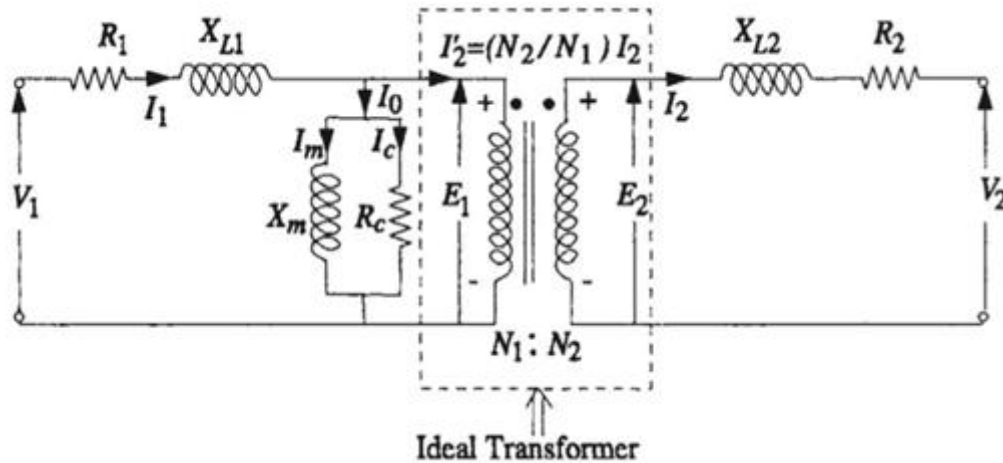


Figure II.9: Schéma électrique équivalent d'un transformateur réel.

II.5 Modélisation du régleur en charge (OLTC)

II.5.1 Structure du régleur en charge

Le régleur en charge (*On-Load Tap Changer – OLTC*) est un dispositif électromécanique intégré au transformateur de puissance permettant de modifier le rapport de transformation sans interrompre l'alimentation des charges. Son rôle principal est de maintenir la tension secondaire dans une plage admissible malgré les variations de charge et les fluctuations de la tension du réseau amont.

II.5.1.1 Constitution du système

Un régleur en charge est généralement constitué des éléments suivants :

- ✓ un sélecteur de prises permettant de choisir la prise suivante.
- ✓ un commutateur de puissance assurant le transfert du courant entre deux prises.
- ✓ des résistances ou réactances de transition limitant les courants de circulation pendant la commutation.
- ✓ un mécanisme d'entraînement motorisé commandant le changement de prises.
- ✓ un régulateur automatique de tension chargé de surveiller la tension et de piloter le système.

Le principe de fonctionnement repose sur la modification du nombre effectif de spires de l'enroulement régulé. Le rapport de transformation du transformateur est donné par :

$$m = \frac{N_2}{N_1} \quad (0.27)$$

où :

N_1 représente le nombre de spires du primaire.

N_2 représente le nombre de spires du secondaire.

Toute modification du nombre de spires entraîne une variation du rapport de transformation et, par conséquent, de la tension secondaire :

$$U_2 = \frac{N_2 U_1}{N_1} \quad (0.28)$$

où U_1 et U_2 désignent respectivement les tensions primaire et secondaire.

II.5.1.2 Positions des prises

Le réglage de la tension est réalisé à travers un ensemble de prises réparties sur l'un des enroulements du transformateur. Chaque prise correspond à une valeur déterminée du rapport de transformation. La position centrale correspond généralement au fonctionnement nominal, tandis que les prises supérieures et inférieures permettent respectivement d'augmenter ou de diminuer la tension secondaire.

Si chaque prise modifie la tension de $\Delta U\%$, la tension obtenue pour une position (n) peut être exprimée par :

$$U_2(n) = U_{2n} \left(1 + n \frac{\Delta U}{100} \right) \quad (0.29)$$

où :

U_{2n} est la tension nominale secondaire ;

N est le numéro de la prise ;

ΔU représente le pas de réglage en pourcentage.

Par exemple, pour un OLTC disposant de (± 10) positions avec un pas de (1,25%), la plage totale de réglage est :

$$\Delta U_{totale} \pm 10 * 1.25\% = 12.5\% \quad (0.30)$$

Ainsi, le régulateur en charge offre une grande flexibilité pour adapter la tension secondaire aux conditions réelles d'exploitation du réseau, tout en garantissant la continuité de service lors des changements de prises.

II.5.2 Modélisation mathématique de l'OLTC

La modélisation mathématique du régulateur en charge (OLTC) repose sur l'établissement d'une relation entre la position des prises du transformateur et la tension secondaire obtenue. Chaque changement de prise modifie le nombre effectif de spires de l'enroulement régulé et, par conséquent, le rapport de transformation du transformateur.

Si (n) désigne la position de la prise et ($\Delta U(\%)$) la variation de tension associée à chaque pas de réglage, la tension secondaire peut être exprimée par :

$$U_2(n) = U_{2n} \left(1 + n \frac{\Delta u(\%)}{100} \right) \quad (0.31)$$

Chapitre II:

Étude et modélisation du système de régulation de tension

où :

U_{2n} :est la tension nominale secondaire.

n :représente le numéro de la prise sélectionnée.

$\Delta U(\%)$: est la variation de tension par prise exprimée en pourcentage.

Cette relation montre que la tension secondaire varie de manière discrète en fonction de la position du régleur en charge.

La commande de l'OLTC est généralement basée sur l'erreur entre la tension mesurée et la tension de référence. Cette erreur est définie par :

$$e(t) = U_{ref} - U_{mes} \quad (0.32)$$

où :

U_{ref} : est la tension de consigne ;

U_{mes} :est la tension mesurée au secondaire du transformateur.

La loi de commande peut alors être formulée de manière simple comme suit :

$$\Delta n = \begin{cases} +1 & \text{si } e(t) > \Delta U_b \\ 0 & \text{si } |e(t)| \leq \Delta U_b \\ -1 & \text{si } e(t) < -\Delta U_b \end{cases} \quad (0.33)$$

où ΔU_b représente le seuil de déclenchement du changement de prise.

La nouvelle position de prise est alors :

$$n(k+1) = n(k) + \Delta n \quad (0.34)$$

Afin d'éviter les commutations fréquentes dues aux faibles fluctuations de tension, une bande morte est introduite autour de la tension de consigne. Tant que l'erreur reste comprise dans cet intervalle, aucune action n'est effectuée sur le régleur :

$$-\Delta U_b \leq e(t) \leq \Delta U_b \quad (0.35)$$

Cette bande morte améliore la stabilité du système et limite l'usure mécanique du mécanisme de commutation.

De plus, un temps de temporisation est généralement associé à la commande afin d'éviter les changements de prises provoqués par des perturbations transitoires de courte durée. Le changement de prise n'est exécuté que si l'écart de tension persiste pendant une durée supérieure au temps de temporisation (T_d) :

$$|e(t)| > \Delta U_b \text{ pendant } t \geq T_d \quad (0.36)$$

où (t_e) représente la durée pendant laquelle la tension reste en dehors de la bande morte.

Ainsi, le modèle mathématique de l'OLTC repose sur trois éléments principaux : la relation entre la position des prises et la tension secondaire, la loi de commande basée sur l'erreur de tension et le

mécanisme de bande morte associé à une temporisation. Cette modélisation constitue la base de l'implémentation du système de régulation dans l'environnement MATLAB/Simulink.

II.5.3 Intégration OLTC–transformateur

L'intégration du régleur en charge (OLTC) au transformateur de puissance permet de constituer un système global de régulation automatique de tension. Dans ce système, l'OLTC agit sur le rapport de transformation afin de maintenir la tension secondaire à une valeur proche de la tension de référence malgré les variations de charge et les perturbations du réseau amont. La position des prises influence directement le rapport de transformation, qui peut être exprimé par :

$$m(n) = m_0 \left(1 + n \frac{\Delta u(\%)}{100} \right) \quad (0.37)$$

où (m_0) représente le rapport de transformation nominal, (n) la position de la prise et ($\Delta u(\%)$) la variation de tension associée à chaque pas de réglage.

