الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic Republic of Algeria
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research
المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيات المتقدمة
National Higher School of Advanced Technologies

Département Electrotechnique

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme

D'INGENIEUR d'État

-Filière-

Electrotechnique

-Spécialité -

Traction Electrique

- Thème -

Modélisation et Simulation du Fonctionnement d'un Réseau Electrique Equipé d'un Système FACTS de type STATCOM

Application au Sous-Réseau du Client CIS-Sonatrach

Réalisé par

Ibtissem CHEURFA & Nadjat DJAMAI

Sous la direction de **M. Amar HAMACHE**

Composition du jury :

M. Souleyman BENKRAOUA	(MCB-ENSTA-Alger)	Président
M. Mohamed AISSOU	(MCA-ENSTA-Alger)	Examinateur
M. Amar HAMACHE	(MCA-ENSTA-Alger)	Encadrant

Alger, le 26/06/2024

Année universitaire 2023–2024

Dédicaces

*J*e dédie ce modeste travail :

A mes chers parents Cheurfa Yazid et Afnai Nadia,

qui ont toujours été là pour moi, pour leur soutien moral et financier, leurs encouragements, surtout pour m'avoir toujours guidée et épaulée dans mes études .Pour leurs sacrifices, la confiance qu'ils m'ont accordée ainsi que la force et la croyance pour être là aujourd'hui. Aucune dédicace ne peut suffire pour exprimer la tendresse et l'affection que je vous apporte à tous deux.

A mon cher frère Moussa,

Et mes chères soeurs Houda, Siham, sabrina, Ikram,

pour leur présence à mes côtés, leur soutien et motivation.

A madame NADI Souad ingénieur de laboratoire,

pour sa bienveillance et sa gentillesse.

A mes chers beaux-frère Ziad, Abderazek, Hamou,

pour leurs encouragements.

A mes très chères nièces Amelia et Marwa,

A mon très cher neveu Ilyas,

A mes amies Djamila,Nardjes,Zahra,Ines,Rahma,Meriem,Aya et Soumia,

A Monsieur Benmeddour Mohamed borhane,

qui as été une source constante de soutien et d'inspiration tout au long de ce parcours. Ta présence a rendu cette aventure plus significative et plus enrichissante. Ce mémoire est autant le tien que le mien.

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Ibtissem

Dédicaces

*J*e dédie ce projet de fin d'étude à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à sa réalisation et à mon parcours académique.

À mes chers parents, Monsieur Lazhar et Ma belle MAHFOUD Zina, pour leur amour inconditionnel, leur soutien constant et leurs encouragements précieux.

Merci de m'avoir toujours poussé à donner le meilleur de moi-même.

À mes frères, pour leur affection et leur compréhension tout au long de ce voyage.

À mon cher binôme CHEUTRFA Ibtissem, pour sa collaboration sans faille et son amitié indéfectible, qui ont été essentielles à la réussite de ce projet.

À mon co-encadrant BOUKOUCHA Foudil , pour ses conseils avisés, sa patience et son expertise, qui m'ont guidé tout au long de ce travail.

À mes chers amis, naima, dounia, nour, hadil, chiraz, et feriel, pour leur soutien moral, et pour avoir toujours été là quand j'avais besoin d'elles. Merci à vous toutes pour votre soutien indéfectible et votre présence bien vaillante.

Ce projet est le reflet de notre collaboration et de notre détermination commune.

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Nadjat

Remerciements

Nous souhaitons tout d'abord exprimer notre plus profonde gratitude à Monsieur **Amar HAMACHE** pour avoir proposé ce sujet de mémoire, pour nous avoir encadrées, et suivies durant la réalisation de notre étude, pour sa disponibilité et de nous avoir fait profiter de son expérience, afin de contribuer à l'aboutissement de ce travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements, à Monsieur **Souleyman BENKRAOUDA**, de nous avoir fait l'honneur de présider notre jury, Monsieur **Mohamed AISSIOU**, d'avoir accepté d'examiner ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance pour l'opportunité qui nous a été offerte de réaliser ce stage au sein de SONATRACH. Cette expérience a été extrêmement enrichissante tant sur le plan professionnel que personnel, et nous vous en sommes profondément reconnaissantes.

Nos remerciements vont également à toute l'équipe de CIS, en particulier à Monsieur **A. Lounis**, Monsieur **F. Boukoucha**, et Monsieur **H. Boumedien**, pour leurs précieux conseils tout au long de cette période. Leur aide nous a permis de mieux comprendre le fonctionnement du service, et nous avons été touchés par leur accueil chaleureux.

On remercie enfin toute personne ayant contribué, de près ou de loin, de façon active ou passive, à la réalisation de ce mémoire.

ملخص:

تُعدّ شركة CIS-Sonatrach، أحد أعمدة صناعة الطاقة الوطنية في الجزائر، وهي بحاجة إلى إمداد كهربائي موثوق لضمان سير وحدات الإنتاج لديها بسلاسة. تركز هذه الرسالة على التنظيم الحديث لجهد قضبان30 kV في محطة فرعية 30/220 kV دون استخدام مكثفات تقليدية. لتحقيق ذلك، تم توصيل جهاز FACTS من نوع STATCOM بالشبكة وتم التحكم فيه بواسطة وحدة تحكم من نوع PI تم تركيبها باستخدام طريقة Evans.

تم إجراء محاكاة رقمية للتشغيل السكوني للشبكة المجمعة المجهزة بـ STATCOM باستخدام برنامج تدفق الاستطاعة المعتمد على طريقة Jacob Jacobi. أقرت النتائج نجاعة الحل التقني المقترح، حيث أظهر تفوقًا في المرونة والسرعة والدقة، مقارنة بالمكثفات التقليدية.

الكلمات المفتاحية: شبكة كهربائية، التجميع، تدفق الطاقة، طريقة Jacob Jacobi، FACTS، STATCOM، وحدة تحكم PI ، طريقة Evans.

Résumé

Le client potentiel CIS-Sonatrach est l'un des piliers de l'industrie énergétique nationale ; il nécessite un approvisionnement fiable en électricité pour garantir le bon fonctionnement de ses unités de production. Ce mémoire est consacré à la régulation moderne de la tension au jeu de barres **30 kV** du poste client 220/**30 kV**, sans recourir aux compensateurs conventionnels. Pour ce faire, nous avons raccordé un système FACTS de type STATCOM au réseau, piloté par un régulateur de type PI synthétisé par la méthode d'Evans. Sur la base d'un programme d'écoulement de puissance utilisant la méthode de Jacob Jacobi.

Les simulations numériques du fonctionnement statique du réseau équipé du STATCOM, ont validé la solution technique, en montrant une flexibilité, une rapidité et une précision incontestables, comparées à celles des compensateurs conventionnels.

Mots clés : Réseau électrique, agrégation, Ecoulement de puissance, Méthode de Jacob Jacobi, FACTS, STATCOM, Régulateur PI, Méthode d'Evans.

Abstract

The CIS-Sonatrach, a key player in Algerian energy industry, requires a reliable electricity supply to ensure the smooth operation of its production units. This study focuses on the modern voltage regulation of the **30 kV** busbar of the 220/**30 kV** customer substation, without using conventional compensators. To achieve this, a STATCOM (Static Synchronous Compensator), which is a FACTS (Flexible AC Transmission System) device, was connected to the electrical network and controlled by a PI controller synthesized using the Evans method.

Numerical simulations of the static operation of the STATCOM-equipped network were performed using a power flow program based on the Jacob Jacobi method. The results validated the proposed technical solution, showcasing its superior flexibility, rapidity, and accuracy compared to conventional compensators.

Keywords: Electrical network, aggregation, Power flow, Jacob Jacobi method, FACTS, STATCOM, PI controller, Evans method.

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des acronymes

Introduction générale **1**

1 Présentation du site d'étude **3**

1.1 Historique……...3
1.2 Situation géographique……...3
1.3 Organigramme de la direction régionale……4
1.4 Direction de maintenance……...5
1.4.1 Organigramme de la direction de maintenance……...……..5
1.5 Poste de distribution électrique……...6
1.5.1 Présentation ……..……6
1.5.2 Principaux équipements……..…..7
1.5.2.1 Poste blindé……..7
1.5.2.2 Transformateurs……..7
1.5.2.2.1 Transformateur 220kV-30kV 120MVA……8
1.5.2.2.2 Transformateur 30kV-5.5kV……..9
1.5.2.2.3 Transformateur 30kV-0.4kV……..9
1.5.2.3 Lignes……..10
1.5.2.4 Tableaux 30kV et 5,5kV……10
1.5.2.5 Équipement BT……..11
1.5.2.5.1 Chargeur batterie 110V/4510W ECXEL – 110V/60A……...11
1.5.2.5.2 Onduleur ASI 10KV EXOR 220V -50Hz/10kA……12
1.5.2.6 Groupe électrogène……13
1.5.2.7 Équipement d'appareillage……13
1.5.2.8 Équipements de protections individuelles……15
1.5.2.9 La supervision et son système……...……15
1.5.3 Défaillances……...……...……16

2 Agrégation et fonctionnement statique du réseau existant **18**

2.1 Introduction..……..18
2.2 Réseau de distribution……18
2.2.1 Réseaux de distribution à moyenne tension……19
2.2.2 Réseaux de distribution à basse tension……..19
2.3 Réseau d'étude……19
2.3.1 Description……...19

2.3.2 Structure générale de réseau d'étude 20
2.3.3 Données du réseau 21
2.3.3.1 Transformateur 21
2.3.3.2 Charges 22
2.3.3.3 Lignes 23
2.4 Réseau agrégé 24
2.4.1 Agrégation 24
2.4.2 Agrégation du réseau d'étude 24
2.4.3 Structure générale du réseau agrégé 26
2.5 Modélisation du réseau 27
2.5.1 Modélisation des éléments du réseau 27
2.5.1.1 Modèle du générateur 27
2.5.1.2 Modèle d'une ligne 27
2.5.1.3 Modèle des nœuds du réseau 27
2.5.1.4 Modèle d'une charge 28
2.5.1.5 Modèle d'un transformateur 28
2.5.2 Écoulement de de puissance 28
2.5.2.1 Résolution numérique de problème d'écoulement de puissance 28
2.5.2.2 Organigramme simplifié du programme d'écoulement de puissance du réseau d'étude 30
2.5.2.3 Schémas de l'écoulement de puissance 31
2.5.2.3.1 Cas normal 31
2.5.2.3.2 Cas (N-1) générateur 33
2.5.2.3.3 Cas (N-1) ligne 35
2.5.2.3.4 Cas (N-1) transformateur 37
2.5.2.3.5 Cas (N-2) transformateur 39
2.5.2.3.6 Cas de délestage de la plus grande charge 41
2.5.2.3.7 Cas de démarrage des plus gros moteurs 43
2.5.2.3.8 Cas de démarrage de plus gros moteur à vide 45
2.5.2.3.9 Cas compensé 47
2.5.2.4 Synthèse des résultats et préconisation de solutions 49
2.6 Conclusion 50

3 Utilisation d'un Système FACTS type STATCOM pour la Régulation de la Tension 53
3.1 Introduction 53
3.2 Dispositifs FACTS 53
3.2.1 Différentes Dispositifs FACTS 54
3.2.1.1 Dispositifs FACTS Shunt 54
3.2.1.1.1 Compensateur statique de puissance réactive SVC 54
3.2.1.1.2 Compensateur statique synchrone STATCOM 54
3.2.1.2 Dispositifs FACTS séries 55
3.2.1.2.1 TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) 55
3.2.1.3 Dispositifs FACTS combinés série-parallèle 55
3.2.1.3.1 Contrôleur de transit de puissance unifié UPFC 55
3.2.2 Application pratiques des FACTS 55
3.2.3 STATCOM (Compensateur Synchrone Statique) 56

3.2.3.1 Définition 56
3.2.3.2 Modélisation du STATCOM 56

3.2.3.3 Principe de fonctionnement 57
3.2.3.4 Avantages 57
3.2.3.5 Stratégie de commande 58
3.2.3.5.1 Schéma fonctionnel complet du STATCOM 58
3.2.3.5.2 STATCOM en mode régulation directe de la tension…. 58
3.2.3.5.3 STATCOM en mode régulation indirecte de la tension.. 59
3.2.3.5.4 Synthèse du régulateur dans l'espace de transfert par la méthode d'Evans …… 60
3.2.3.6 Simulation d'un STATCOM 63
3.2.3.7 Simulation de la compensation de la puissance réactive du réseau d'étude avec STATCOM…….. 64
3.2.3.7.1 Réseau d'étude avec STATCOM en situation normale 64
3.2.3.7.2 Régulation de la tension en situation de déclenchement d'une ligne **220 kV** 66
3.2.3.7.3 Régulation de la tension en situation déclenchement d'un transformateur 220/30kV 68
3.2.3.7.4 Régulation de la tension en situation démarrage des plus gros moteurs 69
3.2.3.7.5 Régulation de la tension en situation démarrage du plus gros moteur à vide 71
3.2.3.7.6 Régulation de la tension en situation perturbée par déclenchement d'une ligne **220 kV** 73
3.2.3.7.7 Régulation de la tension en situation perturbée par déclenchement d'un transformateur 220/30kV 74
3.2.3.7.8 Régulation de la tension en situation perturbée par le démarrage des plus gros moteurs……...75
3.2.3.7.9 Régulation de la tension en situation par le démarrage du plus gros moteur à vide……77

3.3 Conclusion 77

Conclusion générale **78**
Références 79

Liste des figures

Figure 1.1: Situation géographique du site 4
Figure 1.2: Organigramme de la direction régionale HM 4
Figure 1.3: Organigramme de la direction de maintenance 5
Figure 1.4: Schéma unifilaire d'un poste électrique de distribution 6
Figure 1.5: Poste blindé 7
Figure 1.6: Transformateurs **220/30 kV-120 MVA** 8
Figure 1.7: Transformateur **30 kV-0.4 kV** 9
Figure 1.8: Tableaux de distribution 30kV et **5.5 kV** 10
Figure 1.9: batteries 110V au Cadmium-Nickel. 11
Figure 1.10: Un transformateur d'intensité. 14
Figure 1.11: Console de réglage TSM2001 15
Figure 1.12: Caméra Thermographique 15
Figure 1.13: Équipements de protections individuelles 16
Figure 1.14: Salle de supervision 16
Figure 1.15: Sepam 2000 16
Figure 2.1: Schéma du circuit unifilaire du réseau d'étude 20
Figure 2.2: Méthode d'agrégation 25
Figure 2.3: Schéma du circuit unifilaire du réseau agrégé 26
Figure 2.4: Modèle en π d'une ligne courte 30
Figure 2.5: Organigramme de calcul de l'écoulement de puissance 31
Figure 2.6: Schéma d'écoulement de puissance, en situation normal 32
Figure 2.7: Schéma d'écoulement de puissance, en situation de déclenchement d'un générateur à Hassi Messaoud Ouest 34
Figure 2.8: Schéma d'écoulement de puissance, en situation de déclenchement d'une ligne **220 kV** HMO-CIS 36
Figure 2.9: Schéma d'écoulement de puissance, en situation de déclenchement d'un transformateur au poste de transformation **220/30 kV** du client CIS 38
Figure 2.10: Schéma d'écoulement de puissance, en situation de déclenchement d'un transformateur au poste de transformation **220/30 kV** du client CIS 40
Figure 2.11: Schéma d'écoulement de puissance, en situation de délestage de la charge **33.24 MW/22.91 MVAr** du site RGA 42
Figure 2.12: Schéma d'écoulement de puissance en situation de démarrage des plus gros moteurs 44
Figure 2.13: Schéma d'écoulement de puissance, en situation de fonctionnement à vide avec démarrage du plus gros moteur 46
Figure 2.14: Schéma d'écoulement de puissance, en situation de la compensation capacitive de volume **167MVAr** raccordée au jeu de barre **30 kV** du poste **220/30 kV** 48

Figure 3.1: Schéma équivalent d'un STATCOM 57
Figure 3.2: Schéma fonctionnel d'un STATCOM 58
Figure 3.3: Le schéma fonctionnel du STATCOM en mode régulation directe de la tension. 59

Figure 3.4: Le schéma fonctionnel du STATCOM en mode régulation indirecte de la tension 59
Figure 3.5: Courbe d'étalonnage du réseau, en situation normale 62
Figure 3.6: Evolution de la puissance réactive injectée au jeu **30 kV**, en situation normale 62
Figure 3.7: Evolution de la tension au jeu de barres **30 kV**, en situation normale..... 62
Figure 3.8: Courbe d'étalonnage du réseau, en situation normale..... 63
Figure 3.9: Evolution de la puissance réactive injectée au jeu de barres **30 kV**, en situation normale…… 64
Figure 3.10: Evolution de la tension au jeu de barres **30 kV** , en situation normale……..64
Figure 3.11: Evolution de la tension au jeu de barres **5.5 kV**, en situation normale.....64
Figure 3.12: Courbe d'étalonnage du réseau, en situation de déclenchement d'une ligne **220 kV** 65
Figure 3.13: Evolution de la puissance réactive injectée au jeu de barres **30 kV**, en situation de déclenchement d'une ligne **220 kV**……...…..65
Figure 3.14: Evolution de la tension au jeu de barres **30 kV**, en situation de déclenchement d'une ligne **220 kV** 66
Figure 3.15: Evolution du courant injecté au jeu de barres **30 kV**, en situation de déclenchement d'une ligne **30 kV**……...……66
Figure 3.16: Courbe d'étalonnage du réseau, en situation de déclenchement d'un transformateur **220/30 kV**……..…….67
Figure 3.17: Evolution de la puissance réactive injectée au jeu de barres **30 kV**, en situation de déclenchement d'un transformateur **220/30 kV**..... 67
Figure 3.18: Evolution de la tension au jeu de barres **30 kV**, en situation déclenchement d'un transformateur **220/30 kV** 68
Figure 3.19: Evolution courant injecté au jeu de barres **30 kV**, en situation de déclenchement d'un transformateur **220/30 kV**..... 68
Figure 3.20: Courbe d'étalonnage du réseau, en situation de démarrage des plus gros moteurs..... 69
Figure 3.21: Evolution de la puissance réactive injectée au jeu de barres **30 kV**, en situation démarrage des plus gros moteurs..... 69
Figure 3.22: Evolution de la tension au jeu de barres **30 kV**, en fonction du temps en situation de démarrage des plus gros moteurs..... 69
Figure 3.23: Evolution du courant injecté au jeu de barres **30 kV**, en situation démarrage des plus gros moteurs..... 70
Figure 3.24: Courbe d'étalonnage du réseau, en situation de démarrage du plus gros moteur à vide..... 70
Figure 3.25: Evolution de la puissance réactive injectée au jeu de barres **30 kV**, en situation de démarrage du plus gros moteur à vide 71
Figure 3.26: Evolution de la tension au jeu de barres **30 kV**, en situation démarrage du plus gros moteur à vide……..……71
Figure 3.27: Evolution du courant injecté au jeu de barres **30 kV**, en situation de démarrage du plus gros moteur à vide 71
Figure 3.28: Evolution de la puissance réactive injectée au jeu de barres **30 kV** 72
Figure 3.29: Evolution de la tension au jeu de barres **30 kV** 72

Figure 3.30: Evolution du courant injecté au jeu de barres **30 kV**…… 73
Figure 3.31: Evolution de la puissance réactive injectée au jeu de barres **30 kV** 73
Figure 3.32: Evolution de la tension au jeu de barres **30 kV** 74
Figure 3.33: Evolution du courant injecté au jeu de barres **30kV** 74
Figure 3.34: Evolution de la puissance réactive injectée au jeu de barres **30 kV** 75
Figure 3.35: Evolution de la tension au jeu de barres **30 kV** 75
Figure 3.36: Evolution du courant injecté au jeu de barres **30 kV** 75
Figure 3.37: Evolution d la puissance réactive injectée au jeu de barres **30 kV**…….…… 76
Figure 3.38: Evolution de la tension au jeu de barres **30 kV** ……....76
Figure 3.39: Evolution du courant injecté au jeu de barres **30 kV** 77

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Localisation du site d'étude 4
Tableau 1.2: Fiche technique du poste blindé 7
Tableau 1.3: Plaque signalétique du transformateur 220/30-120 MVA 8
Tableau 1.4: Plaque signalétique 9
Tableau 1.5: Plaque signalétique 9
Tableau 1.6: Fiche technique du chargeur batterie 11
Tableau 1.7: Fiche technique du chargeur d'onduleur 12
Tableau 1.8: Fiche technique onduleur 13

Tableau 2.1: Norme Sonelgaz des niveaux de tensions 19
Tableau 2.2: Données des transformateurs 21
Tableau 2.3: Données des charges 22
Tableau 2.4: Données des lignes 23
Tableau 2.5: Résultats de simulation, en situation du cas normal 23
Tableau 2.6: Résultats de simulation, en situation de déclenchement d'un générateur à Hassi messaoud Ouest 23
Tableau 2.7: Résultats de simulation, en situation de déclenchement d'une ligne **220 kV** HMO-CIS 23

Tableau 2.8: Résultats de simulation, en situation de déclenchement d'un transformateur au poste de transformation 220/**30 kV** du client CIS 23
Tableau 2.9: Résultats de simulation, en situation de déclenchement de deux transformateurs transformateur au poste de transformation 220/**30 kV** du client CIS 40
Tableau 2.10: Résultats de simulation, en situation de délestage de la charge 33.24 MW/22.91 MVAr du site RGA. 42
Tableau 2.11: Résultats de simulation, en situation du démarrage des plus gros moteurs 44
Tableau 2.12: Résultats de simulation, en situation du démarrage de plus gros moteur à vide 46
Tableau 2.13: Résultats de simulation, en situation de compensation capacitive de volume 167 MVAr raccordée au jeu de barres **30 kV** du poste 220/**30 kV** 48
Tableau 2.14: Résultats de simulation et préconisation de solutions 49

Tableau 3.1: Différentes applications des FACTS 55

Liste des acronymes et symboles

A : Ampère.