La tension secondaire du transformateur dépend alors du rapport de transformation et s'écrit :

$$U_2(n) = \frac{U_1}{m(n)} \quad (0.38)$$

où (U_1) est la tension primaire et (U_2) la tension secondaire. Ainsi, toute modification de la position des prises entraîne une variation de la tension secondaire permettant de compenser les chutes de tension observées dans le réseau.

Le système de régulation fonctionne en boucle fermée. La tension secondaire mesurée est continuellement comparée à une tension de référence (U_{ref}). L'erreur de régulation est définie par :

$$e(t) = U_{ref} - u_2(t) \quad (0.39)$$

Cette erreur constitue le signal d'entrée du régulateur de tension qui décide de la commande du régleur en charge. La position des prises est alors mise à jour selon la loi :

$$n(k+1) = n(k) + \Delta n \quad (0.40)$$

où (Δn) représente l'incrément ou le décrétement de la position de la prise en fonction du signe de l'erreur de tension.

L'association du transformateur et du régleur en charge forme ainsi une boucle fermée de commande permettant d'ajuster automatiquement la tension secondaire. Cette structure assure une compensation efficace des variations de charge et contribue au maintien de la tension distribuée dans les limites admissibles, garantissant ainsi la qualité et la continuité de l'alimentation électrique.

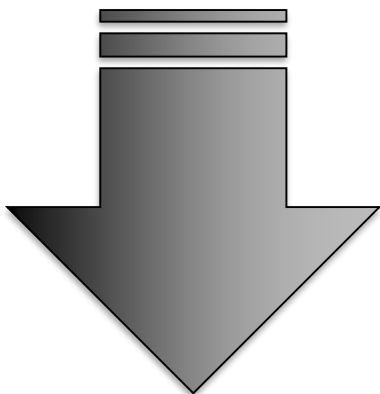
II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, les phénomènes de chute de tension dans les réseaux de distribution ont été étudiés ainsi que les solutions permettant leur compensation. Une attention particulière a été portée au transformateur de puissance équipé d'un régleur en charge (OLTC), dont le principe de fonctionnement et le modèle mathématique ont été présentés. Les modèles développés ont ensuite été implémentés sous MATLAB/Simulink afin d'analyser le comportement du système face aux variations de charge.

Le chapitre suivant sera consacré à la conception de la commande automatique du régleur en charge ainsi qu'à l'évaluation des performances du système de régulation de tension à travers différents scénarios de simulation.

Chapitre III :

Conception de la commande automatique et validation par simulation



III.1 Introduction

La régulation automatique de la tension constitue une fonction essentielle pour garantir la qualité de l'énergie électrique et maintenir la tension dans les limites admissibles malgré les variations de charge et les perturbations du réseau [1,18]. Parmi les solutions les plus utilisées, les transformateurs équipés de changeurs de prises en charge (OLTC) permettent d'ajuster efficacement la tension au niveau des réseaux de transport et de distribution [19].

Dans ce chapitre, une stratégie de commande automatique est développée afin d'assurer une régulation efficace de la tension du système étudié. Le modèle de commande est ensuite implémenté sous MATLAB/Simulink et évalué à travers différents scénarios de simulation. Les résultats obtenus sont analysés afin d'apprécier les performances de la méthode proposée en termes de précision, de rapidité et de robustesse.

III.2 Présentation du système étudié

III.2.1 Description du transformateur équipé d'un OLTC

Le système étudié est constitué d'un transformateur de puissance équipé d'un changeur de prises en charge (*On-Load Tap Changer*, OLTC). Ce dispositif permet de modifier le rapport de transformation sans interrompre l'alimentation des charges, assurant ainsi le maintien de la tension de sortie à une valeur proche de sa référence malgré les variations de charge ou les fluctuations de la tension du réseau [1].

Le principe de fonctionnement de l'OLTC repose sur la sélection de différentes prises situées généralement sur l'enroulement haute tension du transformateur. Chaque changement de prise entraîne une modification du rapport de transformation, ce qui permet d'augmenter ou de diminuer la tension secondaire selon les besoins du réseau [20].

Dans cette étude, le transformateur est associé à un système de régulation automatique chargé de surveiller en permanence la tension de sortie et de commander les mouvements du changeur de prises lorsque la tension s'écarte de la plage admissible. Cette configuration permet d'améliorer la qualité de la tension distribuée tout en assurant un fonctionnement fiable du réseau électrique.

III.2.2 Structure du système de régulation de tension

Le système de régulation de tension a pour objectif de maintenir la tension de sortie du transformateur à une valeur de référence prédéfinie malgré les variations de charge et les perturbations du réseau. Il est

généralement constitué d'un capteur de tension, d'un comparateur, d'un régulateur et d'un actionneur représenté par le changeur de prises en charge (OLTC) [20].

Le capteur mesure en continu la tension de sortie et transmet cette information au régulateur. Celui-ci compare la tension mesurée à la consigne afin de déterminer l'erreur de régulation. En fonction de cette erreur, une commande appropriée est générée pour actionner l'OLTC et modifier le rapport de transformation du transformateur. Cette boucle de rétroaction permet de corriger les écarts de tension et d'assurer une régulation efficace du système [1].

La structure globale de régulation adoptée dans ce travail est illustrée par le schéma fonctionnel présenté dans la section suivante.

III.2.3 Paramètres du système étudié

Afin de réaliser les simulations et d'évaluer les performances de la stratégie de commande proposée, un ensemble de paramètres électriques et mécaniques caractérisant le transformateur et son système de régulation est considéré. Ces paramètres comprennent notamment la puissance nominale, les tensions nominales primaire et secondaire, la fréquence de fonctionnement, les paramètres du changeur de prises en charge (OLTC) ainsi que les caractéristiques de la charge alimentée [20].

Les valeurs des paramètres retenus dans cette étude sont présentées dans les tableaux (III.1) et (III.2). Elles sont choisies de manière à représenter un transformateur de puissance utilisé dans les réseaux électriques de transport ou de distribution. Ces données constituent la base de la modélisation et des simulations réalisées sous MATLAB/Simulink.

Tableau III.1 : Paramètres du transformateur

Transformateur	
Sn= 15 VA	
U1=60000V	U2=30000V
Mode de refroidissement : Huile	Couplage : Yyn

Tableau III.2 : Caractéristiques des du prises

Borne de la haute tension					
Commutateur			Tension (V)	Courant ONAN(A)	Courant ONAF(A)
Position	Couplage				
1	4-5	2-17	70800	244.6	326.2
2		2-16	69900	247.8	330.4
3		2-15	69000	251.1	334.7
4		2-14	68000	254.4	339.1
5		2-13	67200	257.8	343.7
6		2-12	66300	261.2	348.3
7		2-11	65400	264.8	353.1
8		2-10	64500	268.5	358
9		2-9	63600	272.3	363.1
10		2-8	62700	276.3	368.4
11		2-7	61800	280.3	373.7
12		2-6	60900	284.4	379.2
13		2-5	60000	288.7	384.9

III.2.4 Cahier des charges de la régulation

La stratégie de régulation développée dans cette étude doit garantir le maintien de la tension de sortie du transformateur autour de sa valeur de référence malgré les variations de charge et les perturbations du réseau. Pour atteindre cet objectif, le système de commande doit satisfaire plusieurs exigences de performance, notamment une bonne précision de régulation, un temps de réponse réduit, une stabilité satisfaisante et une robustesse vis-à-vis des perturbations externes [1].

Par ailleurs, la commande du changeur de prises en charge (OLTC) doit limiter le nombre de commutations afin de réduire l'usure mécanique du dispositif et d'augmenter sa durée de vie. La tension de sortie doit également être maintenue à l'intérieur d'une bande de tolérance prédéfinie, conformément aux exigences de qualité de l'énergie électrique [20].

Les principales spécifications retenues pour l'évaluation des performances du système sont résumées dans le tableau III.3.

Tableau III.3 : Principales spécifications de la régulation

Critère	Exigence
Tension de référence	U_{ref}
Erreur statique	proche de zéro
Bande de tolérance	$\pm 5 \%$ de U_{ref}
Temps de réponse	Minimal
Dépassement	faible ou nul
Stabilité	assurée pour toutes les conditions de fonctionnement
Nombre de commutations OLTC	Minimisé
Robustesse	maintien des performances en présence de perturbations

III.3 Conception de la stratégie de commande

III.3.1 Principe de la régulation automatique de tension

Le principe de la régulation repose sur la mesure continue de la tension de sortie et sa comparaison à une valeur de consigne. L'écart entre ces deux grandeurs, appelé erreur de régulation, est traité par un régulateur qui génère un signal de commande destiné au changeur de prises en charge (OLTC). Selon le signe et l'amplitude de l'erreur, l'OLTC modifie le rapport de transformation du transformateur afin d'augmenter ou de diminuer la tension secondaire jusqu'à son retour dans la plage de fonctionnement souhaitée [19].

Ainsi, le système fonctionne en boucle fermée, ce qui permet de corriger automatiquement les écarts de tension et d'améliorer la stabilité ainsi que les performances du réseau électrique.

III.3.2 Élaboration de la loi de commande

La loi de commande a pour objectif de déterminer les actions à appliquer au changeur de prises en charge (OLTC) afin de maintenir la tension de sortie à sa valeur de référence. Elle est élaborée à partir de l'erreur de régulation définie par la différence entre la tension de référence U_{ref} et la tension mesurée U_{mes} :

$$e(t) = U_{ref} - U_{mes}(t) \quad (III.1)$$

Le principe retenu consiste à surveiller en permanence cette erreur et à commander un changement de prise lorsque la tension mesurée dépasse les limites de la bande de tolérance définie autour de la consigne. Lorsque $(e(t))$ devient supérieure à la limite supérieure, l'OLTC est commandé pour augmenter la tension de sortie. À l'inverse, lorsque $(e(t))$ devient inférieure à la limite inférieure, l'OLTC est actionné pour diminuer la tension de sortie. Aucune commutation n'est effectuée tant que la tension demeure à l'intérieur de la zone admissible.

Cette stratégie permet d'assurer une régulation efficace de la tension tout en limitant le nombre de manœuvres du changeur de prises, ce qui contribue à réduire son usure mécanique et à améliorer sa durée de vie. La loi de commande ainsi définie constitue la base de l'implémentation du système de régulation sous l'environnement de simulation MATLAB/Simulink.

III.3.3 Conception du régulateur

III.3.3.1 Commande intégrale discrète

La commande intégrale discrète, dont le principe a été détaillé dans le chapitre précédent, est utilisée dans ce travail comme stratégie de référence. Dans ce chapitre, elle est remplacée successivement par un régulateur PI discret puis par une commande directe de la tension afin de comparer les performances des différentes stratégies de régulation du transformateur équipé d'un OLTC.

La loi de commande s'écrit sous la forme :

$$n(k) = n(k-1) + K_i e(k) \quad (III.2)$$

avec :

$$e(k) = U_{ref} - U_{mes}(k) \quad (III.3)$$

où $n(k)$ représente la position calculée du changeur de prises, $(e(k))$ l'erreur de tension et (K_i) le gain intégral.

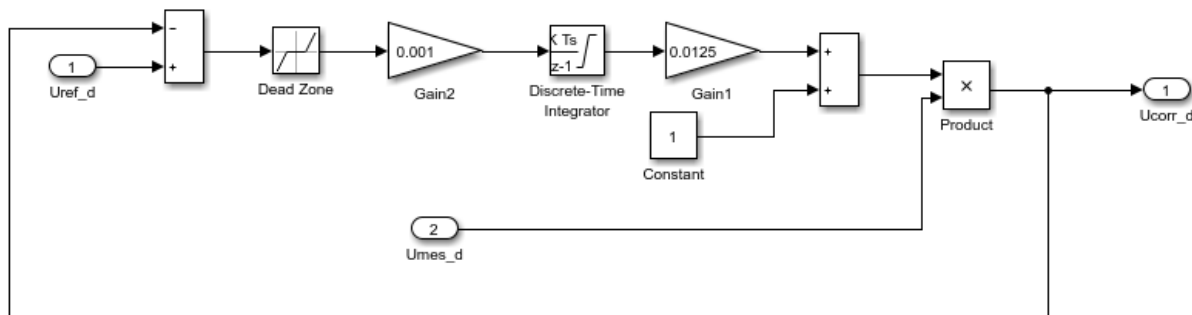


Figure III.1: Schéma de régulation de tension par commande intégrale discrète.

III.3.3.2 Régulateur PI discret

Afin d'améliorer les performances de la régulation de tension obtenues avec la commande intégrale discrète, un régulateur PI (Proportionnel-Intégral) discret est introduit. Ce régulateur combine une action proportionnelle, qui améliore la rapidité de réponse du système, et une action intégrale, qui permet de réduire l'erreur statique et d'assurer un suivi précis de la consigne [21].

L'erreur de régulation est définie par (III.2)

La loi de commande du régulateur PI discret s'écrit sous la forme :

$$u(k) = K_p e(k) + K_i T_s \sum_{i=0}^k e(i) \quad (\text{III.4})$$

où :

$u(k)$ est le signal de commande.

K_p est le gain proportionnel.

K_i est le gain intégral.

T_s est la période d'échantillonnage.

Dans l'implémentation numérique, la partie intégrale est calculée de manière récursive :

$$I(k) = I(k-1) + K_i T_s e(k) \quad (\text{III.5})$$

et la commande devient :

$$u(k) = K_p e(k) + I(k) \quad (\text{III.6})$$

L'action proportionnelle permet de réagir instantanément aux variations de tension, tandis que l'action intégrale accumule l'erreur dans le temps afin d'éliminer l'écart permanent entre la tension mesurée et la tension de référence. La combinaison de ces deux actions permet généralement d'obtenir un meilleur compromis entre rapidité, précision et stabilité que celui offert par une commande intégrale seule [22].

Dans le modèle Simulink développé dans cette étude, le régulateur PI discret est implémenté à l'aide du bloc *Discrete PID Controller* configuré en mode PI. Les performances obtenues seront comparées à celles de la commande intégrale discrète et de la commande directe de la tension afin d'évaluer l'apport de l'action proportionnelle dans la régulation de tension du transformateur équipé d'un OLTC.

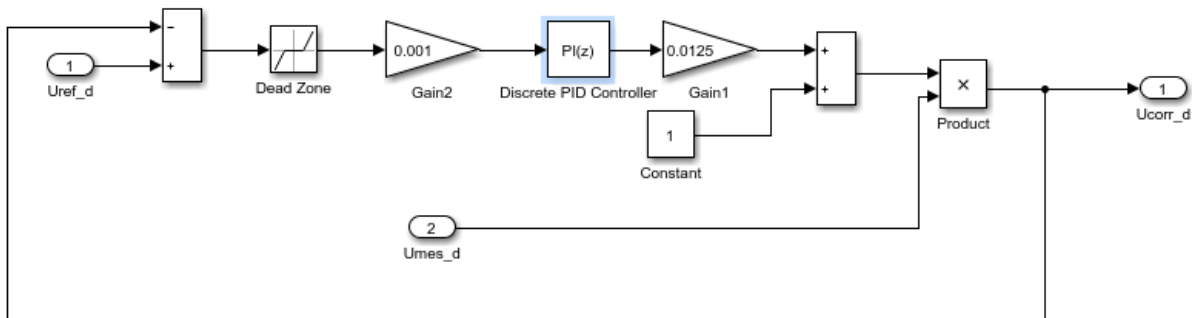


Figure III.2: Architecture de la régulation de tension basée sur un régulateur PI discret.