Ah : Ampère heure.

ASVC : Advanced Static Var Compensator.

BT : Basse Tension.

CINA : Complexe Industriel Nord Algérien

CIS : Complexe Industriel Sud.

CSPR : Compensateur Statique de Puissance Réactive.

FACTS : Flexible AC Transmission Systems.

FC : Condensateur Fixe.

GIS : Gas Insulated Substation.

HM : Hassi Messaoud.

HMO : Hassi Messaoud Ouest.

HT : Haute Tension.

Hz : Hertz.

IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers

IGBT : Transistor bipolaire à grille isolée.

IGCT : Thyristor à commutation à grille isolée.

MT : Moyenne tension

P, Q : Puissances active et réactive de la charge basse tension.

P_{ag} **:** Puissance active agrégée

P_{Gi} **:** Puissance active générée.

-PMA : Puissance maximale appelée

P_{tr} : Pertes fer et pertes par effet Joule dissipées dans les composants résistifs.

Q_{ag} **:** Puissance réactive agrégée.

Q_{Gi} **:** Puissance réactive injectée.

Q_{tr} : Pertes par effet Joule dissipées dans les composants inductifs et capacitifs.

R : Résistance du transformateur.

SF6 : Hexafluorure de soufre.

SPA : Société Par Action.

SVC : Static Var Compensator.

SVG : Static Var Generator.

STATCOM : Static Synchronous Compensator.

STATCON : Static Condenser.

TCR : Thyristor Controllrd Réactance.

TCSC : Thyristor Controlled Series Capacitor.

THT : Très Haute Tension.

UPFC : Unified Power Flow Controller.

X : Réactance du transformateur.

Introduction générale

Depuis de nombreuses années, le développement de l'énergie électrique à l'échelle mondiale a donné lieu à un vaste système englobant la production, le transport et la distribution de cette énergie. Ce système a été largement façonné par une contrainte significative : en raison de la difficulté à stocker l'énergie électrique, elle doit être acheminée en temps réel des centres de production vers les utilisateurs finaux, qu'ils soient industriels ou domestiques.

La croissance démographique, l'industrialisation et l'augmentation des besoins en énergie des clients et des champs sont les principaux facteurs qui contribuent à une augmentation de la consommation d'énergie électrique engendrant, par conséquent, d'énormes problèmes techniques. Ainsi, comme solution évidente, il est nécessaire d'augmenter le nombre de d'ouvrage de réseaux, ce qui entraîne une augmentation des coûts et une détérioration de l'environnement. Par conséquent, il est aujourd'hui crucial d'avoir des réseaux interconnectés et de travailler près des limites thermiques et de stabilité pour relever les défis.

La gestion du réseau électrique implique non seulement de limiter les flux de puissance afin qu'ils restent en dessous des capacités de transport du réseau, mais aussi de surveiller divers paramètres techniques, notamment le niveau de tension. Il est crucial que la tension électrique demeure dans une plage bien déterminée, à chaque point du réseau, quelles que soient les conditions de de consommation des charges. Cela permettra de soulager les équipements et prolonger leurs durées de vie.

Aujourd'hui les dispositifs FACTS (Flexible AC Transmission Systems) sont utilisés pour améliorer la stabilité, des dispositifs intégrés dans le réseau électrique, tirant profit des progrès de l'électronique de puissance, sont déployés pour répondre à divers besoins opérationnels. Ils incluent la gestion des flux de puissance, la compensation de la puissance réactive, et le renforcement de la stabilité globale du réseau. La nouvelle architecture des réseaux électriques ouvre de nouvelles voies de recherche, en particulier dans le domaine du dimensionnement des systèmes FACTS. Parmi ceux-ci, le STATCOM se distingue en permettant un contrôle autonome et simultané de la puissance active, de la puissance réactive et de la tension, contribuant ainsi à améliorer les performances et la fiabilité du réseau électrique.

Le but principal de ce mémoire est l'étude de la régulation de la tension par compensation de la puissance réactive, du client CIS, par l'utilisation d'un STATCOM. Ce mémoire est structuré en 3 chapitres comme suit :

Chapitre 1 : Il présente le site d'étude CIS, sa situation géographique, ses équipements (poste blinde, transformateur, etc.) sans oublier les moyens de protection et de contrôle.

Chapitre 2 : il est consacré à l'agrégation, la modélisation et la simulation du réseau d'étude. La méthode de Jacob Jacobi sera utilisée pour résoudre le problème de l'écoulement de puissance dans le réseau radial, ce qui permettra d'étudier le fonctionnement statique du réseau, dans divers scénarii, puis dégager les éventuelles contraintes de fonctionnement.

Chapitre 3 : il présentera une solution moderne au problème des chutes de tension, en utilisant un système FACTS de type UPFC. Celui-ci sera modélisé puis commandé par un régulateur de type PI, synthétisé dans l'espace fréquentiel par la méthode d'Evans.

Des simulations numériques seront réalisées, dans différentes situations de fonctionnement du réseau, pour valider cette solution technique.

Enfin, le mémoire s'achève par une conclusion générale soulignant les points essentiels du travail et quelques perspectives.

Chapitre 1

Présentation du site d'étude

1.1 Historique

SONATRACH est une société par action publique algérienne SPA, dont le nom global est la Société Nationale pour la Recherche, la Production, le Transport, la Transformation, et la Commercialisation des Hydrocarbures, créée le 31 décembre 1963, spécialisée dans l'industrie pétrolière .Elle est classée la première en Afrique. La société doit répondre au souci de mobiliser les ressources de la rente pétrolière perçue très tôt comme un élément moteur dans le développement de l'Algérie.

Au fil du temps, elle se transforme en un élément essentiel de l'intégration nationale, de la stabilité et du développement économique et social. Le groupe pétrolier et gazier intervient dans l'exploration et la production, le transport par canalisation, la transformation et la com- mercialisation des hydrocarbures et dérivés, Elle s'inscrit aussi dans les domaines de la pétrochimie, de la production d'électricité, des énergies renouvelables, du dessalement d'eau de mer et de l'exploitation minière. La mise en place de ce site a été progressive au cours des années comme suit (Eddine, 2019) :

- 1956 : découverte du champ (Forage de MD 01) ;
- 1958 : mise en exploitation du champ Sud ;
- 1959 : mise en exploitation du champ Nord ;
- 1960 : création du CIS et CINA ;
- 1993 : premier forage horizontal (MDZ 453) ;
- 1996 : première reprise en short-raduis (MD 218).

1.2 Situation géographique

Situé à 21 km au sud de Hassi Messaoud, une commune algérienne de la wilaya d'Ouargla, le complexe industriel Sud SONATRACH se trouve à 86 km au sud-est d'Ouargla, à 172 km au sud de la ville de Touggourt et à 800 km au sud-est de la capitale Alger.

Le tableau (1.1) résume la localisation exacte du site d'étude :

TABLEAU 1.1 – Localisation du site d'étude

Lieu	Ouargla, Algérie, Afrique du Nord, Afrique
Type	industrie
Latitude	31,67361° ou 31° 40' 25" nord
Longitude	6,05203° ou 6° 3' 7" est

La figure (1.2) représente la situation géographique du site :



Figure 1.1 – Situation géographique du site

1.3 Organigramme de la direction régionale

La direction régionale de Hassi-Massoud est composée de cinq divisions et directions comme schématisé à la figure (1.2) :

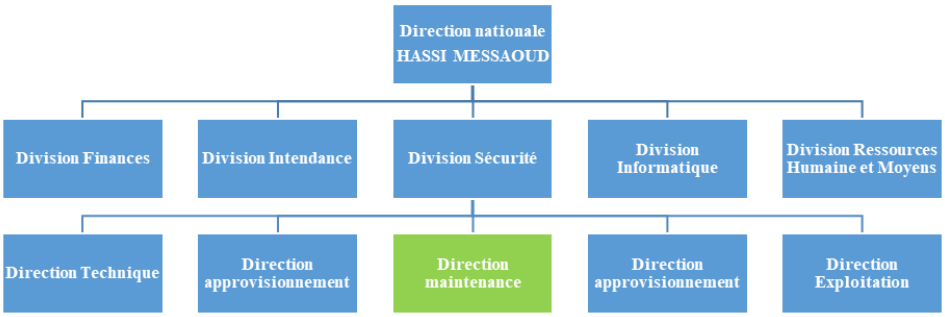


Figure 1.2 – Organigramme de la direction régionale HM.

1.4 Direction de maintenance

C'est l'administration qui vise à maintenir ou/ et rétablir un bien dans un état spécifié afin que celui-ci soit en mesure d'assurer un service déterminé. Elle regroupe aussi les actions de dépannage et de réparation, de réglage, de révision, de contrôle et de vérification des équipements matériels ou même immatériels. Il a pour mission de :

- assurer la maintenance des installations et du matériel de production ;
- garantir et optimiser les outils de production en orientant sur les décisions d'investissements ;
- mettre en place une politique de maintenance préventive ;
- gérer l'activité du service maintenance et coordonner l'action des prestataires ;
- appliquer les réglementations en matière de sécurité dans l'entreprise ;
- prévenir et assurer la sécurité du personnel, des installations et de l'environnement.

1.4.1 Organigramme de la direction de maintenance

La figure (1.3) représente l'organigramme de la direction de maintenance :

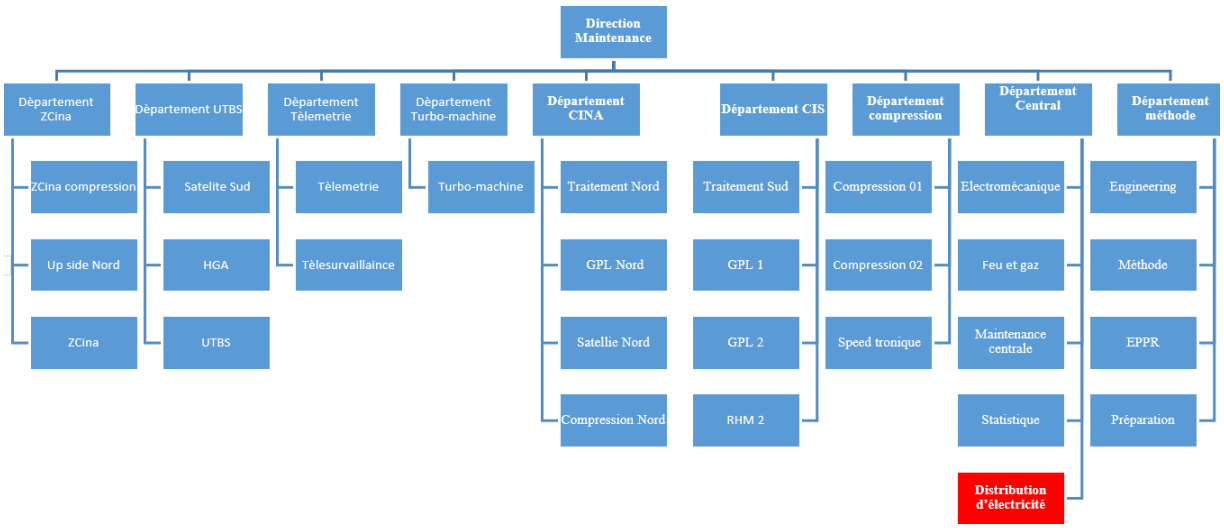


Figure 1.3 – Organigramme de la direction de maintenance.

1.5 Poste de distribution électrique

1.5.1 Présentation

Le poste de distribution électrique est un poste stratégique dans les complexes pétroliers de SONATRACH, car ils fournissent, en continu, l'énergie électrique aux différentes unités et champs. Son rôle principal est de transformer la tension électrique du niveau très haute tension THT en moyenne tension MT (220/**30 kV** *).* Il est composé de six (06) lignes aériennes, trois lignes pour le poste de distribution du complexe industriel sud (CIS) et trois autres pour le complexe industriel nord (CINA). Chaque poste est composé de :

- un poste blindé de **220 kV** où trois arrivées sont connectées à trois jeux de barres coupables, alimentant ainsi trois transformateurs 220/30*kV*- 120 MVA ;
- trois transformateurs 220/**30 kV** -100 à 120 MVA ;
- une sous-station électrique **30 kV** est alimentée par trois sources issues des transformateurs du poste blindé ;
- ces deux points de distribution, qui sont alimentés par des câbles souterrains et des lignes aériennes, sont utilisés pour fournir une alimentation aux diverses installations en **30 kV** ;
- une sous-station secondaire de 30/5.5*kV* située au CINA est utilisée pour alimenter certaines installations en **5.5 kV** , grâce à deux transformateurs 30/**5.5 kV** -15 MVA.

La figure (1.4) représente le schéma unifilaire :

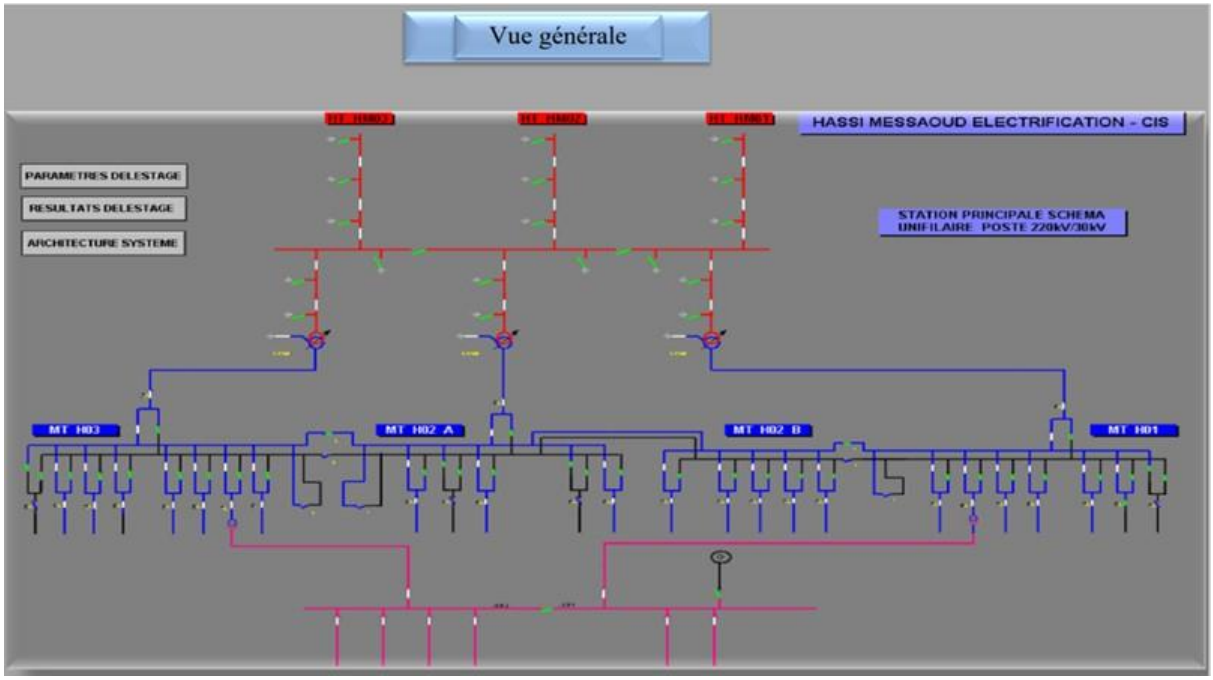


Figure 1.4 – Schéma unifilaire d'un poste électrique de distribution.

1.5.2 Principaux équipements

1.5.2.1 Poste blindé

Le tableau (1.2) représente les informations du poste blindé :

Tableau 1.2 – Fiche technique du poste blindé

Facteurs	Valeurs
Fabriquant	Schneider Vatech
Type	H9S
Courant	3150 A
Tension	170 à 300 kV

Comme son nom l'indique, c'est un matériel blindé, il s'agit d'un système de protection sous enveloppe métallique à phases séparées (GIS) composé de disjoncteurs à commande pneumatique, de sectionneurs de lignes motorisés, de sectionneurs de mise à la terre motorisés et d'un simple jeu de barres avec sectionnement.

Dans une atmosphère de gaz SF6, les barres conductrices en aluminium sont entourées d'une enveloppe en alliage d'aluminium. On divise régulièrement cette enveloppe en compartiments et on mesure la pression de chaque compartiment à l'aide d'un pressostat.

Les pressostats transmettent les instructions au contrôleur de travée (SEPAM R61) qui se trouve dans les armoires de travée à proximité du poste blindé.

Des traversées extérieures en porcelaine relient les lignes aériennes d'arrivée au poste blindé.

Des gaines blindées relient les départs aux transformateurs 220/**30 kV** directement.

La figure (1.5) représente le poste blindé :



Figure 1.5 – Poste blindé.

1.5.2.2 Transformateurs

Le transformateur électrique est un élément électrique à haute tension et un dispositif statique à deux enroulements ou plus qui, par induction électromagnétique, convertit un système de tension et de courant alternatif en un autre système de tension et de courant de valeurs généralement différentes, à la même fréquence. Son objectif principal est de transmettre de la

puissance électrique ou de réduire les pertes de transmission, ou autrement. Il peut être monophasé, biphasé ou triphasé et couplé de différentes manières : étoile, triangle et zigzag. Ce composant électrique a plusieurs éléments à considérer lors de leur conception :

- circuit magnétique ;
- enroulements;
- conducteurs ;
- isolation ;
- système de refroidissement.

1.5.2.2.1 Transformateur 220/30 kV -120MVA

Le tableau (1.3) représente la plaque signalétique de ce transformateur :

Tableau 1.3 – Plaque signalétique du transformateur 220/30-120 MVA

Facteurs	**Valeurs**
Marque	PAUWELS / ABB
Puissance nominale	ONAN 100MVA(en régime de ventilation naturelle). ONAF 120MVA(en régime de ventilation forcée)
Groupe de couplage	Dyn11
Fréquence /phase	50 Hz /triphasé
Régime /fonctionnement	continu/abaisseur
Groupe de couplage	YNyn0
Rapport de transformation à vide	$m = 30/220 = 0.1363$
Nombre	05 transformateurs PAUWELS et 1 transformateur ABB

Le neutre côté **220 kV** est sorti du transformateur et est raccordé directement à la terre à travers un sectionneur.

Le neutre côté **30 kV** est sorti du transformateur et est raccordé à une résistance de limitation de courant de défaut phase / terre de valeur ohmique 57.7 Ω.

La figure (1.6) représente un transformateur 220/**30 kV** :



Figure 1.6 – Transformateurs 220/**30 kV** -120 MVA.

- **Protection propre** : Bucchholz, Thermostat, détection de niveau l'huile, Soupape de surpression mécanique, Image thermique, température d'huile.
- **Protection associée** :
  - protection différentielle (87T) assurée par un SEPAM D22 ;
  - protection masse cuve, conventionnelle (O/C, défaut terre) avec un SEPAM T 15 ;
  - protection maximum du courant homopolaire assurée par le SEPAM T61.

1.5.2.2.2 Transformateur 30/5.5 kV -15 MVA

Le tableau (1.4) représente la plaque signalétique du transformateur 30/**5.5 kV** -15 MVA

Tableau 1.4 – Plaque signalétique

Facteurs	**Valeurs**
Puissance	15 MVA
Refroidissement	ONAN
Groupe de couplage	Dyn11
Ratio normale	30/5.817 kV

Le neutre côté **5.5 kV** est sorti du transformateur et est raccordé à une résistance de limitation de courant de défaut phase / terre. Cette résistance limite le courant de défaut phase terre.

N.B. Les protections associées sont les mêmes que celles des transformateurs précédents.

1.5.2.2.3 Transformateur 30/0.4 kV-630 kV A

Le tableau (1.5) représente la plaque signalétique du transformateur 30kV-0.4kV

Tableau 1.5 – Plaque signalétique

Facteurs	**Valeurs**
Puissance	6**30 kV** A
Refroidissement	ONAN
Groupe de couplage	Dyn11
Ratio normal	30/**0.4 kV**

Le neutre côté **400 V** est directement mis à la terre.



Figure 1.7 – Transformateur 30kV-**0.4 kV**.

1.5.2.3 Lignes

C'est un système de câbles et d'équipements destiné à transmettre l'électricité générée par les centrales électriques aux utilisateurs finaux, comme les habitations, les entreprises et les installations industrielles. Les principaux composants des lignes aériennes sont :

- les conducteurs (Phases + câble(s) de garde) ;
- les isolateurs ;
- le pylône ;
- les fondations;
- autres accessoires (pinces de suspension, jonctions de connecteurs, amortisseurs dyna- miques,. . .).

1.5.2.4 Tableaux 30kV et 5,5kV

Les tableaux MT sont des équipements d'intérieur de type FLUAIR 400 pour le **30 kV** et MC SET pour le **5.5 kV** . La gamme est composée de cellules Préfabriquées sous enveloppes métalliques, de type blindé .Elles sont équipées d'appareillages débrochables, disjoncteur à coupure dans le SF6. Les cellules sont des équipements d'intérieur sous enveloppe métallique de type blindé selon la norme CEI 298. Chaque cellule est composée de quatre compartiments, séparés entièrement par des cloisons métalliques :

- e compartiment disjoncteur ;
- le compartiment connexion câble ;
- le compartiment jeu de barres ;
- le compartiment basse tension.

La figure (1.8) représente les tableaux de distribution 30kV et **5.5 kV**



Figure 1.8 – Tableaux de distribution **30 kV** et **5.5 kV** .

1.5.2.5 Équipement BT

1.5.2.5.1 Chargeur batterie 110 V/4510 W ECXEL – 110 V/60 A

Le tableau (1.6) représente les informations du chargeur batterie

Tableau 1.6 – Fiche technique du chargeur batterie (Sonatrach, 2014)

Facteurs	**Valeurs**
Tension alimentation alternative nominale	380 V
Fréquence	50 Hz
Courant maximal par phase	15.5 A
Tension floating	119.3 V
Tension de charge	121.8 V
Courant nominal du chargeur	60 A
Réglage alarme tension DC haute déclenchement	126 V
Réglage alarme tension DC basse déclenchement	92 V
Accumulateur (model/fournisseur)	VN 119
Capacité	119 Ah
Nombre d'éléments	84
Autonomie	1 h

Les ensembles chargeurs et batteries comportent trois blocs :

- les chargeurs 110V;
- les batteries 110V au Cadmium-Nickel.;
- les coffrets de protection batterie.

La figure (1.9) représente les batteries 110V au Cadmium-Nickel :



Figure 1.9 – batteries 110V au Cadmium-Nickel.

1.5.2.5.2 Onduleur ASI 10 kV EXOR 220 V -50Hz /10 kA

- **Chargeur** :

Le tableau (1.7) représente les informations du chargeur batterie

Tableau 1.7 – Fiche technique du chargeur d'onduleur

(Sonatrach, 2014)

Facteurs	**Valeurs**
Tension alimentation alternative nominale	380 V
Fréquence	50 Hz
Courant maximal par phase	33 A
Tension floating	250 V
Tension de charge	255.2 V
Courant nominal du chargeur	60 A
Réglage alarme tension DC haute déclenchement	264 V
Réglage alarme tension DC basse déclenchement	176 V
Accumulateur (model/fournisseur)	VN40/ALCAD
Capacité	40 Ah
Nombre d'éléments	176
Autonomie	1 h

- **Onduler** : le tableau (1.8) représente les informations du chargeur batterie : Tableau 1.8 – Fiche technique onduleur (Sonatrach, 2014)

Facteurs	**Valeurs**
Tension nominale de l'onduleur	220 V
Puissance nominale de l'onduleur	10 kVA
Fréquence nominale de l'onduleur	50 Hz
Courant nominale de l'onduleur	46 A
Puissance nominale de l'alimentation secours	10 kVA
Tension nominale de l'alimentation secours	220 V
Courant nominale de l'alimentation secours	45.5 A
Réglage alarme tension DC haute déclenchement	272 V
Réglage alarme arrêt imminent déclenchement	19 V
Réglage alarme fin de décharge déclenchement	176 V
Accumulateur (modèle/fournisseur)	N40/ALCAD
Capacité	40 Ah
Nombre d'éléments	76
Autonomie	1 h

1.5.2.6 Groupe électrogène

Un groupe électrogène est une machine indépendante qui peut générer de l'électricité. Selon la puissance d'un groupe électrogène, la puissance peut être exprimée en VA (voltampère), kVA (kilovoltampère) ou MVA (mégavoltampère). Le groupe peut être mis en fonctionnement de différentes manières : électriquement grâce à deux batteries de 12 V branchées en série, ou grâce à l'air comprimé.

1.5.2.7 Équipement d'appareillage

- **Transformateurs d'intensité (TI)** : les transformateurs de mesure sont des transformateurs permettant de convertir les courants élevés en un courant mesurable et normalisé, de façon proportionnelle et en phase avec le signal primaire.

La figure (1.10) représente un transformateur d'intensité :



Figure 1.10 – Transformateur d'intensité.

- **Transformateurs de potentiel (TP)** : les transformateurs de mesure sont des transformateurs permettant de convertir des tensions élevées en une tension mesurable et normalisée, de façon proportionnelle et en phase avec le signal primaire.
- **Console de réglage TSM2001** : la console de réglage TSM2001 connecté à SEPAM 2000 permet :
- de saisir tous les paramètres généraux et les réglages des protections de SEPAM 2000 ;
- consulter toutes les informations nécessaires à l'exploitation locale de l'équipement : mesures, etc. Elle est alimentée par SEPAM et ne nécessite pas de piles ou de batterie.

La figure (1.11) représente une Console de réglage TSM2001 :



Figure 1.11 – Console de réglage TSM2001.

- **Mégohmmètre** : également connu sous le nom de testeur d'isolation, est un instrument utilisé pour mesurer la résistance électrique des matériaux isolants, est particulièrement utile pour tester l'intégrité de l'isolation des fils, câbles, moteurs, transformateurs et autres équipements électriques. Les mégohmmètres appliquent

généralement une tension élevée au matériau en cours de test et mesurent le courant résultant.

- **Micromètre (testeur de continuité)** : un instrument électronique utilisé pour vérifier si un circuit électrique est complet et sans interruption il est souvent utilisé pour tester la continuité des câbles, des connexions et du circuit imprimé.

- **Camera Thermographique** : un appareil utilisé pour détecter les points chauds ou les anomalies thermiques dans les composants électriques, tels que les connexions, les câbles, les transformateurs, etc. Ces anomalies peuvent être causées par une surcharge, une mauvaise connexion, une défaillance de l'isolation, ou d'autres problèmes électriques.

Le thermographe utilise une caméra thermique ou un capteur infrarouge pour détecter et enregistrer les variations de température. Ces variations peuvent indiquer des points de surchauffe ou des dysfonctionnements dans les composants électriques. En inspectant régulièrement les équipements électriques à l'aide d'un thermographe, les techniciens peuvent identifier les problèmes potentiels avant qu'ils ne causent des pannes ou des incidents plus graves.

La figure (1.12) représente une Caméra Thermographique :



Figure 1.12 – Caméra Thermographique.

1.5.2.8 Équipements de protections individuelles

La figure (1.13) représente l'ensemble des protections individuelles :



Figure 1.13 – Équipements de protections individuelles.

1.5.2.9 Supervision et son système

Afin d'obtenir une meilleure disponibilité et fiabilité de l'énergie, un système de contrôle et de commande existe dans les deux postes de distribution électrique. Le but de ce système est de pouvoir contrôler et commander chaque réseau depuis un lieu unique :
- contrôler ou visualiser l'état du réseau (position des disjoncteurs et des sectionneurs, visualisation des défauts et des alarmes. . .).
- commander ou ouvrir et fermer les appareils motorisés à distance. La figure (1.14) représente la salle de la supervision :



Figure 1.14 – Salle de supervision.

- **Sepam 2000** : Sepam 2000 dispose d'une large capacité de contrôle commande grâce à son automate programmable intégré et à son interface de communication vers un superviseur ou vers un autre système de commande centralisé. L'automate programmable intégré diminue de façon considérable la filerie associée et le relayage auxiliaire.

  La figure (1.15) représente le Sepam 2000 :



Figure 1.15 – Sepam 2000.

1.5.3 Défaillances

Les défaillances les plus répétées au poste de distribution électrique sont :

- claquage extrémités des câbles ;
- amorçage phase-terre par un pigeon ;
- chute de pylône (vent de sable) ;
- percussion par un engin ;
- déclenchement de départ 30kV (exemple champ S1A).

Conclusion :

Ce premier chapitre présente une vue d'ensemble du client CIS du groupe Sonatrach, en mettant l'accent sur sa mission, ses structures, ses sites de production ainsi que le réseau électrique qui assure l'alimentation des différentes unités de production et bases de vie.

Les éléments du réseau, allant du simple tableau de distribution au plus gros transformateur de tension, ont été exposés en détail afin d'avoir une idée très approfondie sur le fonctionnement des installations électriques et quantifier la charge du client CIS.

Chapitre 2
Agrégation et fonctionnement statique du réseau existant

2.1 Introduction

Un réseau électrique constitue un ensemble d'infrastructures énergétiques conçu pour acheminer l'énergie produite vers les points de consommation ou de livraison. Ces réseaux sont formés de lignes aériennes ou souterraines, créant ainsi un réseau interconnecté reliant divers points du territoire couvert par le, ce qui permet de mutualiser les moyens de production utilisés pour alimenter les clients. Il est composé de lignes électriques destinées à fonctionner à différents niveaux de tension et interconnectées via des postes électriques. Ces postes permettent de redistribuer l'électricité et de réguler les tensions grâce à l'utilisation de transformateurs. Typiquement situés aux extrémités des lignes de transmission ou de distribution, ces postes sont souvent désignés comme des sous-stations.

En plus de cette fonction de transmission et de distribution, un réseau électrique doit également assurer une gestion dynamique de la production, du transport et de la consommation d'énergie, en mettant en place des réglages visant à garantir la stabilité globale du système. Il est essentiel que l'énergie électrique fournie soit adaptée aux besoins spécifiques des consommateurs, car les processus industriels présentent des exigences de sécurité et de qualité variables. Ainsi, l'électricité doit répondre aux critères du cahier des charges à tous les niveaux de la chaîne électrique, de la production à la distribution. Les fournisseurs d'énergie doivent donc répondre aux attentes des clients en respectant des engagements contractuels personnalisés.

2.2 Réseau de distribution

Les réseaux de distribution débutent à des tensions inférieures à 60 kV, avec des postes de transformation qui sont reliés à des lignes ou des câbles de moyenne tension jusqu'aux postes de répartition. Le poste de transformation représente le dernier maillon de la chaîne de distribution et couvre tous les besoins en courant électrique (Zobeidi et al., 2021).

Ces réseaux alimentent d'une part les réseaux de distribution via des postes de transformation HT/MT, et d'autre part les utilisateurs industriels dont la charge dépasse 60 MVA et nécessite une connexion à cette tension. Le réseau de distribution peut se divise en deux parties (ZOBEIDI et al., 2021) :

2.2.1 Réseaux de distribution à moyenne tension

- principalement HTA (Haute Tension) avec des tensions de **30 kV** et 10 kV, la plus cou- rante ;
- mise à la terre du neutre via une résistance ;
- limite de courant de 300 A pour les réseaux aériens ;
- limite de courant de 1000 A pour les réseaux souterrains ;
- configuration des réseaux souterrains en boucle ouverte.

2.2.2 Réseaux de distribution à basse tension

- principalement (Basse Tension) avec des tensions de 230/**400 V** ;
- mise à la terre directe du neutre ;
- configurations des réseaux variées : radiale, maillée et bouclée ;
- gamme de tensions conformes aux normes du groupe Sonelgaz.

la norme des niveaux de tension établie par Sonelgaz est définie par le tableau (2.1) suivant (Sonelgaz, 1984) :

Tableau 2.1 – Norme Sonelgaz des niveaux de tensions

Domaines de Tension		**Valeur de la tension composée nominale**	
		Tension Alternative	**Tension continue**
Très Basse Tension (TBT)		Un ≤ 50	Un≤ 120
Basse tension (BT)	BTA	50< Un≤ 500	120< Un≤ 500
	BTB	500<Un≤ 1000	750<Un≤ 1500
Haute tension (HT)	HTA ou MT	1000<Un≤ 50000	1500<Un≤ 75000
	HTB	Un>50000	Un>75000

2.3 Réseau d'étude

2.3.1 Description

Le réseau du client CIS agit comme une passerelle dans la distribution d'électricité. Trois lignes d'alimentation venant de Hassi Messaoud Ouest (HMO) sont acheminées sur une distance de 11 km jusqu'au poste **220 kV** du client CIS. Ce poste est équipé de postes blindés, qui sont probablement des dispositifs de connexion ou de distribution électrique. De plus, il abrite trois transformateurs d'une capacité

totale de (100/120 MVA). Ces transformateurs sont utilisés pour produire en sortie la tension **30 kV** , adaptée à la distribution locale. À partir de ce point, la distribution d'électricité commence à desservir plusieurs clients.

Cela implique probablement un réseau de lignes de distribution secondaires qui s'étendent depuis le poste **220 kV** pour alimenter différents secteurs ou clients finaux. Les détails précis de cette distribution, y compris le nombre de clients desservis et les caractéristiques spécifiques de la distribution, pourraient être fournis dans les tableaux mentionnés.

- **Remarque** : Toutes les charges connectées aux transformateurs 400V sont agrégées au jeu de barre 30kV. Les sites HGA et UTBS étant encore sous garantie, la documentation concernant ces sites n'est pas disponible. C'est la raison pour laquelle la PMA (puissance maximale atteinte) a été prise comme puissance active pour chaque site. La charge "CH" correspond à la somme des charges 400V et des charges des deux nouveaux sites.

2.3.2 Structure générale de réseau d'étude

La figure (2.1) représente le schéma du circuit unifilaire du réseau d'étude :

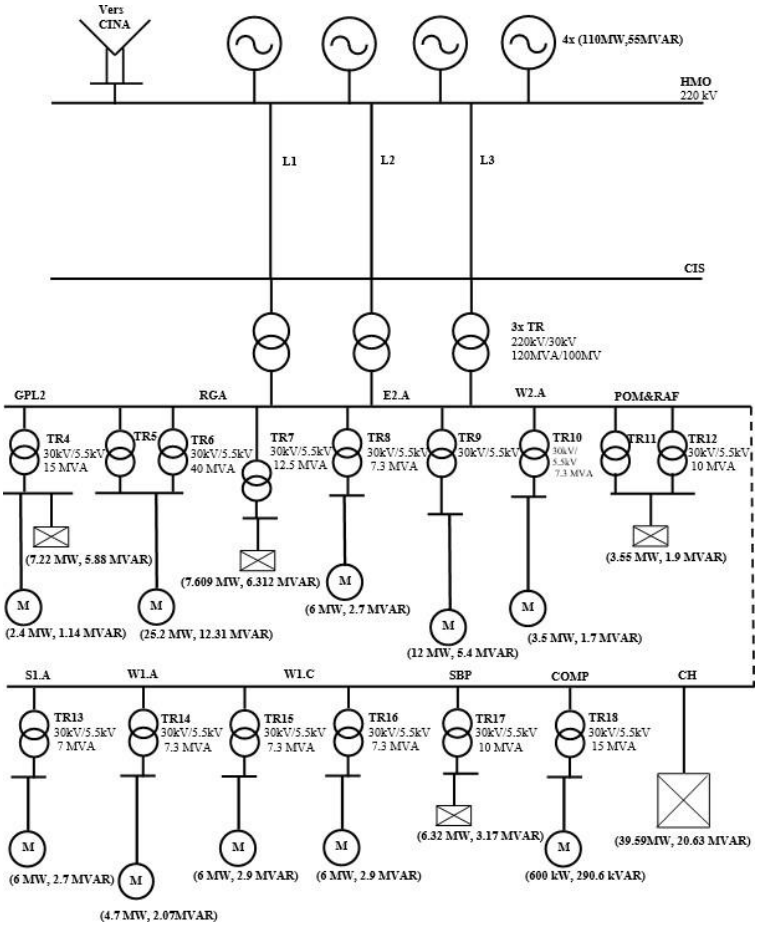


FIGURE 2.1 – Schéma du circuit unifilaire du réseau d'étude.