III.3.3.3 Commande directe de la tension par OLTC

La commande directe de la tension repose sur la comparaison de la tension mesurée à une valeur de référence. Lorsque l'écart dépasse la bande morte prédéfinie, une logique de décision génère un ordre d'incrémentement ou de décrémentation du numéro de prise du changeur en charge. Cette stratégie permet de maintenir la tension dans une plage admissible tout en limitant le nombre de manœuvres du dispositif OLTC.

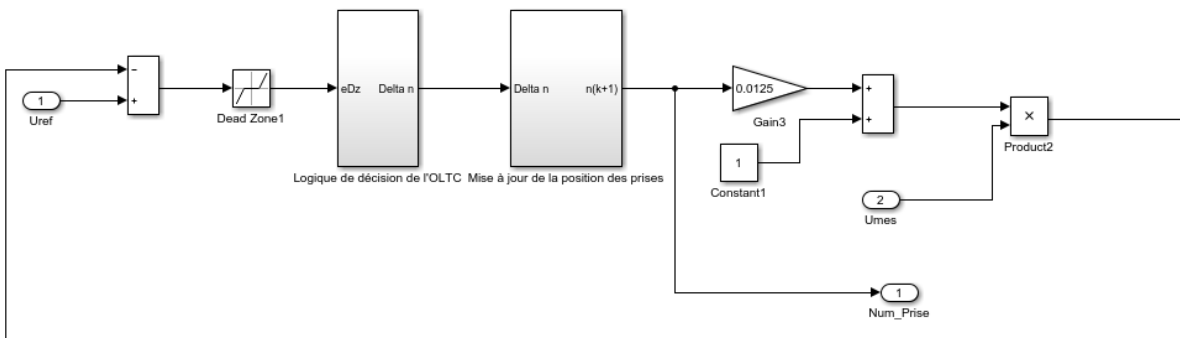


Figure III.3: Structure de la commande directe de la tension basée sur un OLTC.

La commande directe de la tension par changeur de prises en charge (OLTC) constitue une méthode de régulation largement utilisée dans les réseaux électriques de transport et de distribution. Contrairement aux commandes basées sur des régulateurs intégral ou PI, cette stratégie agit directement sur la position des prises du transformateur en fonction de l'écart observé entre la tension mesurée et la tension de référence [20].

L'erreur de régulation est définie par (III.2)

Afin d'éviter les commutations excessives dues aux faibles fluctuations de tension, une bande morte ΔU est introduite autour de la consigne. La logique de commande est alors définie par :

$$\Delta n(k) = \begin{cases} +1 & \text{si } e(k) > \Delta U \\ 0 & \text{si } |e(k)| \leq \Delta U \\ -1 & \text{si } e(k) < -\Delta U \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

où

$\Delta n(k)$ représente la variation de la position de prise.

La position du changeur de prises est ensuite mise à jour selon :

$$n(k) = n(k-1) + \Delta n(k) \quad (\text{III.8})$$

avec la contrainte :

$$n_{min} \leq n(k) \leq n_{max} \quad (\text{III.9})$$

afin de respecter les limites physiques du dispositif OLTC.

Le rapport de transformation corrigé est calculé à partir de la position de prise :

$$m(k) = m_0(1 + \rho n(k)) \quad (\text{III.10})$$

où :

m_0 est le rapport de transformation nominal ;

ρ est le pas de réglage par prise (en p.u. ou en %) ;

$n(k)$ est la position de prise à l'instant (k).

Dans le cas étudié, chaque prise correspond à une variation de tension de 1,25 %, ce qui conduit à :

$$a(k) = 1 + 0.0125n(k) \quad (\text{III.11})$$

La tension corrigée devient alors :

$$U_{corr}(k) = a(k)U_{mes}(k) \quad (\text{III.12})$$

Cette stratégie présente plusieurs avantages pour les applications OLTC. D'une part, la position des prises demeure naturellement discrète et correspond au fonctionnement réel du dispositif. D'autre part, la présence de la bande morte réduit le nombre de commutations et limite l'usure mécanique du changeur de prises. En revanche, la précision de régulation dépend directement du pas de réglage disponible et de la largeur de la bande morte retenue [19].

La commande directe de la tension constitue ainsi une approche simple, robuste et particulièrement adaptée aux transformateurs équipés d'un OLTC. Dans la suite de ce chapitre, ses performances seront comparées à celles de la commande intégrale discrète et du régulateur PI discret afin d'évaluer son efficacité dans différentes conditions de fonctionnement.

III.3.4 Gestion de la commutation des prises

La gestion de la commutation des prises constitue un élément essentiel du système de régulation de tension basé sur un changeur de prises en charge (OLTC). Son objectif est d'assurer le maintien de la tension de sortie dans une plage admissible tout en limitant le nombre de manœuvres afin de réduire l'usure mécanique du dispositif [20].

Le principe de fonctionnement repose sur la surveillance continue de l'erreur de tension (équation III.3). Lorsque cette erreur dépasse les limites de la bande morte prédéfinie, un ordre de changement de prise est généré. La position de prise est alors mise à jour selon l'équation (III.8)

Afin d'empêcher tout dépassement des positions extrêmes du changeur de prises, une fonction de saturation est appliquée à la position calculée, conformément à l'équation (III.9).

Dans la pratique, un délai de temporisation est souvent introduit avant l'exécution d'une nouvelle commutation afin d'éviter les changements de prises successifs provoqués par des fluctuations temporaires de la tension. Cette temporisation contribue à améliorer la stabilité du système et à prolonger la durée de vie du mécanisme OLTC [19].

La stratégie de gestion adoptée dans cette étude garantit ainsi une régulation efficace de la tension tout en minimisant le nombre de commutations et en respectant les contraintes opérationnelles du changeur de prises.

III.3.5 Schéma global de la commande proposée

Le système étudié a été implémenté sous MATLAB/Simulink afin d'évaluer les performances des stratégies de commande proposées. Le schéma complet de simulation est présenté dans l'Annexe A. Les sections suivantes analysent les résultats obtenus sous différents scénarios de charge.

III.4 Résultats de simulation

III.4.1 Charge inductive

Nous avons utilisé le logiciel Simulink afin de réaliser la simulation d'un transformateur de puissance de 15 MVA équipé d'un régulateur en charge de type OLTC. L'objectif principal est d'assurer le maintien de la tension secondaire du transformateur dans la bande de régulation spécifiée autour de la valeur nominale de 31kV, malgré les variations des conditions d'exploitation.

Chapitre III : Conception de la commande automatique et validation par simulation