2.3.3 Données du réseau

Les données des transformateurs et des charges sont démontrées dans les tableaux qui suivent :

2.3.3.1 Transformateur

Les données des transformateurs du réseau d'étude sont tabulées dans le tableau (2.2):

Tableau 2.2 – Données des transformateurs (Schneider, 2001)

Transformateur	Tension (kV)	Puissance (MVA)	Tension de court-circuit (%)	Pertes cuivre (kW)
TR1	220/30	120/100	12	350
TR2	220/30	120/100	12	350
TR3	220/30	120/100	12	350
TR4	30/5.5	15	9.88	85
TR5	30/5.5	40	8.29	180
TR6	30/5.5	40	8.25	180
TR7	30/5.5	12.5	8.32	70
TR8	30/5.5	7.3	5.7	45
TR9	30/5.5	7.3	10.9	45
TR10	30/5.5	7.3	5	45
TR11	30/5.5	10	7.32	60
TR12	30/5.5	10	9.83	60
TR13	30/5.5	7.3	5.7	45
TR14	30/5.5	7	4.92	45
TR15	30/5.5	7.3	4.9	45
TR16	30/5.5	7.3	4.92	45
TR17	30/5.5	10	9.82	60
TR18	30/5.5	15	9.42	85

2.3.3.2 Charges

Les données des charges du réseau sont tabulées dans le tableau (2.3) :

Tableau 2.3 – Données des charges (Schneider, 2001)

Champ	Puissance active (MW)	Puissance réactive (MVAr)	Nature des charges
GPL2	2.4	5.88	moteur
	7 .22	1.14	charge domestique
RGA	25.2	12.31	moteur
	7.6	6.3	moteur+TI+TP
E2A	6	2.7	moteur
	12	5.4	moteur
W2A	3.5	1.7	moteur
POM&RAF	3.55	1.9	moteur+TI+TP
S1A	6	2.7	moteur
W1A	4.7	2.07	moteur
W1C	6	2.9	moteur
	6	2.9	moteur
SBP	6.32	3.17	TI+TP
COMP	0.6	0.3	moteur
CH	10.58	6.58	toutes les charges 30/5.5Kv

2.3.3.3 Lignes

Les données des lignes du réseau sont tabulées dans (2.4) :

Tableau 2.4 – Données des lignes (Schneider, 2001)

Site	**Tension nominales du transformateur (kV)**	**Nombre de lignes**	**Section (mm^2)**	**Longueur (Km)**	**Résistance directe (Ω/km)**	**Inductance Directe (mH/km)**	**Capacité directe (µF/km)**
CIS	220/30	3	411 Almélec	11	0.1298	1.271	/
GPL2	30/5.5	2	240 Cu	1.098	0.097	0.4	0.23
RGA	30/5.5	2	240 Cu	1.508	0.097	0.4	0.23
E2A	30/5.5	2	288 Alu	10	0.12	0.96	/
w2A	30/5.5	1	117 Alu	8.5	0.35	1.27	/
POM&RAF	30/5.5	2	240 Cu	1.305	0.097	0.4	0.23
S1A	30/5.5	1	177 Alu	5.1	0.35	1.27	/
W1A	30/5.5	1	177 Alu	10	0.35	1.27	/
W1C	30/5.5	1	288 Almélec	25	0.12	0.96	/
SBP	30/5.5	1	120 Cu	1.516	0.19	0.49	0.18
COMP	30/5.5	2	288 Alu	1	0.12	0.96	/
ENV	30/5.5	1	95 Cu	0.758	0.24	0.51	0.17

2.4 Réseau agrégé

2.4.1 Agrégation

Le concept d'agrégation désigne la fusion de divers liens de données en un seul lien virtuel afin de créer une vision globale et d'obtenir des données agrégées. En ce qui concerne le réseau électrique, il s'agit d'une technique qui consiste à regrouper plusieurs petits sous réseaux ou sources d'énergies, cela peut inclure des batteries et d'autres modèles de charges dans le but de :

- former un réseau plus stable ;
- simplifier les calculs et la modélisation du réseau ;
- optimiser utilisation et l'intégration des sources électriques agrégées ;
- fournir une puissance plus stable et fiable au réseau.

L'agrégation permet de simplifier la résolution du problème d'écoulement de puissance (power flow) en réduisant le modèle réel. Cela signifie qu'elle permet de rassembler plusieurs termes similaires en un terme équivalent avec ou sans conservation de sa structure globale.

Il existe deux catégories d'éléments distincts dans les réseaux : les impédances et les modèles des production/charges. Afin d'accomplir l'agrégation, il sera donc nécessaire de se pencher sur ces deux catégories d'éléments. Le terme de "modélisation agrégée" est principalement employé pour faire référence aux agrégations de charges (Buire, 2018).

2.4.2 Agrégation du réseau d'étude

A noter que le réseau d'étude est radial, cette particularité permet d'utiliser l'agrégation des départs de charge pour réduire le temps de calcul comme indiqué dans la partie précédente. Dans ce cas, l'agrégation des charges basse tension 5.5kV et des transformateurs HT/BT 30kV/5.5kV au jeu de barre 30kV, est réalisée pour obtenir une charge 30kV. Cette technique réduit le nombre de nœuds du réseau d'étude de 17 à 4 seulement.

Pour réaliser l'agrégation, il faut garder les cordonnées des charges en basse tension et prendre en considération l'écart des flux de puissance. Le schéma suivant explique la méthode utilisée pour le calcul des puissances :

- **P, Q** : Puissances active et réactive de la charge basse tension.
- Q_{tr} : Pertes réactive engendrée par les composants inductifs et capacitifs.
- P_{tr} : Pertes fer et pertes par effet Joule des composants résistifs.
- P_{ag} : Puissance active agrégée.
- Q_{ag} : Puissance réactive agrégée.

Cela peut s'écrire comme suit :

$$P_{ag} = P + P_{tr} \quad (2.1)$$

$$P_{tr} = 3R|I|^2 \quad (2.2)$$

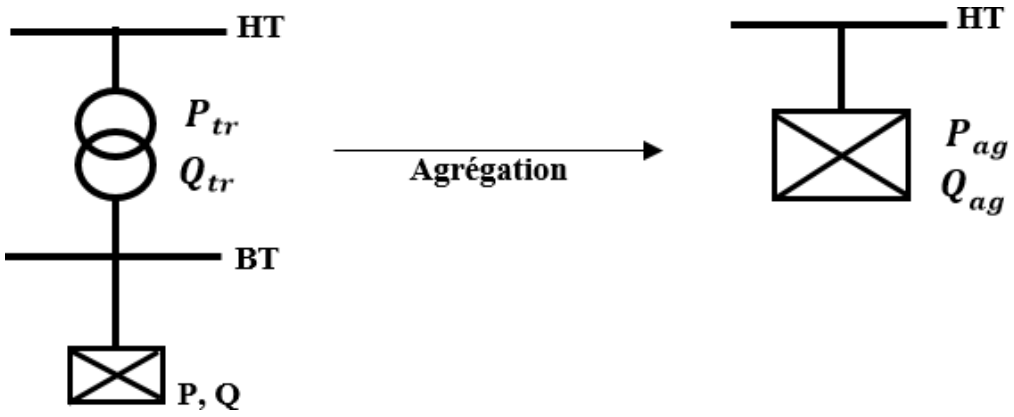


Figure 2.2 – Méthode d'agrégation.

On a :

$$Q_{ag} = Q + Q_{tr} \quad (2.3)$$

et :

donc :

$$Qtr = 3X\,|I|^2 \quad (2.4)$$

$$Qtr = \tau Ptr \quad (2.5)$$

où τ est le rapport d'impédance :

$$\tau = X/R \quad (2.6)$$

X : étant la réactance du transformateur ramenée au primaire.

R : la résistance du transformateur ramenée au primaire.

Remarque :

- Dans ce réseau d'étude, la valeur de P_{tr} est donnée dans un document interne de l'entre- prise, elle est mesurée dans des conditions standard de fonctionnement.
- Pour les transformateurs 30/5.5kV, le même rapport est considéré : $\tau = 10$.

La méthode détaillée précédemment, a permis d'élaborer un schéma de réseau agrégé réduit en nombre de nœuds, ce qui implique une minimisation du nombre d'équations considérées dans le power flow.

2.4.3 Structure générale du réseau agrégé

La figure (2.3) représente le schéma du circuit unifilaire du réseau agrégé :

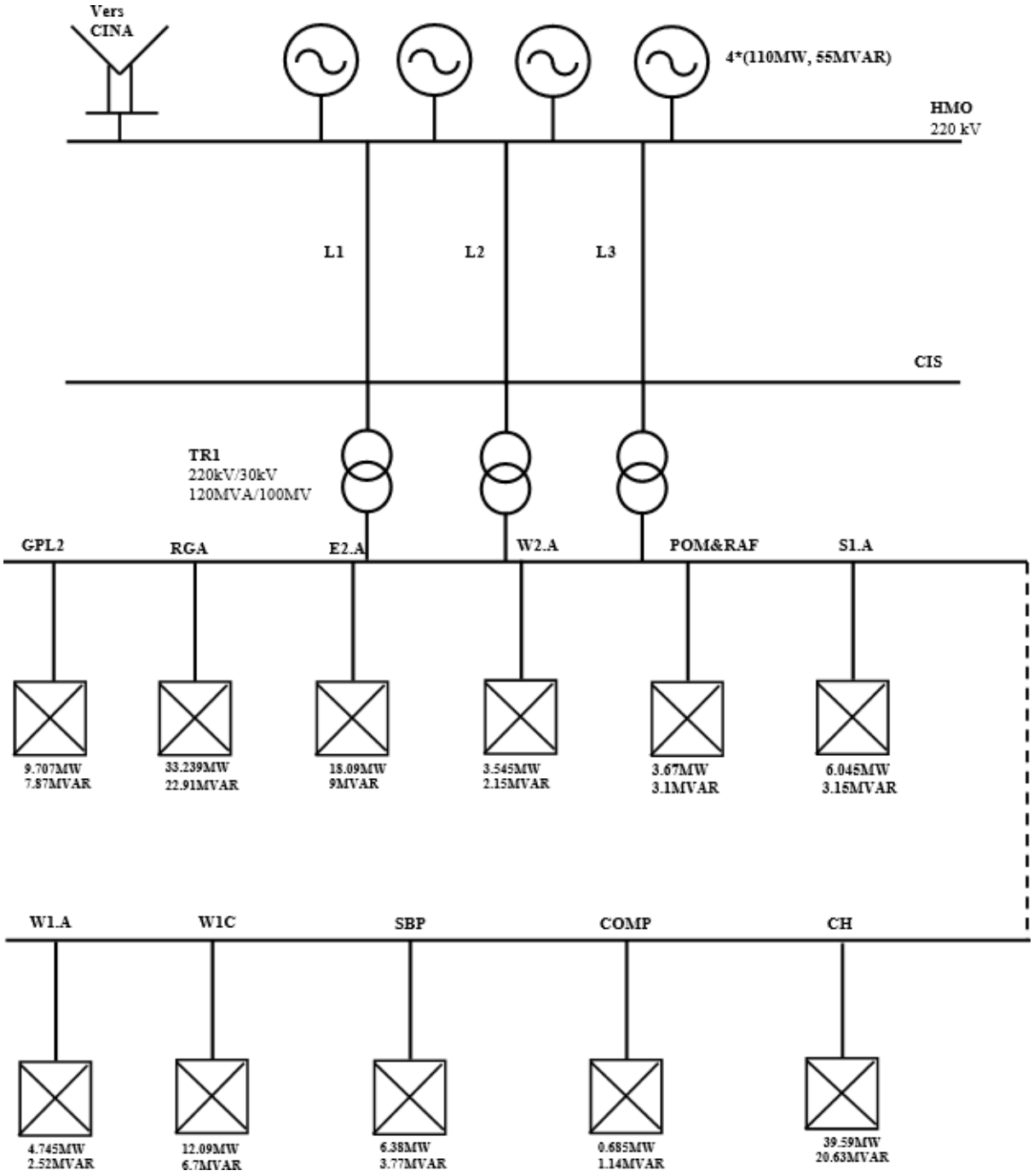


Figure 2.3 – Schéma du circuit unifilaire du réseau agrégé.

2.5 Modélisation du réseau

Dans le cadre de l'analyse d'un système électro-énergétique, il est nécessaire de représenter son fonctionnement de manière plus ou moins précise. Pour cela, des outils descriptifs, mathématiques ou autres, sont utilisés afin d'approcher son fonctionnement statique réel. Cela offre la possibilité d'étudier et de prédire le comportement du réseau dans diverses situations.

2.5.1 Modélisation des éléments du réseau

2.5.1.1 Modèle du générateur

C'est un moyen de production qui est capable de fournir de la puissance active et fournir ou consommer de la puissance réactive. Il existe en deux modèles (Magnoun, 2014) :

- le premier modèle est représenté comme un nœud PV.
- le second modèle utilise des injections de puissance complexes constantes pour modéliser les générateurs. Dans cette situation, il faut fournir les valeurs de la puissance active PGi et réactive QGi, sans possibilité de contrôler la tension. Un des générateurs est pris comme référence (slack bus), qui est considéré comme ayant des puissances actives et réactives infinies. Sa phase est sélectionnée comme référence pour le système et est fixée à δ ref = 0°.

2.5.1.2 Modèle d'une ligne

Une ligne est définie comme une succession de circuits à constantes réparties de manière uniforme sur toute sa longueur. Ceux-ci sont constitués d'une multitude d'éléments identiques, d'une inductance linéique de réactance X et d'une résistance linéique R, dans le sens longitudinal, ce qui entraîne des fluctuations de tension. La conductance et la capacitance sont linéiques dans le sens transversal. C'est donc un modèle quadripôle électrique

2.5.1.3 Modèles des nœuds du réseau

- Il existe en trois types :
- **Nœud de charge (PQ)** : il est directement connecté à la charge, il ne dispose d'aucune source d'énergie. Les puissances active et réactive de charge sont bien connues. les variables inconnues sont le module et la phase de la tension.
- **Nœud à tension régulée (PV) :** il s'agit d'un nœud relié directement à un générateur ou à un compensateur de puissance réactive. La puissance active et la tension sont bien connues. La quantité de puissance réactive produite

est limitée par des valeurs inférieures et supérieures Q_{Gmin} et Q_{Gmax} respectivement.

- **Nœud bilan (slack bus)** : ce nœud est relié à un générateur assez puissant et est pris en compte dans le calcul de l'écoulement de puissance pour compenser les pertes actives et
  garantir l'équilibre entre la demande et la production de puissance active dans le réseau. Dans un nœud bilan, le module et l'angle de la tension sont connus, et les valeurs à déterminer sont les puissances active et réactive.

2.5.1.4 Modèle d'une charge

Les charges représentent les consommations des récepteurs alimentés par réseau. Ces charges sont représentées par des puissances constantes qui ne dépendent pas de la tension nodale.

2.5.1.5 Modèle d'un transformateur

Il se modélise par un schéma équivalent monophasé comportant un transformateur idéal, des éléments en série (comme les résistances des enroulements primaire et secondaire et les inductances de fuites) et des éléments en parallèle (comme la réactance de magnétisation et éventuellement une résistance qui représente les pertes " fer ". Réduit à un niveau de tension équivalent (primaire ou secondaire), ce schéma peut être simplifié en un simple quadripôle en T. Le schéma lui-même admet un équivalent en π (BOUZIDI, 2010).

2.5.2 Écoulement de de puissance

Il est indiqué par l'élaboration d'un bilan de puissance pour évaluer les puissances actives et réactives réellement transitées dans l'installation, ce qui permet de déduire le facteur de puissance (BEN MOUSSA & LAKHAL, s. d.). Parmi ses objectifs :

- réaliser une analyse de l'état du réseau en fonction des charges connectées et de leur répartition à travers tous les accès du réseau ;
- calcul des flux de courants ;
- évaluer les pertes de puissance dans les transformateurs et les lignes.
- analyse la stabilité statique du réseau et la régulation des machines connectées au réseau ;
- optimiser la capacité de transit de puissance du réseau, etc.

2.5.2.1 Résolution numérique du problème d'écoulement de puissance

Le problème de l'écoulement de puissance dans un réseau radial est par nature non linéaire car il résulte en une équation complexe non linéaire. En effet,

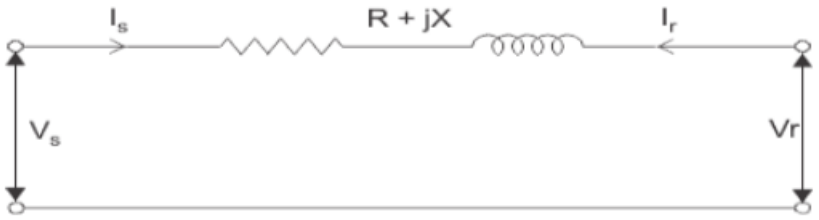


Figure 2.4 – Modèle en π d'une ligne courte.

La modélisation du réseau radial par un quadripôle peut être traduite mathématiquement par une représentation par les paramètres hybride sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} V_s \\ I_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_r \\ I_r \end{pmatrix} \tag{2.7}$$

On sait que :

$$S_r = 3 \cdot V_r \cdot I_r^* \tag{2.8}$$

Ce qui conduit à :

$$I_r = \frac{1}{3}\left(\frac{S_r}{V_r}\right)^* \tag{2.9}$$

En portant l'expression du courant tiré par le poste de charge I_r dans l'équation hybride relative à la tension : $V_s = AV_r + BI_r$, on obtient l'équation (2.10) vérifiée par l'affixe complexe associée à la tension V_r au nœud de charge :

$$AV_r + \frac{B}{3}\left(\frac{S_r}{V_r}\right)^* = V_s \tag{2.10}$$

L'analyse de l'équation (2.10) montre que l'affixe V_r est solution d'une équation algébrique complexe et non linéaire dont la solution analytique ne peut

être espérée ! Une **méthode numérique adéquate** doit être utilisée, afin d'obtenir une solution **approchée** suffisamment précise.

L'une des méthodes qui peut être utilisée est l'algorithme de **Charles Gustave Jacob Jacobi** .

Pour des raisons de commodité, il serait utile de poser : $z = V_r$. Cela donne :

$$Az + \frac{B}{3}\left(\frac{S_r}{z}\right)^* = V_s \Rightarrow z = \frac{1}{A}\left\{V_s - \frac{B}{3}\left(\frac{S_r}{z}\right)^*\right\} \tag{2.11}$$

La solution exacte $\overline{z}$ vérifie : $\overline{z} = \lim_{k \mapsto +\infty} z_k$, où la suite complexe $\left(z_k\right)_{k \in \mathbb{N}}$ est définie par la formule de récurrence suivante :

$$z_{k+1} = \frac{1}{A}\left\{V_s - \frac{B}{3}\left(\frac{S_r}{z_k}\right)^*\right\} \tag{2.12}$$

où z_0 une approximation initiale pertinemment choisie, en l'occurrence : $z_0 = V_s$.