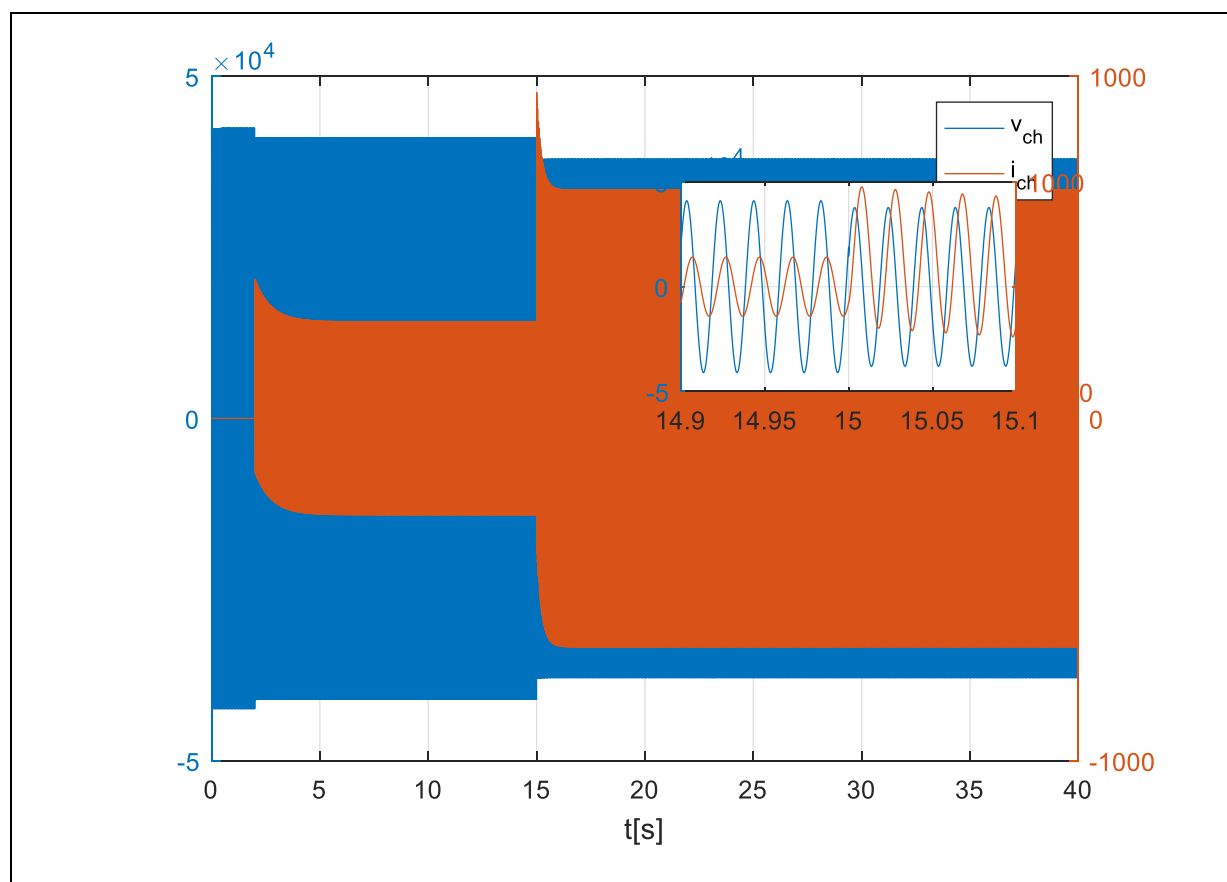
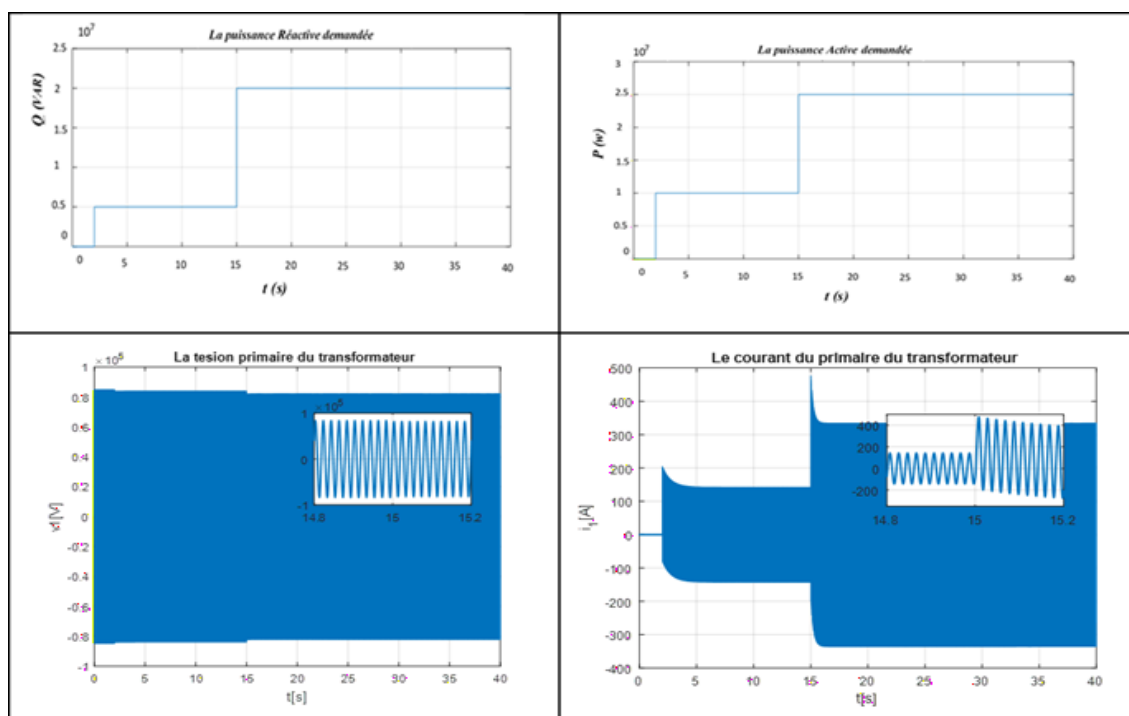


Figure III.4 : Caractéristiques du système

Chapitre III : Conception de la commande automatique et validation par simulation