Un programme informatique doit être élaboré puis exécuté, en exploitant toutes les données du problème, et la solution retenue sera celle qui vérifie, pour la première fois :

$$\left\| V_s - \left(Az_k + \frac{B}{3}\left(\frac{S_r}{z_k}\right)^* \right) \right\| \leq \varepsilon \tag{2.13}$$

2.5.2.2 Organigramme simplifié du programme d'écoulement de puissance du réseau d'étude

La figure (2.5) représente l'organigramme simplifié du programme d'écoulement de puissance du réseau d'étude :

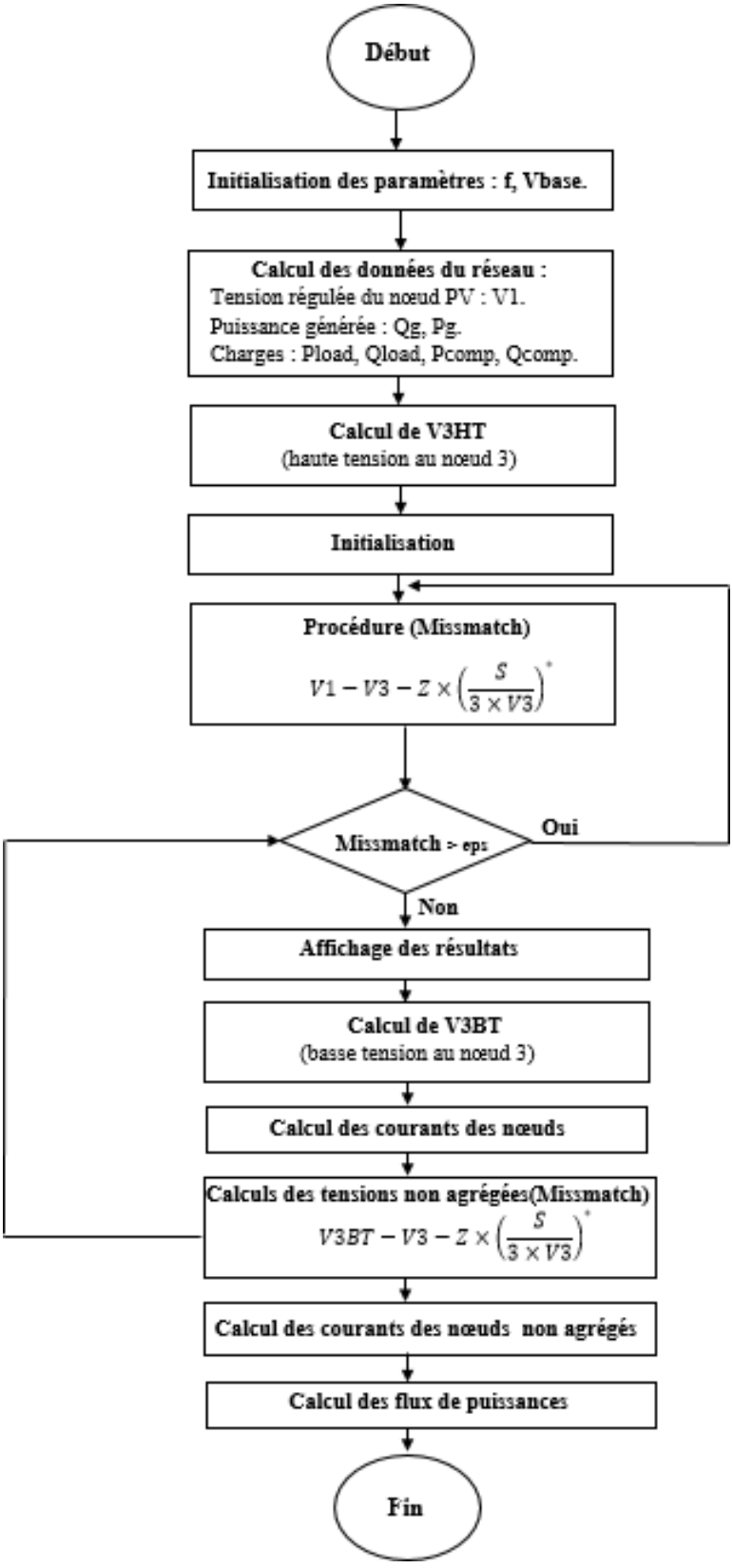


Figure 2.5 – Organigramme de calcul de l'écoulement de puissance

2.5.2.3 Schémas de l'écoulement de puissance

Un programme Matlab a été élaboré pour la résolution du problème d'écoulement de puissance dans le réseau d'étude, en tenant compte de sa topologie actuelle et des données réelles. L'exécution du programme, dans diverses situations de fonctionnement, a permis la schématisation des écoulement de puissance, en respectant les symboles et notations ordinaires utilisés dans les études de réseaux électriques.

2.5.2.3.1 Cas normal : La figure (2.6) représente le schéma d'écoulement de puissance pour le cas normal

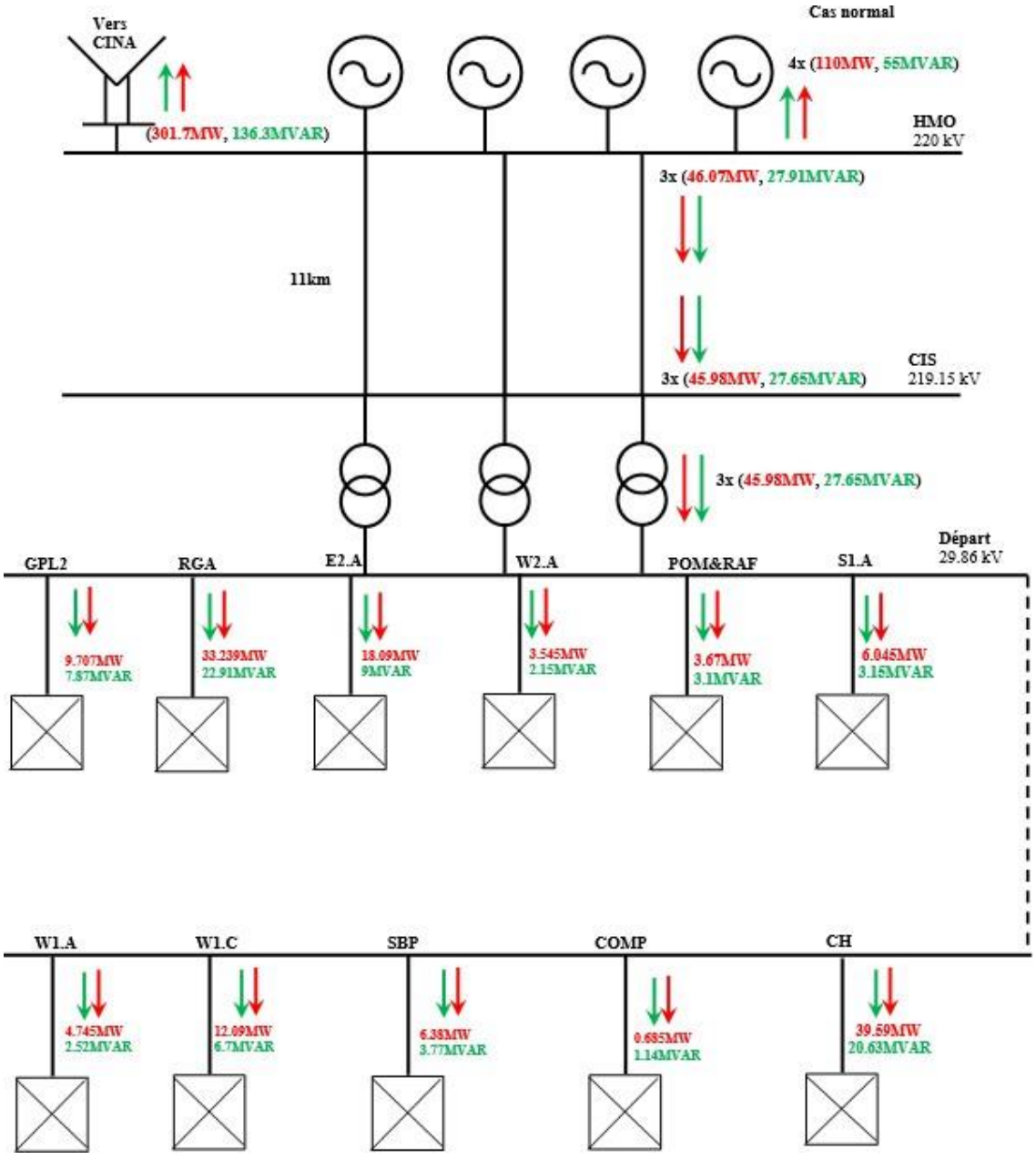


Figure 2.6 – Schéma d'écoulement de puissance en situation normale

Tableau Récapitulatif : les résultats obtenus sont tabulés le tableau (2.5) :

Tableau 2.5 –Résultats de simulation, en situation normal.

Nœud	Tension (kV)	Intensité du courant (A)	Régulation de tension (%)
CIS	219.15	424.24	0.39
Départ	29.86	424.24	0.54
GPL2	5.46	42.31	0.73
RGA	5.47	99.52	0.55
	5.47	35.08	0.55
E2A	5.47	23.36	0.55
	5.46	46.75	0.73
W2A	5.47	13.81	0.55
POM&RAF	5.47	14.29	0.55
S1A	5.47	23.36	0.55
W1A	5.47	18.23	0.55
W1C	5.47	23.65	0.55
	5.47	23.65	0.55
SBP	5.46	25.11	0.73
COMP	5.47	2.38	0.55

2.5.2.3.2 Cas N-1 générateur : La figure (2.7) représente le schéma d'écoulement de puissance en situation de déclenchement d'un générateur à Hassi Messaoud Ouest.

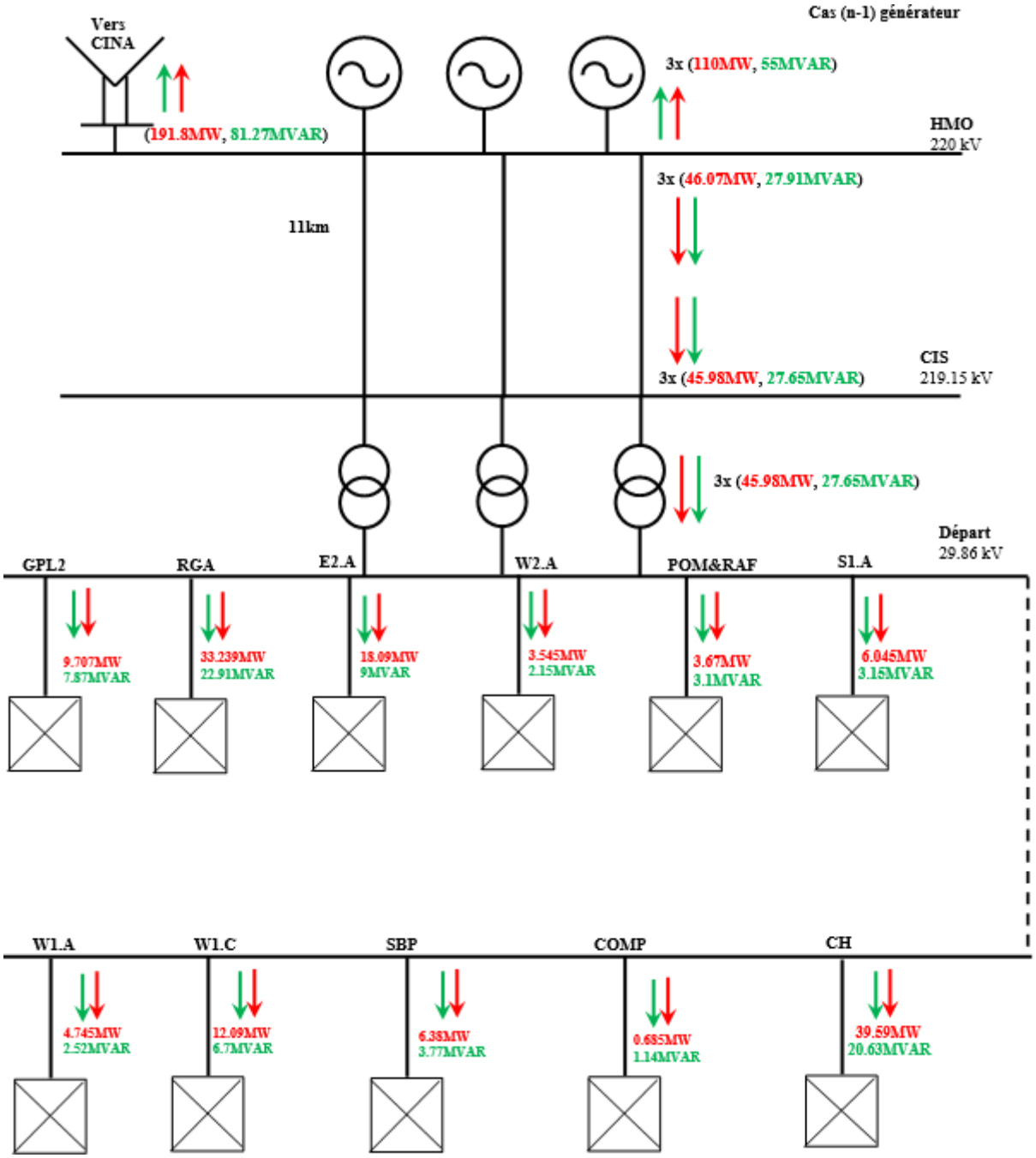


Figure 2.7 – Schéma d'écoulement de puissance, en situation de déclenchement d'un générateur à Hassi Messaoud Ouest.

Tableau Récapitulatif : les résultats obtenus sont tabulés dans le tableau (2.6) :

Tableau 2.6 – Résultats de simulation, en situation de déclenchement d'un générateur à Hassi messaoud Ouest.

Nœud	Tension (kV)	Intensité du courant (A)	Régulation de tension (%)
CIS	219.15	424.24	0.39
Départ	29.86	424.24	0.54
GPL2	5.46	42.31	0.73
RGA	5.47	99.52	0.55
	5.47	35.08	0.55
E2A	5.47	23.36	0.55
	5.46	46.75	0.73
W2A	5.47	13.81	0.55
POM&RAF	5.47	14.29	0.55
S1A	5.47	23.36	0.55
W1A	5.47	18.23	0.55
W1C	5.47	23.65	0.55
	5.47	23.65	0.55
SBP	5.46	25.11	0.73
COMP	5.47	2.38	0.55

2.5.2.3.3 Cas N-1 ligne : La figure (2.8) représente le schéma d'écoulement de puissance, en situation de déclenchement d'une ligne **220 kV** HMO – CIS.

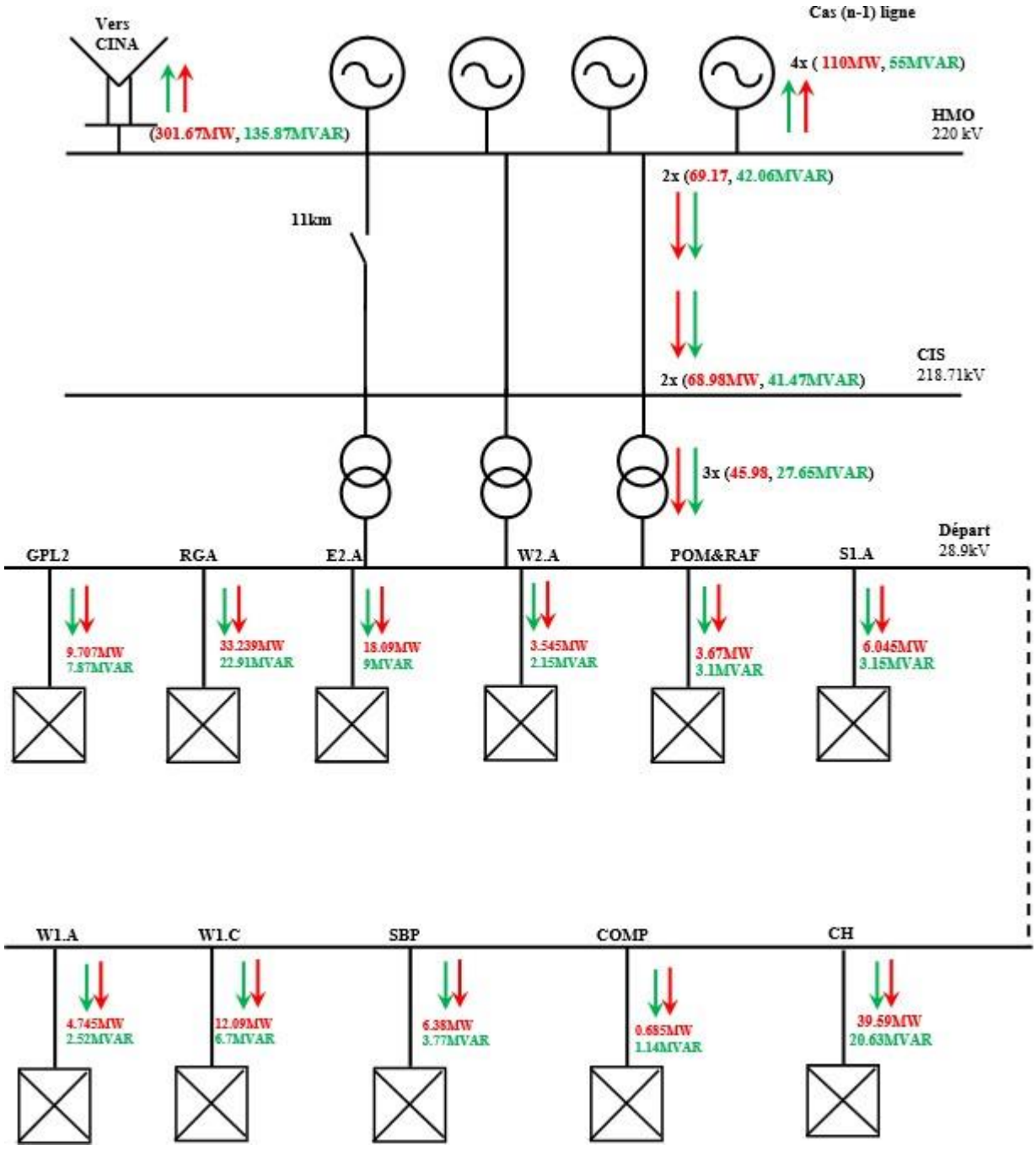


Figure 2.8 – schéma d'écoulement de puissance, en situation de déclenchement d'une ligne **220 kV** HMO – CIS.

Tableau Récapitulatif : Les résultats obtenus sont tabulés dans le tableau (2.7)

Tableau 2.7 – Résultats de simulation, en situation de déclenchement de déclenchement d'une ligne **220 kV** HMO – CIS.

Nœud	Tension (kV)	Intensité du courant (A)	Régulation de tension (%)
CIS	218.71	424.8975	0.59
Départ	29.8	424.8975	0.67
GPL2	5.45	42.38	0.92
RGA	5.46	99.67	0.73
	5.46	35.14	0.73
E2A	5.46	23.39	0.73
	5.45	46.82	0.92
W2A	5.46	13.83	0.73
POM&RAF	5.46	14.31	0.73
S1A	5.46	23.39	0.73
W1A	5.46	18.25	0.73
W1C	5.46	23.69	0.73
	5.46	23.69	0.73
SBP	5.46	25.15	0.73
COMP	5.46	2.38	0.73

2.5.2.3.4 Cas N-1 transformateur : La figure (2.9) représente le schéma d'écoulement de puissance, en situation de déclenchement d'un transformateur au poste de transformation 220/**30 kV** du client CIS.