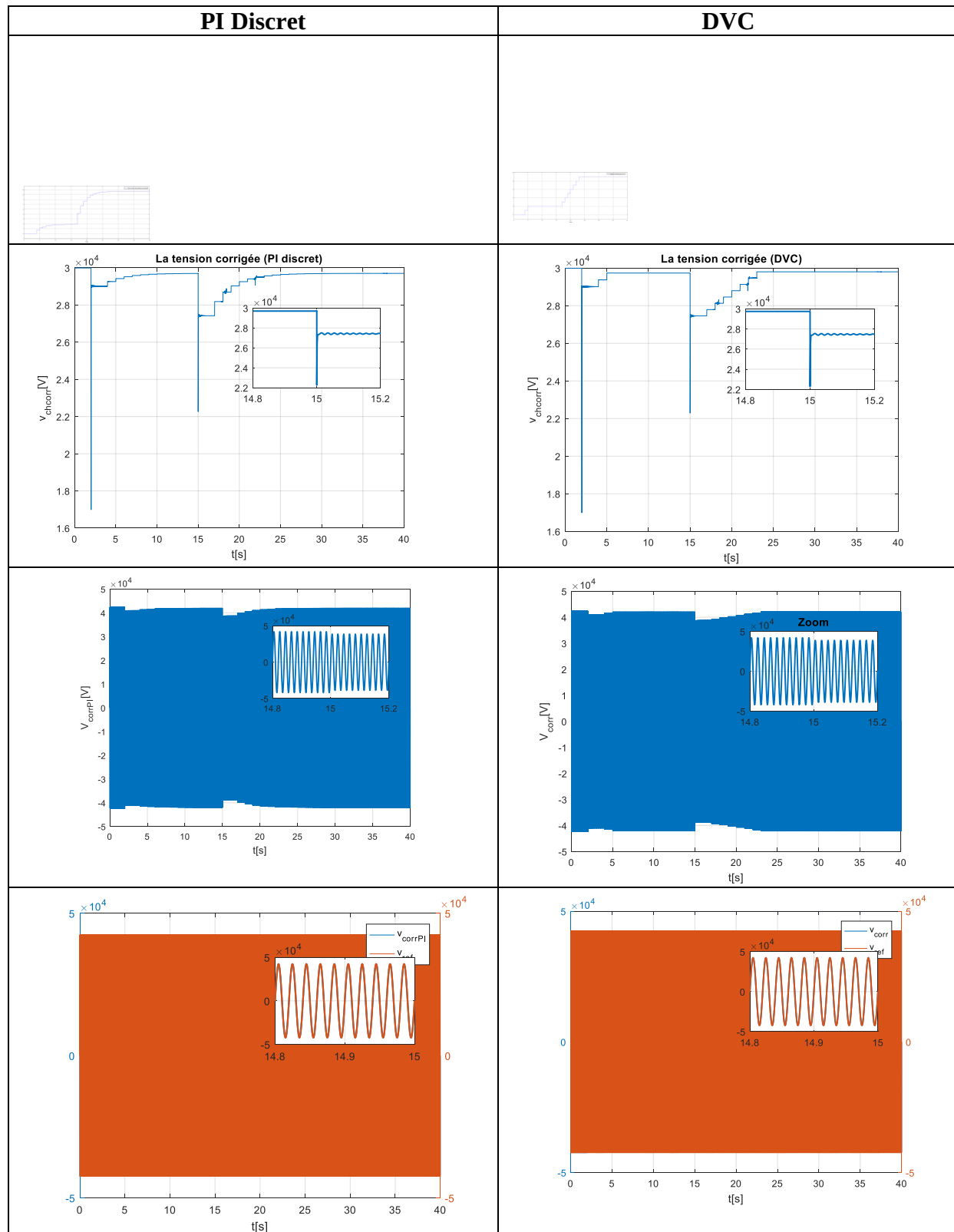


Figure III.5 : Résultats de simulation

Afin d'évaluer les performances des deux stratégies de commande, un scénario de variation de charge a été appliqué. Initialement, le réseau fonctionne à vide avec $P=0$ MW et $Q=0$ MVar. À $t=1$ s, une première charge de $P=10$ MW et $Q=5$ MVar est raccordée. Une seconde charge de $P=15$ MW et $Q=15$ MVar est ensuite ajoutée à $t=6$ s.

Les résultats montrent que la commande DVC agit directement sur la position du changeur de prises avec un incrément d'une prise toutes les secondes. Après l'application de la première charge, la position de la prise évolue progressivement jusqu'à atteindre la position $n=2$ en environ 5 s. En revanche, avec le régulateur PI discret, la commande présente une évolution continue (fractionnaire) de la position de prise avant d'atteindre la valeur de régime permanent $n=1.75$ après 3 s.

Lors de l'application de la seconde charge à $t=6$ s, la commande DVC augmente de nouveau la position du changeur jusqu'à atteindre $n=9$, tandis que le PI discret converge vers une position de régime permanent égale à $n=8.69$.

Du point de vue de la régulation de tension, l'insertion de la première charge provoque une chute de tension jusqu'à **29.2 kV (ou p.u.)** avec le PI discret, avant un retour progressif vers la valeur de référence **29.74 kV**. Avec la commande DVC, la tension atteint une valeur minimale de **29.2 kV** puis est rétablie à **29.76 kV** grâce aux actions successives du changeur de prises.

Après le raccordement de la seconde charge, une nouvelle diminution de la tension est observée. La commande DVC et le PI discret permettent tous deux de ramener la tension à l'intérieur de la plage de fonctionnement admissible, mais avec des dynamiques et des positions finales du changeur différentes. Cette comparaison met en évidence l'influence de la stratégie de commande sur la rapidité de correction de la tension et sur le nombre de manœuvres du changeur de prises.

L'analyse des formes d'onde instantanées montre que la tension et le courant conservent un caractère quasi sinusoïdal durant l'ensemble des scénarios étudiés. Les opérations de commutation du changeur de prises et les variations de charge n'engendrent pas de déformations notables des signaux électriques. Ainsi, la qualité de l'énergie délivrée reste satisfaisante, tandis que la tension est maintenue à l'intérieur de la bande d'utilisation spécifiée.

III.4.2 Charge capacitive

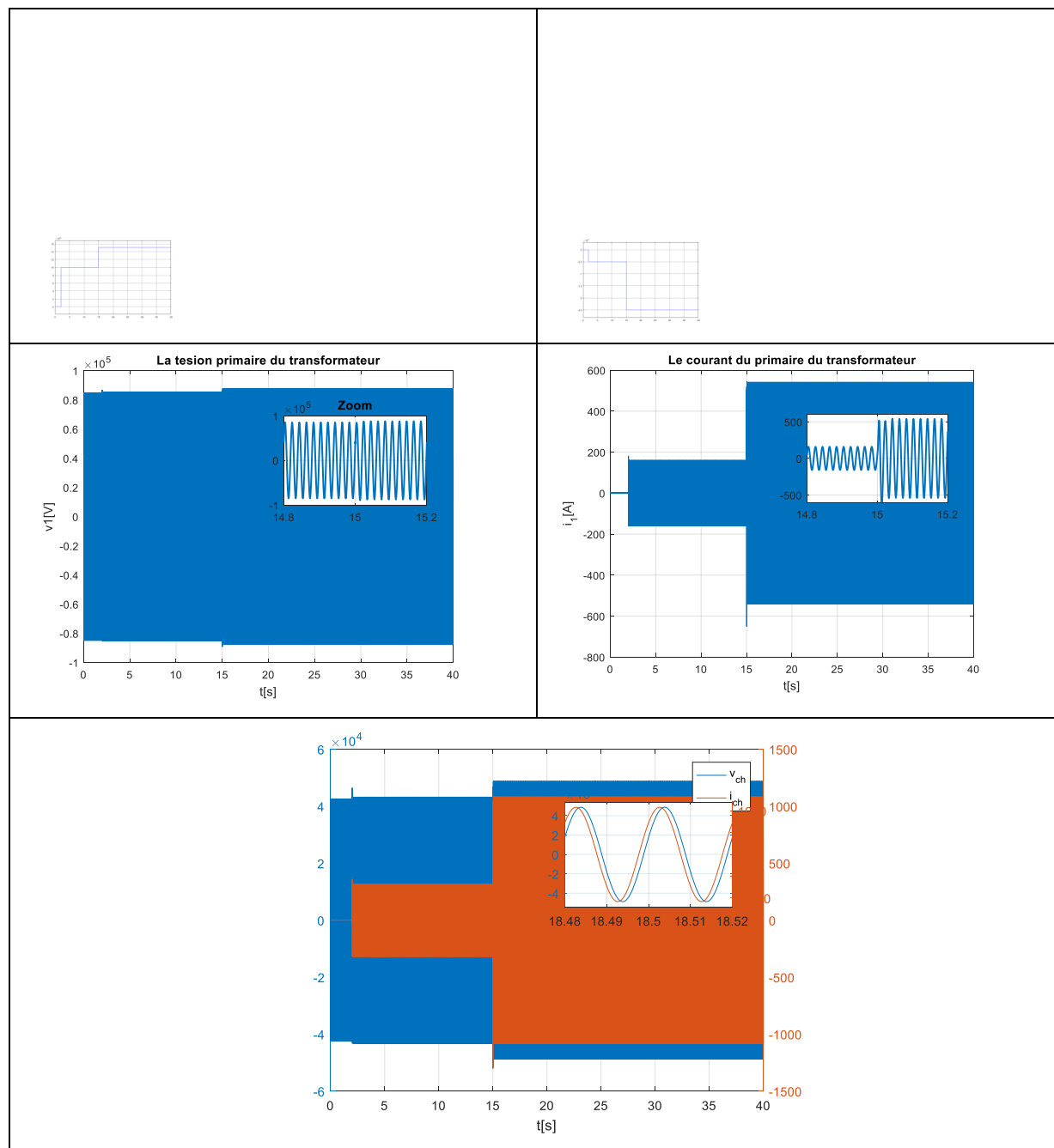


Figure III.3 : Caractéristiques du réseau sous variation de charge.