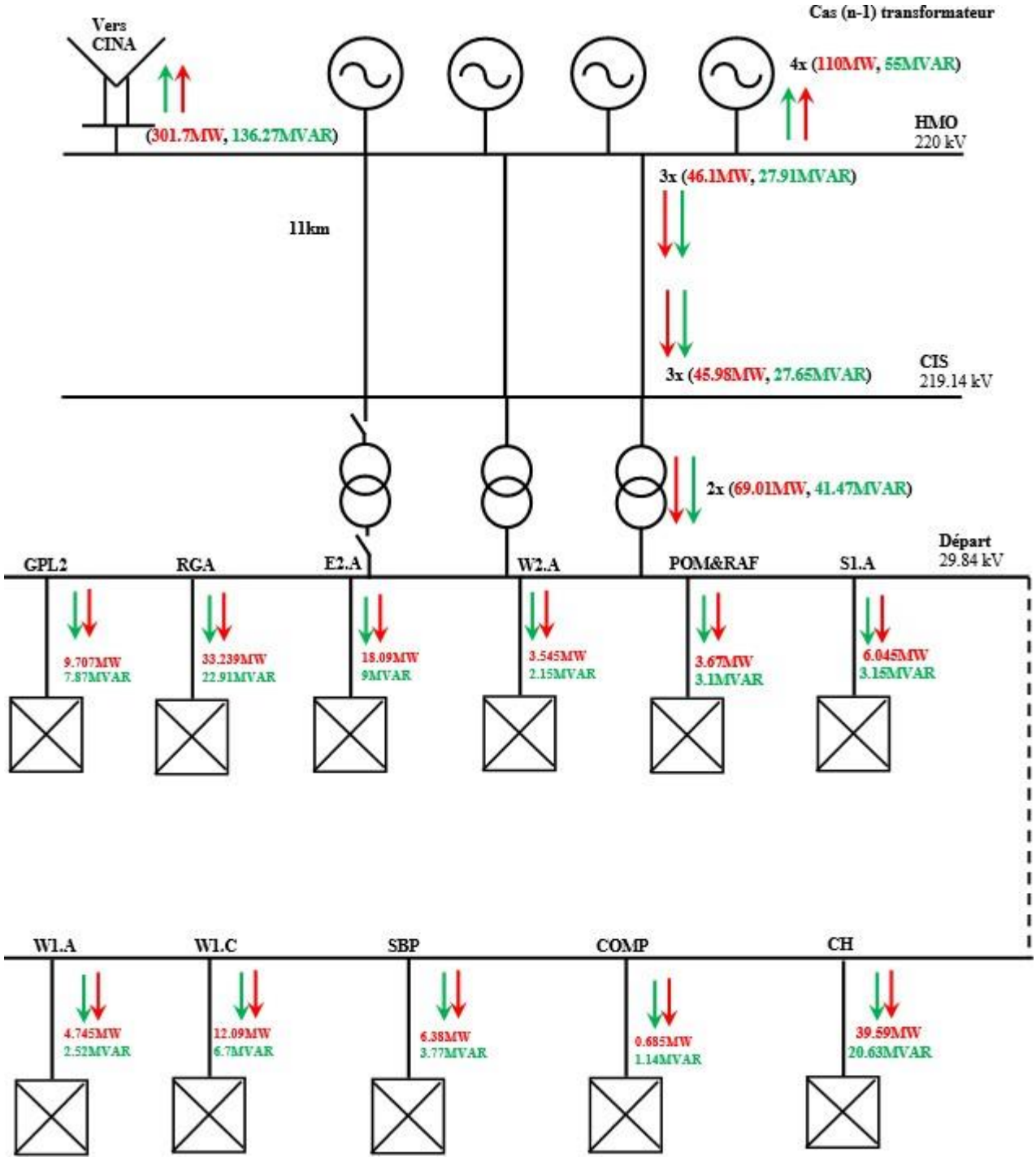


Figure 2.9 – Schéma d'écoulement de puissance, en situation de déclenchement d'un transformateur au poste de transformation 220/**30 kV** du client CIS.

Tableau Récapitulatif : Les obtenus sont tabulés dans le tableau (2.8)

Tableau 2.8 – Résultats de simulation, en situation de déclenchement d'un transformateur au poste de transformation 220/**30 kV** du client CIS.

Nœud	Tension (kV)	Intensité du courant (A)	Régulation de tension (%)
CIS	219.14	424.24	0.39
Départ	29.84	424.24	0.54
GPL2	5.46	42.38	0.73
RGA	5.47	99.67	0.55
	5.47	35.14	0.55
E2A	5.47	23.39	0.55
	5.46	46.82	0.73
W2A	5.47	13.83	0.55
POM&RAF	5.47	14.31	0.55
S1A	5.47	23.39	0.55
W1A	5.47	18.25	0.55
W1C	5.47	23.69	0.55
	5.47	23.69	0.55
SBP	5.46	25.15	0.73
COMP	5.47	2.38	0.55

2.5.2.3.5 Cas N-2 transformateur : La figure (2.10) représente le schéma d'écoulement de, en situation de déclenchement de deux transformateurs au poste de transformation 220/**30 kV** du client CIS.

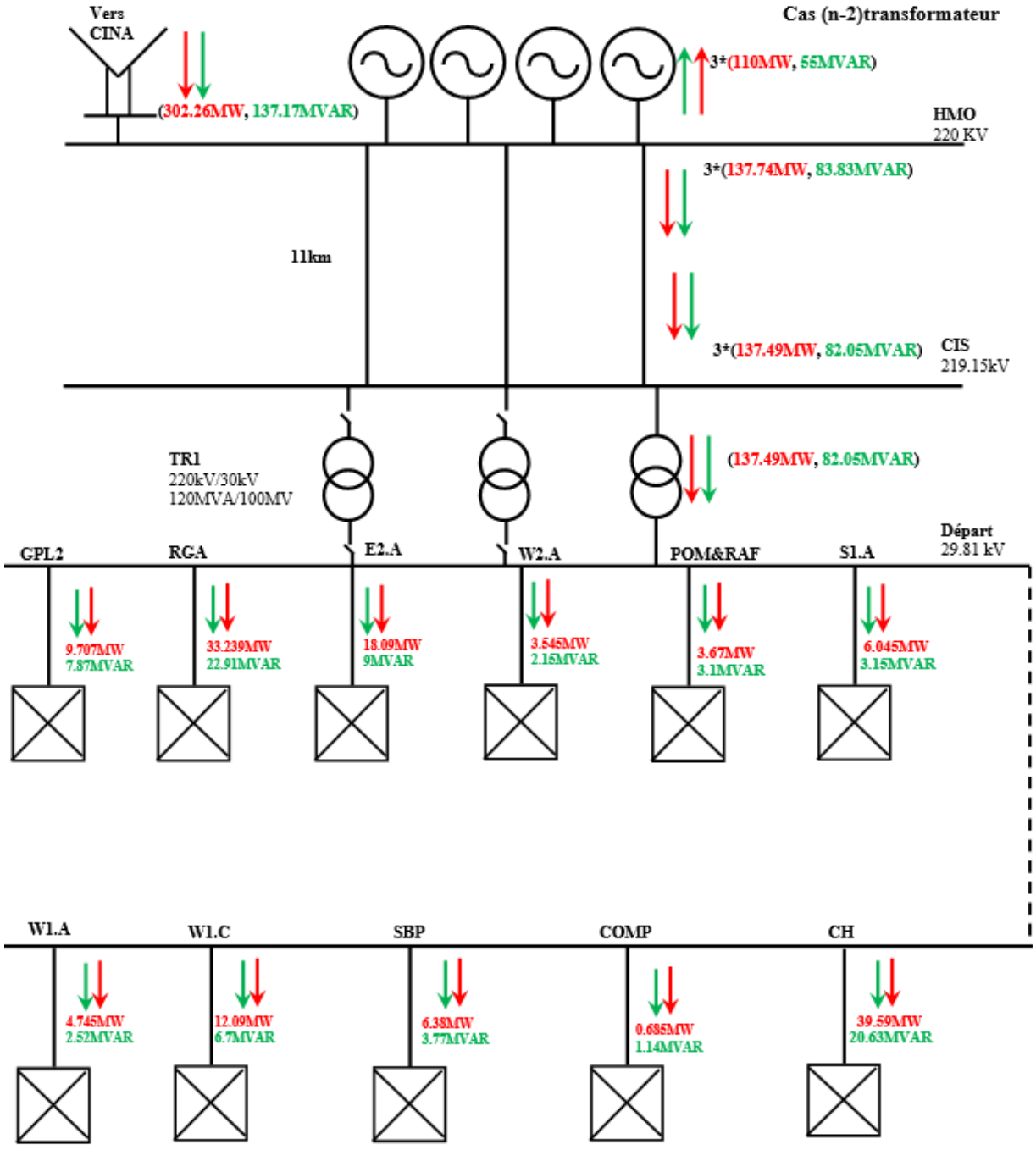


Figure 2.10 – Schéma d'écoulement de puissance, en situation de déclenchement de deux transformateurs au poste de transformation 220/**30 kV** du client CIS.

Tableau Récapitulatif : Les résultats obtenus sont tabulés dans le tableau (2.9)

Tableau 2.9 – Résultats de simulation, en situation de déclenchement de deux transformateurs au poste de transformation 220/**30 kV** du client CIS.

Nœud	Tension (kV)	Intensité du courant (A)	Régulation de tension (%)
CIS	219.14	424.8	0.39
Départ	29.81	424.8	0.64
GPL2	5.45	42.37	0.92
RGA	5.46	99.65	0.73
	5.46	35.13	0.73
E2A	5.46	23.39	0.73
	5.46	46.81	0.73
W2A	5.46	13.82	0.69
POM&RAF	5.46	14.3	0.73
S1A	5.46	23.39	0.73
W1A	5.46	18.25	0.73
W1C	5.46	23.68	0.73
	5.46	23.68	0.73
SBP	5.46	25.14	0.73
COMP	5.46	2.38	0.73

2.5.2.3.6 Cas de délestage de la plus grande charge :

La figure (2.11) représente le schéma d'écoulement de puissance, en situation de délestage de la charge 33.24 MW/22.91 MVAr du site RGA.

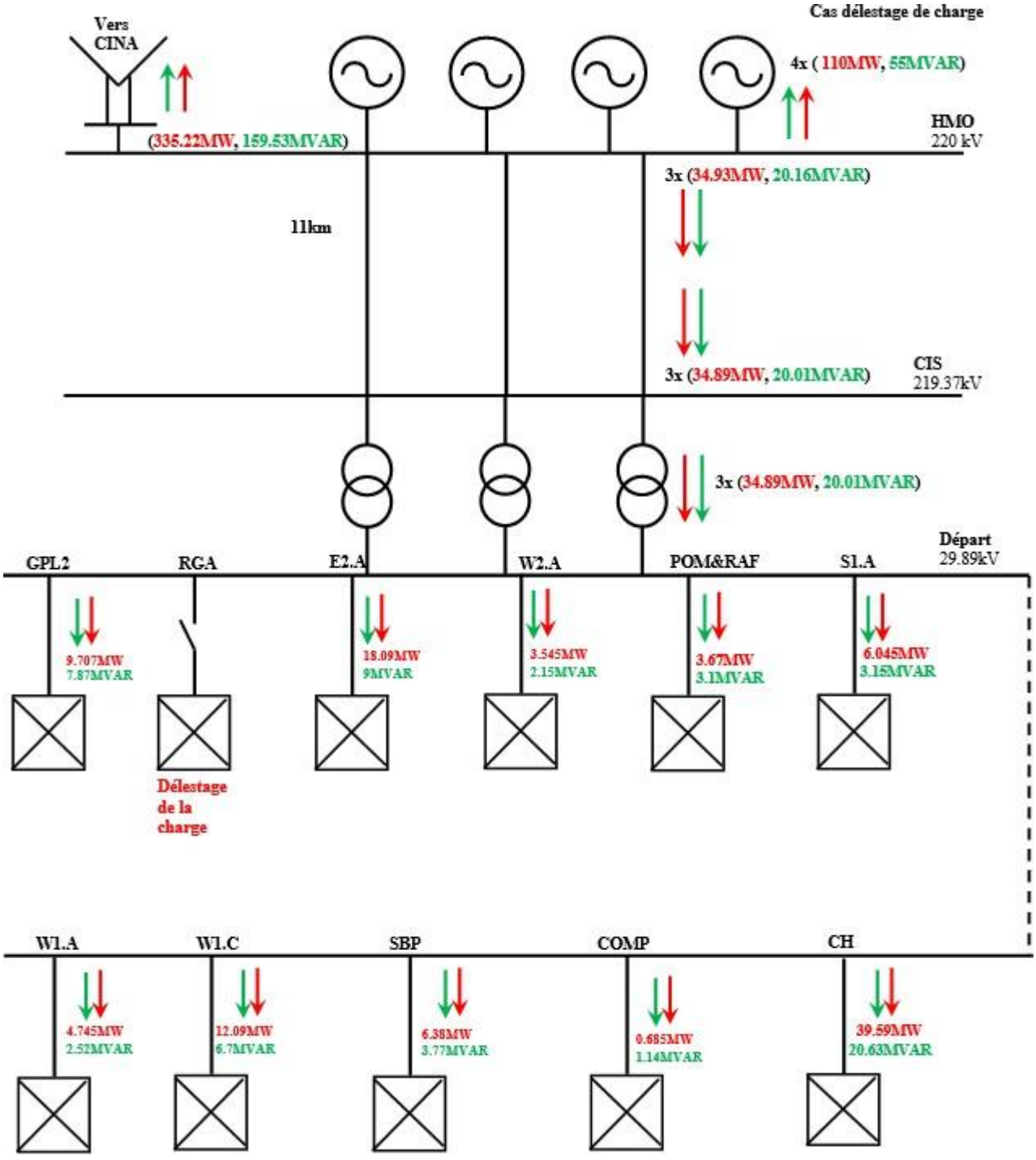


Figure 2.11 – Schéma d'écoulement de puissance, en situation de délestage de la charge 33.24 MW/22.91 MVAr du site RGA.

Tableau Récapitulatif : Les résultats obtenus sont tabulés dans le tableau (2.10):

Tableau 2.10 – Résultats de simulation, en situation de délestage de la charge 33.24 MW/22.91 MVAr du site RGA.

Nœud	Tension (kV)	Intensité du courant (A)	Régulation de tension (%)
CIS	219.37	317.49	0.29
Départ	29.89	317.49	0.37
GPL2	5.47	42.24	0.55
RGA	5.48 5.48	2.86×10^{-14} 1.15×10^{-14}	0.36 0.36
E2A	5.48 5.47	23.32 46.67	0.36 0.55
W2A	5.48	13.78	0.36
POM&RAF	5.48	14.26	0.36
S1A	5.48	23.32	0.36
W1A	5.48	18.20	0.36
W1C	5.48 5.48	23.61 23.61	0.36 0.36
SBP	5.47	25.07	0.55
COMP	5.48	2.38	0.36

2.5.2.3.7 Cas démarrage des plus gros moteurs : La figure (2.12) représente le schéma d'écoulement de puissance, en situation de démarrage des plus gros moteurs. Le courant de démarrage est pris 8 fois le courant nominal sous un facteur de puissance 15%. :

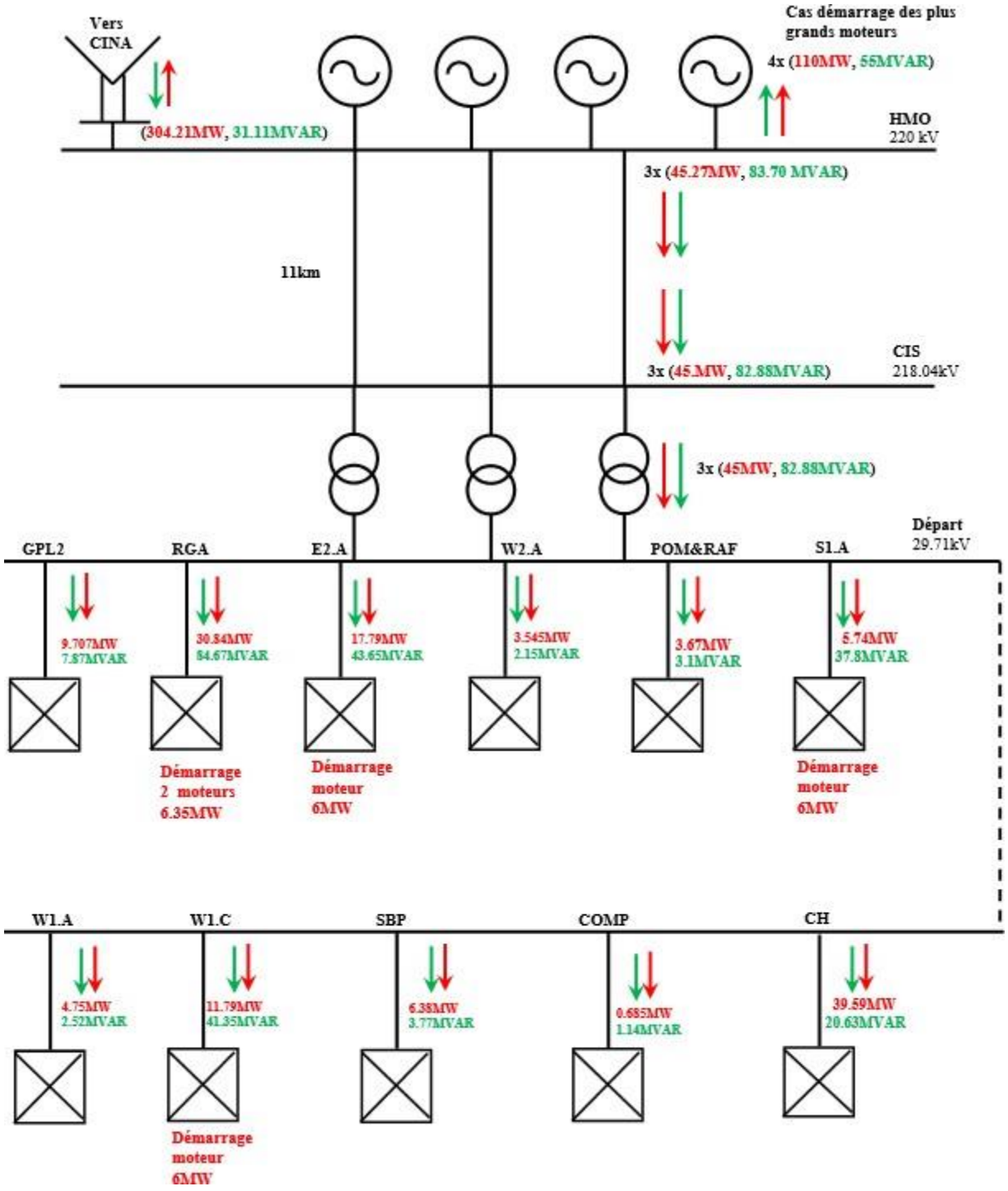


Figure 2.12 – Schéma d'écoulement de puissance, en situation de démarrage des plus gros moteurs.

Tableau Récapitulatif : les résultats obtenus sont tabulés dans le tableau (2.11):

Tableau 2.11 – Résultats de simulation, en Données du démarrage des plus gros moteurs

Nœud	Tension (kV)	Intensité du courant (A)	Régulation (%)
CIS	218.04	749.18	0.9
Départ	29.71	749.18	0.98
GPL2	5.44	42.51	1.1
RGA	5.43	276.87	1.29
	5.44	35.25	1.1
E2A	5.39	136.01	2.04
	5.44	46.97	1.1
W2A	5.44	13.87	1.1
POM&RAF	5.44	14.35	1.1
S1A	5.39	136.1	2.04
W1A	5.44	18.31	1.1
W1C	5.44	23.76	1.1
	5.4	135.82	1.85
SBP	5.44	25.23	1.1
COMP	5.45	2.39	0.92

2.5.2.3.8 Cas démarrage de plus gros moteur vide: La figure (2.13) représente le schéma d'écoulement de puissance, en situation de fonctionnement à vide avec démarrage du plus gros moteur. Le courant de démarrage est pris 8 fois le courant nominal sous un facteur de puissance 15%.