Chapitre III : Conception de la commande automatique et validation par simulation

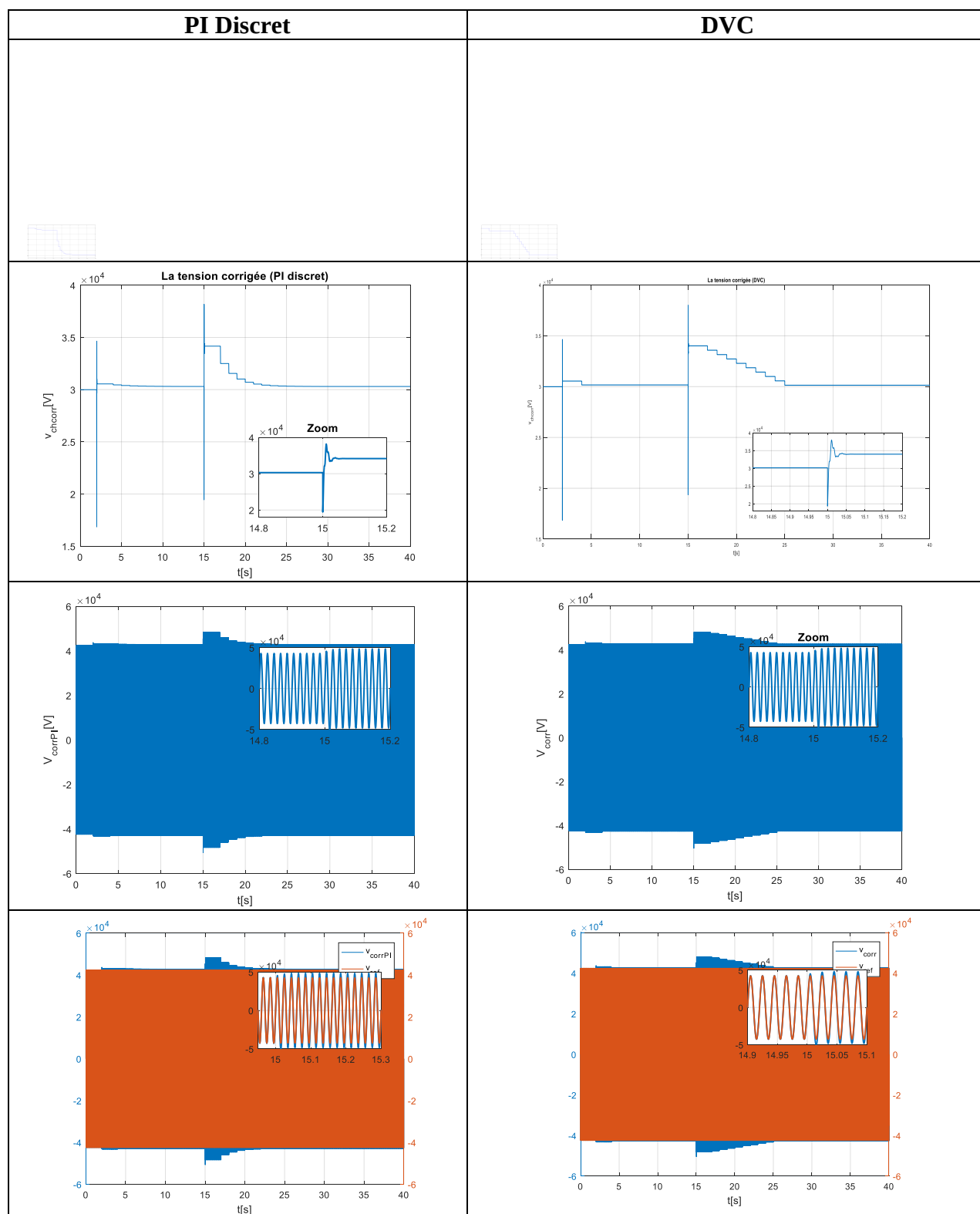


Figure III.4 : Résultats de simulation

Dans le cadre de la comparaison du régulateur PI discret et de la commande directe de la tension (DVC), un scénario de variation de charge à caractère capacitif a été appliqué au système étudié. Initialement, le réseau fonctionne à vide avec $P=0$ MW et $Q=0$ MVar. À $t=2$ s, une première charge correspondant à $P=10$ MW et $Q=-5$ MVar est raccordée. Une seconde charge de $P=5$ MW et $Q=-20$ MVar est ensuite ajoutée à $t=15$ s.

Les résultats montrent que l'injection de puissance réactive capacitive entraîne une élévation de la tension au niveau du réseau. Afin de maintenir la tension dans la plage admissible, les deux stratégies de commande agissent en diminuant la position du changeur de prises. Après l'application de la première charge à $t=2$ s, la commande directe de la tension (DVC) réduit progressivement la position de prise jusqu'à atteindre $n=-1$, tandis que le régulateur PI discret converge vers une valeur proche de $n=-0.86$.

Lors de l'ajout de la seconde charge à $t=15$ s, l'augmentation de la puissance réactive capacitive provoque une nouvelle hausse de la tension. Les deux commandes réagissent alors en poursuivant la diminution de la position des prises afin de compenser cette surtension. La commande DVC atteint finalement la position $n=-10$, alors que le régulateur PI discret converge vers une valeur de régime permanent égale à $n=-9.58$.

Du point de vue de la régulation de tension, les deux stratégies permettent de ramener la tension à l'intérieur de la bande de fonctionnement spécifiée malgré les perturbations introduites par les variations de charge. La commande DVC réalise cette correction par des changements successifs de prises, tandis que le régulateur PI discret présente une évolution plus progressive et continue de la position de prise. Les valeurs finales obtenues restent toutefois très proches, ce qui confirme l'efficacité des deux approches pour la compensation des surtensions induites par l'injection de puissance réactive.

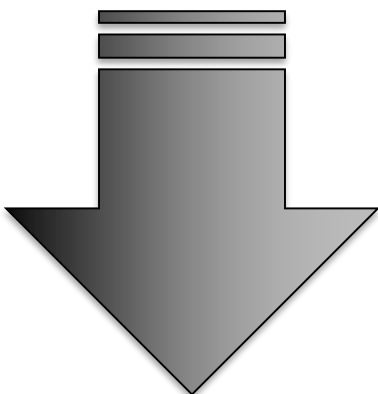
L'analyse des formes d'onde instantanées montre également que la tension et le courant conservent une allure quasi sinusoïdale pendant toute la durée de la simulation. Les opérations de commutation du changeur de prises ainsi que les variations de charge n'engendrent pas de distorsions significatives des signaux électriques. La qualité de l'énergie reste ainsi satisfaisante, tandis que la tension est maintenue à l'intérieur de la plage de fonctionnement imposée.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, deux stratégies de commande pour la régulation de la tension d'un transformateur équipé d'un OLTC ont été présentées et étudiées : le régulateur PI discret et la commande directe de la tension (DVC). Les modèles développés sous MATLAB/Simulink ont permis d'évaluer les performances de ces approches dans différentes conditions de fonctionnement. Les résultats obtenus mettent en évidence leur capacité à assurer le maintien de la tension dans la plage admissible tout en garantissant un fonctionnement satisfaisant du système de régulation.

Conclusion

générale



Conclusion générale

Conclusion générale

La régulation de la tension constitue une fonction essentielle dans les réseaux électriques de transport et de distribution afin de garantir la qualité de l'énergie fournie aux consommateurs. Dans ce contexte, les transformateurs de puissance équipés de changeurs de prises en charge (OLTC) représentent une solution efficace pour compenser les variations de tension provoquées par les fluctuations de charge et les perturbations du réseau.

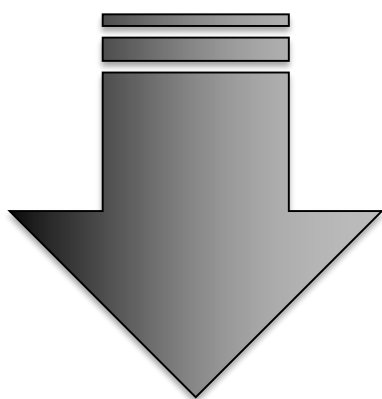
L'objectif principal de ce mémoire était l'étude, la modélisation et la commande automatique d'un transformateur de puissance 60/30 kV destiné à la régulation de tension. Dans un premier temps, une étude bibliographique a permis de présenter les transformateurs de puissance ainsi que les principales techniques de régulation de tension, qu'elles soient classiques ou avancées. Cette analyse a mis en évidence l'importance des systèmes OLTC dans le maintien de la stabilité de la tension au sein des réseaux électriques.