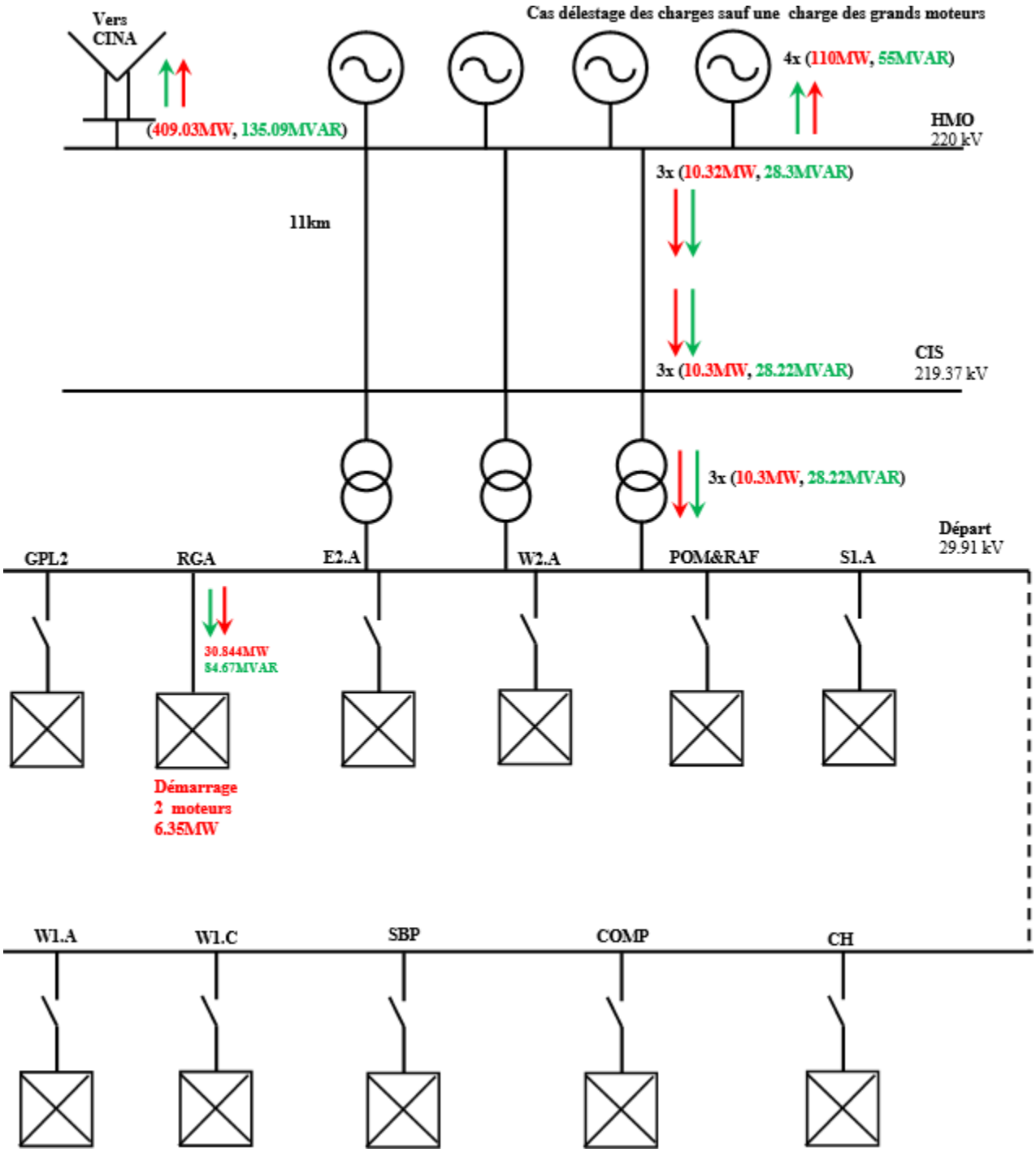


Figure 2.13 – Schéma d'écoulement de puissance, en situation de fonctionnement à vide avec démarrage du plus gros moteur.

Tableau Récapitulatif : les résultats obtenus sont tabulés dans le tableau (2.12) Tableau 2.12 – Résultats de simulation, en démarrage de plus gros moteur à vide

Nœud	Tension (kV)	Intensité du courant (A)	Régulation (%)
CIS	219.37	237.2	0.29
Départ	29.91	237.2	0.3
GPL2	5.48	0	0.36
RGA	5.47	274.99	0.55
	5.48	35.01	0.36
E2A	5.48	0	0.36
		0	0.36
W2A	5.48	0	0.36
POM&RAF	5.48	0	0.36
S1A	5.48	0	0.36
W1A	5.48	0	0.36
W1C	5.48	0	0.36
	5.48	0	0.36
SBP	5.48	0	0.36
COMP	5.48	0	0.36

2.5.2.3.9 Cas compensé : La figure (2.14) représente le schéma d'écoulement de puissance, en situation de compensation capacitive de volume 167 MVAr raccordée au jeu de barres **30 kV** du poste 220/**30 kV** .

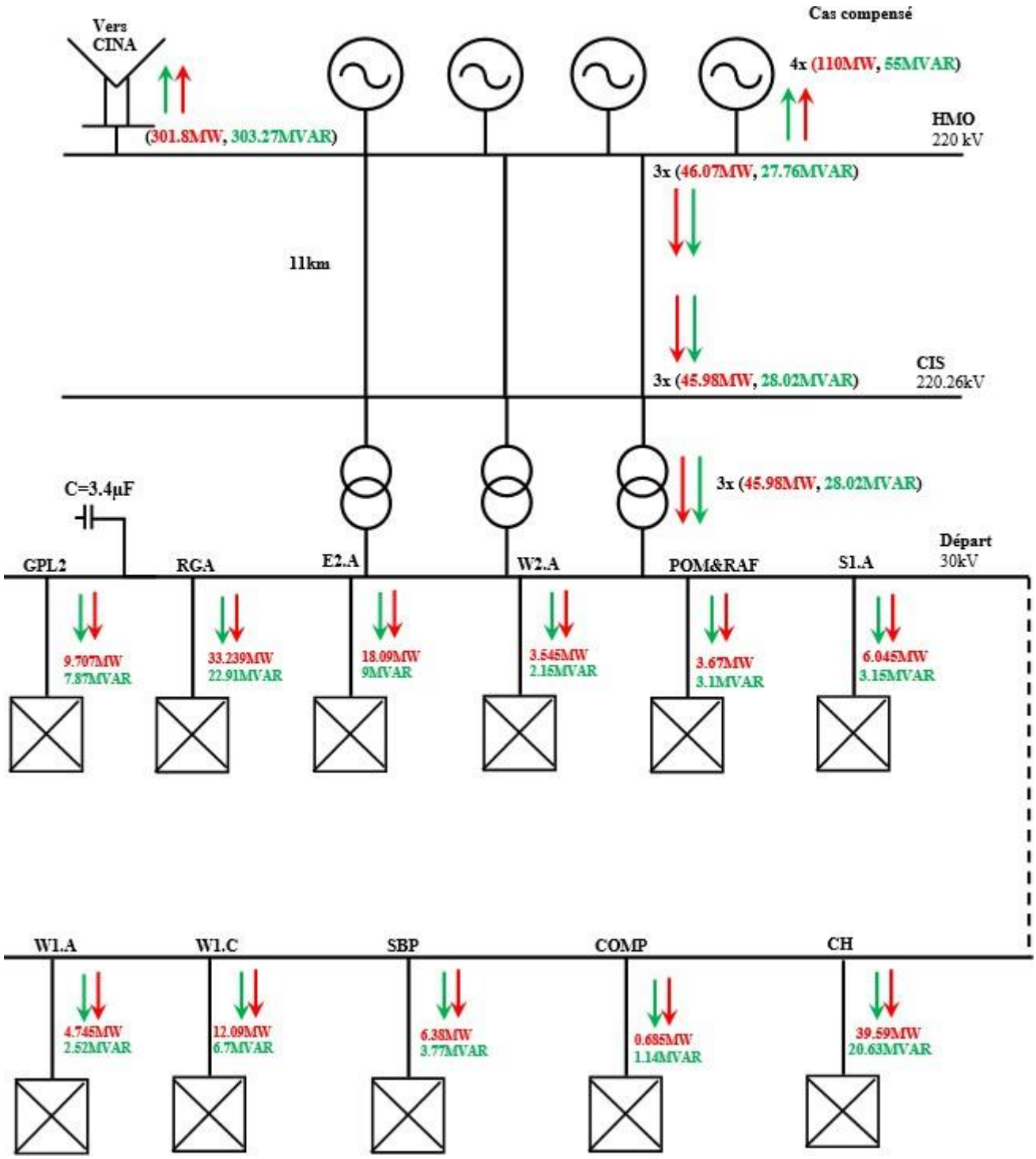


Figure 2.14 – Schéma d'écoulement de puissance, en situation de compensation capacitive de volume 167 MVAr raccordée au jeu de barres **30 kV** du poste 220/**30 kV** .

Tableau Récapitulatif : Les résultats obtenus sont tabulés dans le tableau (2.13):

Tableau 2.13 – Résultats de simulation, d de compensation capacitive de volume 167 MVAr raccordée au jeu de barres **30 kV** du poste 220/**30 kV** .

Nœud	Tension (kV)	Intensité du courant (A)	Régulation (%)
CIS	220.26	423.6184	-0.12
Départ	30	423.6184	0
GPL2	5.49	42.1	0.18
RGA	5.5	99.01	0
	5.5	34.91	0
E2A	5.5	23.24	0
	5.49	46.51	0.18
W2A	5.5	13.74	0
POM&RAF	5.5	14.21	0
S1A	5.49	23.24	0.18
W1A	5.5	18.13	0
W1C	5.5	23.53	0
	5.5	23.53	0
SBP	5. 49	24.98	0.18
COMP	5.5	2.37	0

2.5.2.4 Synthèse des résultats et préconisation de solutions

Le Tableau (2.14) résume l'essentiel des résultats de simulation, en préconisant, dans le cas échéant, les solutions permettant de pallier aux insuffisances constatées.

Tableau 2.14 : Résultats de simulation et préconisation de solutions.

Situation de fonctionnement	**Chute de tension la plus élevée (kV)**	**Pire régulation de tension (%)**	**Solution**	**Remarque**
Normale	29.86/5.46	0.73	Compensation capacitive	
N-1 groupe	29.86/5.46	0.73		
N-1 ligne	29.80/5.45	0.92		
N-1 transformateur	29.84/5.46	0.73		La tenue de la tension est très robuste
N-2 transformateur	29.81/5.46	0.73		
Délestage de la plus grande charge	29.89/5.45	0.92		
Démarrage du plus gros moteur à vide	29.89/5.47	0.55		
Démarrage des plus gros moteurs	29.72/5.43	2.04		Chute de tension hors norme
Compensation	30/5.49	0.18		

N.B : Les résultats de simulation obtenus révèlent que l'unique insuffisance de fonctionnement concerne les chutes de tension au niveau du jeu de barres **30 kV** du poste 220/**30 kV** du client CIS. Cela est une conséquence directe de la chute de tension au niveau du jeu de barres **220 kV** , qui est à son tour impactée par le courant appelé par l'ensemble des sites du client. A noter, ici, que le réseau, bien que radial, est statiquement très stable, grâce à la redondance matérielle et aux faibles distances électriques.

Actuellement, l'exploitant des installations électrique du client CIS recours, inévitablement, à relever la tension en sortie de la centrale HMO à 235 kV, comme solution technique contre les chutes de tension. Néanmoins, cette solution ne peut être que provisoire, car elle impacterait le réseau voisin et diminuerait la durée de vie de la centrale HMO, sans oublier le risque accru de claquage des câbles aux points de connexion, les défaillances coûteuses des transformateurs et des lignes et les coûts élevés associés à la mise en œuvre et à l'entretien.

En compensant le réseau au jeu de barres **30 kV** , l'ensemble de la charge est compensé. Cependant, un problème de manœuvre des batteries de condensateur pourrait poser problème ! En effet, le temps de mise en marche des batteries de condensateurs et la précision de la régulation de tension varient selon

le niveau de tensions utilisées, la chute de tension enregistrée et le nombre d'éléments de condensateur à engager.

En relation à cela, il y a lieu de dire que la compensation capacitive par batteries de condensateurs, n'est pas l'unique moyen de relever la tension au niveau du jeu de barres **30 kV** . Des moyens modernes très précis et extrêmement rapides et très flexibles, en l'occurrence les systèmes FACTS acronyme de *Flexible Alternative Current Transmission Systems*, peuvent être utilisés pour une prise en charge très efficace du problème de chute de tension dans les réseaux électriques particulièrement radiaux. Cette solution, malgré son coût très élevé, est très utilisée dans les industries sidérurgiques et pétrochimiques, à l'instar du complexe Algerian Qatari Steel à Bellara – Jijel qui et le complexe de vapocraquage des hydrocarbures à Arzew – Oran, dont les installations sont dotées de dispositifs FACTS de type SVC acronyme de *Static Var Compensator*.

2.6 Conclusion

Le présent chapitre a été consacré à l'étude du fonctionnement statique du réseau d'alimentation en énergie électrique du client CIS. Après l'avoir agrégé, en éliminant les niveaux de tension **400 V** et **5.5 kV** , le réseau a été modélisé par un circuit unifilaire à deux niveaux de tension : **220 kV** pour le transport et **30 kV** pour la distribution. Ce modèle, a ensuite été utilisé pour simuler le fonctionnement statique du réseau réel, dans différentes situations normale et contingentes.

Les simulations ont révélé des insuffisances non dangereuses notamment une chute de tension stable dont il fallait s'en débarrasser, afin de garantir un fonctionnement des unités de production sous une excellente qualité de service électrique.

Chapitre 3

Utilisation d'un Système FACTS de type STATCOM pour la Régulation de la Tension

3.1 Introduction

La libéralisation du marché de l'électricité, en cours de déploiement dans de nombreux pays, provoque une refonte significative de la façon dont les réseaux électriques sont gérés sur le plan technique et économique. Dans ce nouveau paysage, les spécialistes des réseaux électriques se trouvent confrontés à une série croissante de défis. L'introduction des systèmes FACTS (Flexible AC Transmission Systems) ouvre de nouvelles opportunités pour améliorer l'efficacité opérationnelle des réseaux en permettant des ajustements rapides et continus sur divers paramètres (Haimour, 2009).

Ce chapitre sera l'occasion de découvrir le potentiel incontestable d'un dispositif FACTS dans la régulation de la tension au jeu de barres **30 kV** du client CIS.

3.2 Dispositifs FACTS

Les technologies FACTS ne se limitent pas à un seul dispositif, mais englobent plutôt une gamme de dispositifs reposant sur l'électronique de puissance, intégrés dans les réseaux électriques pour mieux gérer le flux de puissance et accroître la capacité de transfert de leurs lignes. En agissant rapidement pour contrôler divers paramètres du réseau tels que la tension, l'impédance, le déphasage, etc., ces systèmes améliorent les marges de stabilité et assurent une plus grande flexibilité dans le transfert d'énergie (BOUAFIA & NOURANI, 2015). Les dispositifs FACTS sont insérés dans un réseau pour satisfaire plusieurs besoins tels que :

- améliorer le contrôle de la tension et la stabilité du réseau ;
- réduire des pertes actives totales ;
- compenser la puissance réactive ;
- amortir les oscillations de puissance ;
- augmenter la capacité de transport de la puissance active ;
- maîtriser la répartition et les transits des puissances ;
- améliorer les oscillations de puissance et de tension ; susceptibles d'apparaître dans les réseaux à la suite d'un défaut.

En général, les équipements FACTS améliorent la gestion des systèmes électriques existants en utilisant principalement de l'électronique de puissance. Ils fonctionnent essentiellement comme des impédances dont la valeur varie en fonction de l'angle d'amorçage, ce dernier étant une variable de commande du système.

3.2.1 Différentes Dispositifs FACTS

Les dispositifs de pointe dans la technologie FACTS utilisent des convertisseurs de sources de tension basés sur des interrupteurs statiques sophistiqués tels que les IGBT (transistors bipo- laires à grille isolée) ou les IGCT (thyristors à commutation à grille isolée). Ces dispositifs, tels que le STATCOM, le SSSC et l'UPFC, font partie des avancées dans le domaine des FACTS. Les systèmes FACTS peuvent être classés en trois catégories principales (Haimour, 2009) :

- les compensateurs parallèles ;
- les compensateurs séries ;
- les compensateurs hybrides (combinaison série-parallèle).

Dans cette section, nous essayons de présenter les FACTS les plus populaires appartenant à chaque catégorie (Hamache, 2015) :

3.2.1.1 Dispositifs FACTS Shunt

Parmi les dispositifs shunt on peut citer (Haimour, 2009) :

3.2.1.1.1 Compensateur statique de puissance réactive SVC : le Compensateur Statique de Puissance Réactive (CSPR), également connu sous l'acronyme anglais de *Static Var Com- pensator* (SVC), est un dispositif de compensation en parallèle utilisant des composants élec- troniques de puissance (tels que les thyristors), capable de répondre en quelques cycles réseau aux changements du réseau électrique. Parmi ses fonctions, il y a notamment la possibilité de connecter des charges éloignées des centres de production et de réduire les effets des défauts ou des fluctuations de charges. Un SVC est généralement composé d'une ou plusieurs batteries de condensateurs fixes (FC), activables soit par des disjoncteurs, soit par des thyristors (TSC), ainsi que d'un ensemble de réactances contrôlables (TCR) et de réactances activables (TSR) à base de thyristors. En outre, on y trouve également des filtres d'harmoniques.

3.2.1.1.2 Compensateur statique synchrone STATCOM : le compensateur statique synchrone STATCOM (Static Synchronous Compensator), autrefois appelé compensateur statique de puissance réactive avancé, est également désigné par les acronymes SSC et STATCON (Sta- tic Condenser). Le STATCOM est basé sur la structure d'un convertisseur de tension triphasé. Il correspond à l'équivalent

statique exact de la machine synchrone classique fonctionnant en compensateur, mais sans inertie. Il est principalement utilisé pour la compensation dynamique des réseaux, afin de faciliter la tenue en tension, d'accroître la stabilité en régime transitoire et d'amortir les oscillations de puissance.

3.2.1.2 Dispositifs FACTS séries

3.2.1.2.1 TCSC (Thyristor Controlled Serie Capacitor) : les capacités séries contrôlées par thyristor (TCSC), qui exploitent une technologie de pointe en matière d'électronique de puissance série, peuvent offrir une solution à ces limitations. Elles sont particulièrement utiles dans les situations où le transport d'importantes quantités d'énergie sur de longues distances est nécessaire, telles que la mise en place de liaisons entre pays ou régions. Cette approche représente une alternative très avantageuse d'un point de vue technique, économique et environnemental (Haimour, 2009) (Hamache, 2015).

3.2.1.3 Dispositifs FACTS hybrides

Les équipements FACTS précédemment exposés ont la capacité d'influencer un seul des trois paramètres cruciaux qui déterminent la puissance transmise dans une ligne (tension, impédance et angle). En combinant les dispositifs de type shunt et série, il devient envisageable de créer des dispositifs hybrides capables de contrôler simultanément ces différentes variables.

3.2.1.3.1 Contrôleur de transit de puissance unifié UPFC : le dispositif UPFC (Unified Power Flow Controller), qui est un contrôleur de transit de puissance unifié, se compose de deux convertisseurs de tension connectés par une liaison à courant continu créée à l'aide d'un condensateur. En réalité, il résulte de la fusion d'un STATCOM et d'un SSSC (Hamache, 2015).