Dans un second temps, les phénomènes responsables des chutes de tension ont été étudiés et un modèle du transformateur équipé d'un régleur en charge a été développé. L'implémentation du système sous MATLAB/Simulink a permis de disposer d'un environnement de simulation adapté à l'analyse du comportement du système dans différentes conditions de fonctionnement.

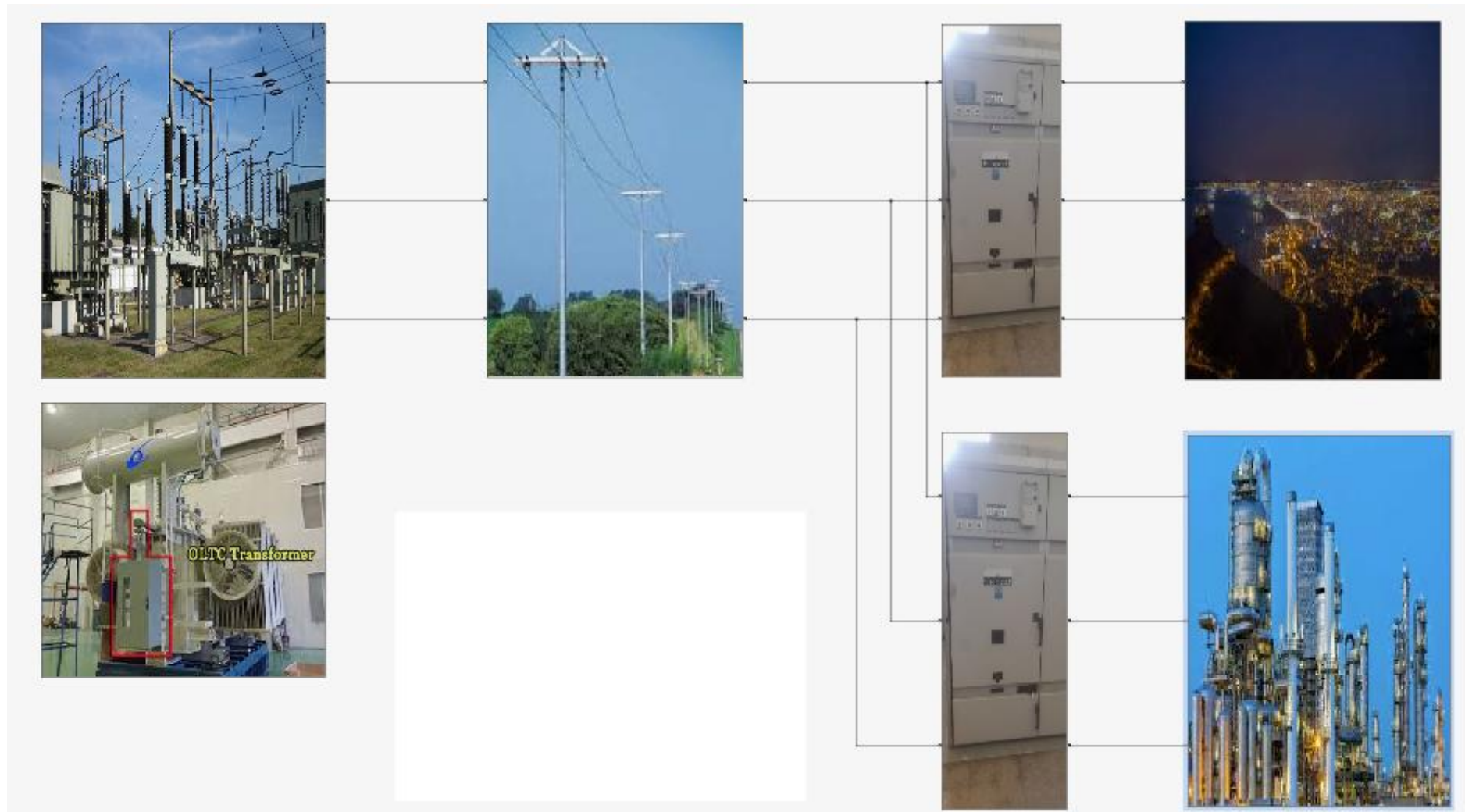
Enfin, deux stratégies de commande ont été proposées et évaluées : le régulateur PI discret et la commande directe de la tension (DVC). Les résultats de simulation ont montré que ces deux approches permettent d'assurer le maintien de la tension dans les limites admissibles malgré les variations de charge. Ils ont également mis en évidence l'efficacité du système de régulation proposé ainsi que sa capacité à améliorer la qualité de la tension délivrée par le transformateur.

Les travaux réalisés dans ce mémoire peuvent être prolongés par l'étude de stratégies de commande plus avancées, telles que la commande floue, la commande adaptative ou la commande prédictive, afin d'améliorer davantage les performances dynamiques et la robustesse du système face aux perturbations et aux évolutions futures des réseaux électriques.

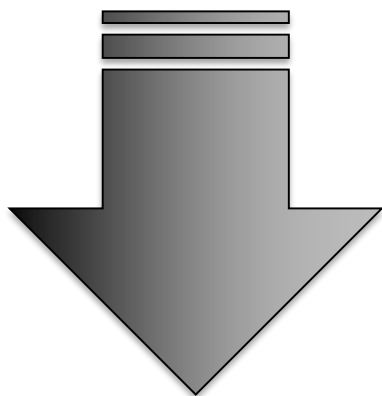
Annexe



Annexe



Références bibliographiques



Références bibliographiques

- [1] A. J. Wood, B. F. Wollenberg and G. B. Sheblé, *Power Generation, Operation and Control*, Wiley, 2013.
- [2] Renewable Energy Integration — L. E. Jones, *Renewable Energy Integration: Practical Management of Variability, Uncertainty and Flexibility in Power Grids*, Academic Press.
- [3] Power System Stability and Control — P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, 1994.
- [4] D. P. Kothari and I. J. Nagrath, *Modern Power System Analysis*, McGraw-Hill Education, 2011.
- [5] David Allan Harris and Allan Swift, *On-Load Tap-Changers for Power Transformers*, The Institution of Engineering and Technology (IET), 2010.
- [6] Hadi Saadat, *Power System Analysis*, McGraw-Hill, 2010.
- [7] B. C. Kuo and F. Golnaraghi, *Automatic Control Systems*, Wiley, 2014.
- [8] J.R. Lucas, « historical development of the transformer », chairman IEE Srilanka center, 2000/1.
- [9] Thomas P. Hughes, *Networks of Power: Electrification in Western Societies, 1880–1930*, Johns Hopkins University Press, 1983.
- [10] Stephen J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, McGraw-Hill, 2012.
- [11] D. P. Kothari and I. J. Nagrath, *Modern Power System Analysis*, 3rd Edition, McGraw-Hill Education, 2011.
- [12] James H. Harlow, *Electric Power Transformer Engineering*, CRC Press, 2004.
- [13] S. V. Kulkarni and S. A. Khaparde, *Transformer Engineering: Design and Practice*, CRC Press, Boca Raton, 2004.
- [14] A. F. Sheikh, *Tap Changing Transformer in Power System*, Electrical Academia, USA.
- [15] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, 1994.
- [16] T. J. Ross, *Fuzzy Logic with Engineering Applications*, Wiley, 2010.
- [17] E. F. Camacho and C. Bordons, *Model Predictive Control*, Springer, 2nd Edition, 2007.
- [18] J. Grainger and W. D. Stevenson, *Power System Analysis*, McGraw-Hill, 1994.
- [19] T. Gönen, *Electric Power Transmission System Engineering: Analysis and Design*, 3rd ed., CRC Press, 2014.
- [20] S. V. Kulkarni and S. A. Khaparde, *Transformer Engineering: Design, Technology and Diagnostics*, 2nd ed., CRC Press, 2012.

[21] K. J. Åström and T. Hägglund, *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*, 2nd ed., Instrument Society of America, 1995.

[22] K. Ogata, *Discrete-Time Control Systems*, 2nd ed., Prentice Hall, 1995.