3.2.2 Application pratiques des FACTS

Le tableau (3.1) résume d'une manière simple l'impact de l'utilisation de chaque FACTS. Tableau 3.1 – Différentes applications des FACTS

Le problème fréquenté	Correction de l'action	Type de FACTS utilisé
Faible tension à charge importante.	Fournir de la puissance réactive.	STATCOM, SVC
Haute tension à faible charge.	Absorbe de la puissance réactive.	STATCOM, SVC, TCR
Haute tension suite à un défaut	Absorbe la puissance réactive ; surcharge.	STATCOM, SVC, TCR

Faible tension suite à un défaut	Fournir la puissance réactive ; surcharge.	STATCOM, SVC
Inversion de sens de l'écoulement de puissance.	Fixation de l'angle de phase.	SSSC, UPFC

3.2.3 STATCOM (Compensateur Synchrone Statique)

3.2.3.1 Définition

L'institut IEEE définit le STATCOM (Compensateur Synchrone Statique) comme un générateur synchrone agissant en tant que compensateur parallèle de puissance réactive, capable de contrôler indépendamment le courant capacitif ou inductif généré, distinctement de la tension du réseau. Le STATCOM, également appelé anciennement Compensateur Statique de Puissance Réactive Avancé, représente la deuxième génération des FACTS. Il est l'équivalent statique précis d'une machine synchrone classique agissant en tant que compensateur, mais sans aucune inertie associée. Principalement utilisé pour la compensation dynamique des réseaux, il améliore la stabilité en régime transitoire, aide à maintenir la tension et atténue les oscillations de puissance.

Le STATCOM est le plus célèbre de cette famille car il peut contrôler de manière indépendante et simultanée la puissance active et réactive, contribuant ainsi à améliorer les performances et la stabilité du réseau électrique. Depuis les années 1980, le STATCOM a joué un rôle crucial dans les systèmes d'alimentation (Belatel, 2017). Quelques exemples notables incluent :

- un STATCOM de **± 80 MVA rms** en service sur un réseau de transport de 154 kV à Inuyama, au Japon, commercialisé depuis 1991 par Kansai Electric Power Corporation et Mitsubishi Electric Power Corporation ;
- un STATCOM de **± 100 MVAr** à **161 kV** installé à la station de Sullivan dans le nord-est du Tennessee par Westinghouse Electric Corporation aux États-Unis en 1995.

3.2.3.2 Modélisation du STATCOM

Le STATCOM est le premier FACTS qui utilise un onduleur à source de tension pour convertir une tension d'entrée DC en une tension AC, afin de compenser les besoins en puissance réactives du système. Le STATCOM, a connu jusqu'à présent différentes appellations:

- ASVC (Advanced Static Var Compensator);
- STATCON (Static Condenser);
- SVG (Static Var Generator);
- SVC light.

La figure (3.1) représente le schéma équivalent d'un STATCOM :

Le STATCOM permet le même contrôle qu'un SVC mais avec plus de robustesse, ce dispositif est capable de délivrer de la puissance réactive même si la tension du jeu de barres de connexion est très faible. D'après sa caractéristique, il est constaté que le courant maximal du STATCOM est indépendant de la tension du nœud de raccordement. Pour un STATCOM idéal (i.e: $\theta_r = \theta_s$), n'engendrant pas de pertes actives, l'équation de la puissance réactive (3.1) décrit le transfert de cette dernière avec le réseau électrique :

$$Qs = \frac{|V_r|^2}{X_s} - \frac{|V_r||V_s|}{X_r}\cos(\theta_r - \theta_s) = \frac{|V_r|^2}{X_s} - \frac{|V_r||V_s|}{X_r} \qquad (3.1)$$

- Si $|V_k| < |V_{sh}|$, alors Q_{sh} devient négative et le STATCOM fournit de la puissance réactive.

- Si $|V_{sh}| \nless V_k$, alors Q_{sh} devient positive et le STATCOM absorbe de la puissance réactive.

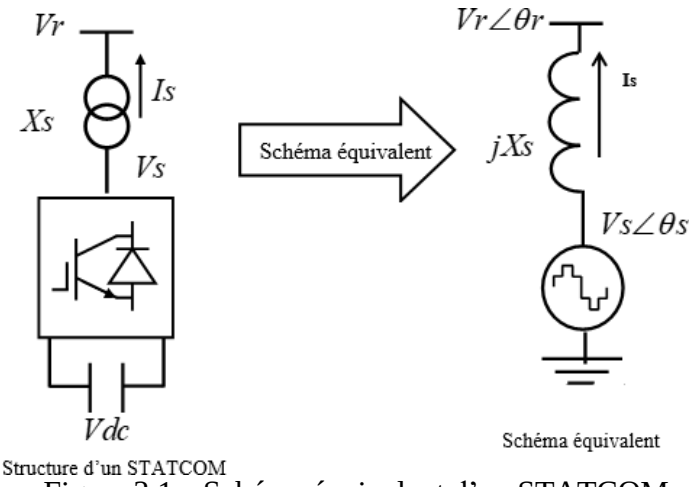


Figure 3.1 – Schéma équivalent d'un STATCOM.

3.2.3.3 Principe de fonctionnement

La conception la plus élémentaire du STATCOM est exposée dans la figure (3.1). Du côté continu, il comprend un transformateur de couplage, un convertisseur de tension et une source de stockage. Le rôle du transformateur de couplage consiste à :

- connecter le système en courant alternatif au STATCOM ;
- l'inductance de couplage présente l'avantage de ne pas créer de court-circuit avec la source en courant continu.

Bien qu'un onduleur de puissance (CSI : onduleur à source de courant) puisse être employé dans le STATCOM, l'utilisation d'un convertisseur de tension est recommandée en raison de la nature unidirectionnelle du courant. Les onduleurs GTO ou IGBT sont couramment utilisés pour mettre en œuvre l'onduleur STATCOM

3.2.3.4 Avantages

Le STATCOM a été employé pour contrôler la puissance réactive, en plus du contrôle de la tension, qui est sa tâche principale. Il peut également être utilisé pour des tâches supplémentaires telles que l'amortissement des oscillations électriques, ce qui entraîne une amélioration de la capacité de transmission. Le STATCOM présente plusieurs avantages à savoir (Belatel, 2017) :

- l'étendue de la plage d'opération est plus large qu'un SVC classique ;
- les performances dynamiques sont plus élevées qu'avec un SVC classique ;
- bonne réponse à faible tension : le STATOM est capable de fournir son courant nominal même lorsque la tension est presque nulle ;
- Un contrôle optimal de la tension, les phases sont contrôlées séparément pendant les perturbations du système.

3.2.3.5 Stratégie de commande

Le système de contrôle automatique se compose d'une phase de boucle fermée (régulateur PI et le bloc STATCOM),

3.2.3.5.1 Schéma fonctionnel complet du STATCOM La figure (3.2) représente le schéma fonctionnel d'un STATCOM pour la compensation de la puissance réactive dans un système électrique.

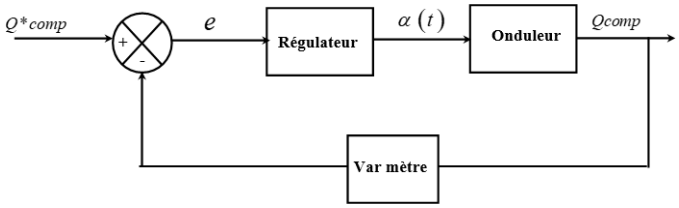


Figure 3.2 – Schéma fonctionnel d'un STATCOM.

- $\mathbf{Q}^*_{comp}$: c'est la consigne de la puissance réactive à compenser. Il s'agit de la valeur cible que le STATCOM doit atteindre pour corriger le déséquilibre de puissance réactive ;
- **e** : la différence entre la consigne de puissance réactive (Q^*_{comp}) et la puissance réactive mesurée (Q_{comp}). Ce signal d'erreur est utilisé pour ajuster le fonctionnement du STATCOM ;
- **Régulateur** : ce bloc reçoit le signal d'erreur *e* et génère un signal de commande $\alpha(t)$. Le régulateur ajuste $\alpha(t)$ pour minimiser l'erreur *e*. c'est un régulateur de puissance réactive de type Potentiel-Intégral ;
- **Onduleur** : l'onduleur convertit le signal de commande $\alpha(t)$ en une action physique sur le réseau électrique, en générant ou en absorbant de la puissance réactive Q_{comp}. L'onduleur modifie la tension ou le courant en fonction du signal de commande pour compenser la puissance réactive ;
- **Var mètre** : cet instrument mesure la puissance réactive Q_{comp} du système. Les mesures fournies par le Var mètre sont renvoyées en boucle au régulateur pour ajuster le signal de commande.

Le processus global fonctionne comme une boucle de rétroaction (feedback loop). Le comparateur génère une erreur en comparant la consigne et la mesure. Cette erreur est utilisée par le régulateur pour ajuster l'onduleur, qui à son tour modifie la puissance réactive. Le var mètre mesure la nouvelle puissance réactive, et ce cycle se répète pour maintenir la puissance réactive à la valeur souhaitée.

3.2.3.5.2 STATCOM en mode régulation directe de la tension la figure(3.3) représente Le schéma fonctionnel du STATCOM en mode régulation directe de la tension qui est un système utilisé pour stabiliser la tension dans un réseau électrique.

▷ **Fonctionnement global**

- la tension mesurée $|V|$ dans le réseau est comparée à la consigne de tension $|V|$ pour générer une erreur $e(t)$

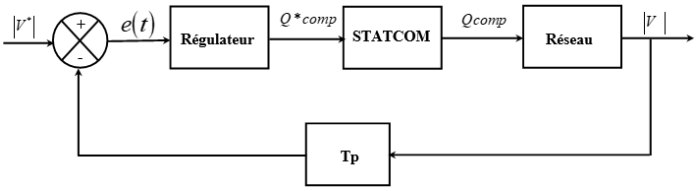


Figure 3.3 Schéma fonctionnel du STATCOM en mode régulation directe de la tension.

- cette erreur est traitée par le régulateur, qui produit une consigne de puissance réac- tive Q^*_{comp} ;
- le STATCOM ajuste sa sortie pour fournir la puissance réactive Q_{comp} nécessaire ;
- la puissance réactive ajustée modifie la tension dans le réseau pour rapprocher $|V|$ de $|V*|$;
- le dispositif de mesure de la tension fournit une rétroaction continue pour maintenir la boucle de régulation active.

En résumé, ce schéma montre comment le STATCOM régule directement la tension dans un réseau électrique en ajustant la puissance réactive basée sur l'écart entre la tension mesurée et la consigne de tension.

3.2.3.5.3 STATCOM en mode régulation indirecte de la tension La figure (3.4) représente Le schéma fonctionnel du STATCOM en mode régulation indirecte de la tension qui est un système utilisé pour stabiliser la tension dans un réseau électrique :

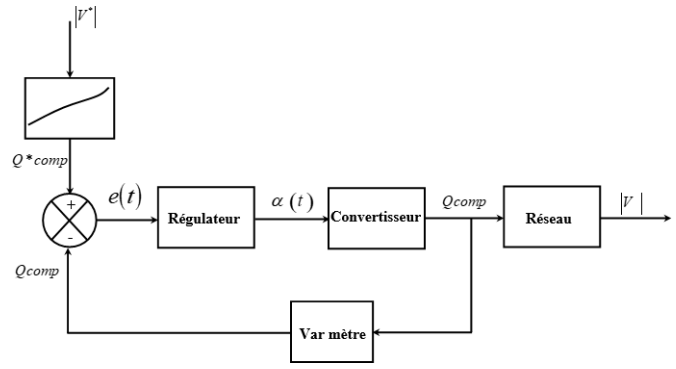


Figure 3.4 – Schéma fonctionnel du STATCOM en mode régulation indirecte de la tension.

▷ **Eléments du Schéma fonctionnel**

- **Tension de Référence (Qcomp*)** : La puissance réactive compensée désirée ou de référence pour le réseau, obtenue à partir de la courbe

d'étalonnage du réseau.

- **Mesure (Qcomp)** : la puissance réactive compensée réelle mesurée dans le réseau ;
- **Signal d'Erreur ($e(t)$)** : la différence entre la puissance réactive compensée de référence ($Qcomp*$) et la puissance réactive compensée ($Qcomp$). $e(t) = Qcomp* - Qcomp$;
- **Régulateur** : traite le signal d'erreur pour générer un signal de commande. Un régulateur PI (Proportionnel-Intégral) est généralement utilisé. Sa sortie est $\alpha(t)$;
- **Convertisseur ($\alpha(t)$)** : convertit la sortie du régulateur en une forme appropriée pour contrôler la puissance réactive. Ajuste l'injection de puissance réactive en fonction de $\alpha(t)$;
- **Réseau** : représente le réseau électrique où se déroule la régulation de la tension ;
- **Boucle de Rétroaction** : la tension mesurée est continuellement renvoyée pour être comparée avec la tension de référence, formant ainsi un système en boucle fermée.

▷ **Fonctionnement global**

- **mesure de la puissance réactive compensée et Calcul de l'Erreur** : le système mesure en continu la puissance réactive compensée du réseau ($Qcomp$). Le signal d'erreur ($e(t)$) est calculé comme étant la différence entre la puissance réactive compensée de référence ($Qcomp*$) et la puissance réactive compensée mesurée ($Qcomp$).
- **Régulation** : le régulateur PI reçoit le signal d'erreur et la traite pour produire un signal de commande (α (t)). Ce signal dicte les ajustements nécessaires à la puissance réactive ;
- **Conversion et Injection** : l'onduleur ajuste en conséquence la puissance réactive. La puissance réactive ajustée est injectée dans le réseau pour stabiliser la tension ;
- **Rétroaction** : la puissance réactive compensée du réseau est mesurée à nouveau, et le processus se répète, garantissant une régulation continue de la tension.

3.2.3.5.4 Synthèse du régulateur dans l'espace de transfert par la méthode d'Evans Un régulateur du STATCOM doit être synthétisé, en optant pour un régulateur de type PI. La fonction de transfert du système notée :

$$R(s) = K_P + \frac{K_I}{s} = \frac{K_P s + K_I}{s} = \frac{K_P\left(s+\alpha\right)}{s} \qquad (3.2)$$

où K_P et K_I désignent les gains proportionnel et intégral, respectivement.

La constante réelle α est définie par

$$\alpha = \frac{K_I}{K_P} \tag{3.3}$$

L'onduleur est ici modélisé par son modèle moyen ayant un comportement d'un 1er ordre de constante de temps $K = 3$ et de gain statique $\tau = 3\text{sec}$ (Hamache, 2020) :

$$H(s) = \frac{K}{1+\tau s} \tag{3.4}$$

La fonction de transfert en boucle ouverte est

$$H_{BO}(s) = R(s)H(s) = K_P\left(s+\alpha\right)\frac{H(s)}{s} \tag{3.5}$$

Le cahier des charges proposé stipule que : la réponse du STATCOM doit être suffisamment rapide, soit un temps de réponse de $t_s = 6s$ présente un dépassement maximum de D% = 16.3%. Cela se traduit par une paire de pôles désirés que le régulateur imposera à l'asservissement.

$$p_{1,2} = -\omega_n\left(\xi \pm j\sqrt{1-\xi^2}\right) \tag{3.6}$$

où : ω_n et ξ représentent la pulsation naturelle et l'amortissement de la réponse indicielle du STATCOM.

Ceux-ci sont donnés par :

$$\begin{cases} \xi = \dfrac{-\dfrac{\ln(D\%)}{\pi}}{\sqrt{1+\left(\dfrac{\ln(D\%)}{\pi}\right)^2}} = 0.5000 \\ \omega_n = \dfrac{4}{\xi t_s} = 1.3332 \end{cases} \tag{3.7}$$

La fonction de transfert en boucle fermée est

$$H_{BF}(s) = \frac{H_{BO}(s)}{1+H_{BO}(s)} \tag{3.8}$$

Le pôle p_1 de $H_{BF}(s)$ vérifient donc

$$1+H_{BO}(p_1)=0$$

ou encore

$$H_{BO}(p_1)=-1 \tag{3.9}$$

Par conséquent,

$$\begin{cases}\left|H_{BO}(p_1)\right|=1\\ \arg\left(H_{BO}(p_1)\right)=-180°\end{cases} \tag{3.10}$$

Soit C un réel défini par :

$$C=\arg\left(P_1+\alpha\right) \tag{3.11}$$

alors,

$$C=\operatorname{atan}\left(\frac{j\omega_n\sqrt{1-\xi^2}}{\alpha+\omega_n\xi}\right) \tag{3.12}$$

Par conséquent,

$$\alpha=\frac{j\omega_n\sqrt{1-\xi^2}}{\tan\left(C\right)}+\omega_n\xi \tag{3.13}$$

Enfin, (3.5) et (3.10) conduisent à:

$$\begin{cases}K_P=\left|\dfrac{p_1}{\left(p_1+\alpha\right)H(p_1)}\right|=1.0000\\ K_I=\alpha K_P=1.7775\end{cases} \tag{3.14}$$

3.2.3.6 Simulation d'un STATCOM

En utilisant la méthode indirecte et à l'aide de la courbe d'étalonnage représentée à la figure (3.5), les figures (3.6) et (3.7) représentent les évolutions de la puissance réactives injectée au jeu de barres **30 kV** et sa tension, respectivement. L'objectif étant d'imposer 3 consignes de puissances réactives dans 3 instants différents.

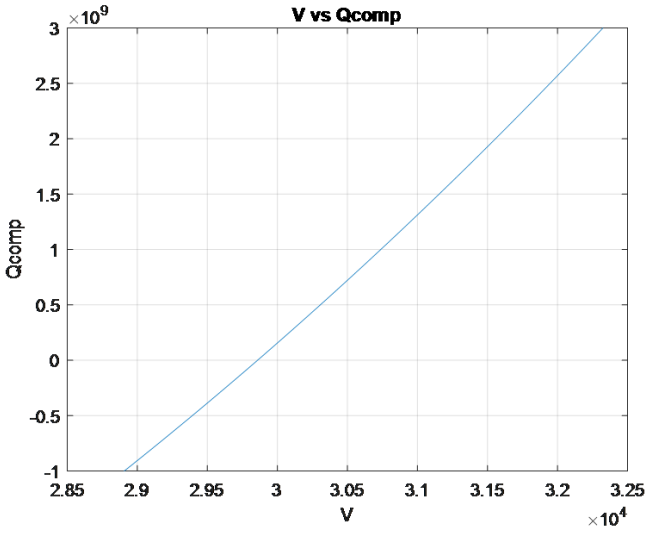


Figure 3.5 – Courbe d'étalonnage du réseau, en situation normale.

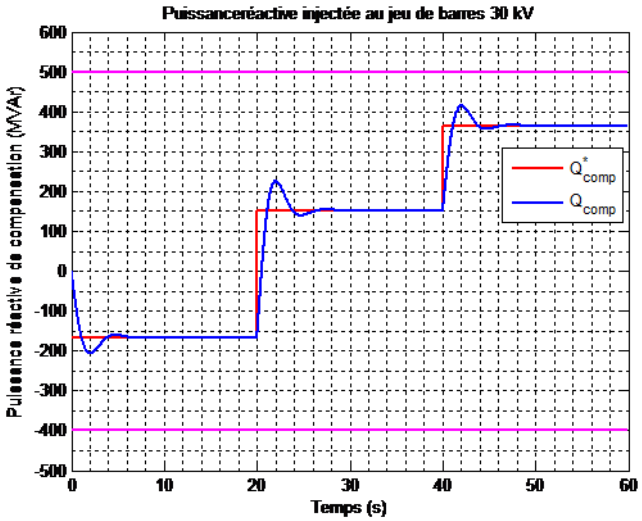


Figure 3.6 – Evolution de la puissance réactive injectée au jeu de barres **30 kV** , en situation normale.

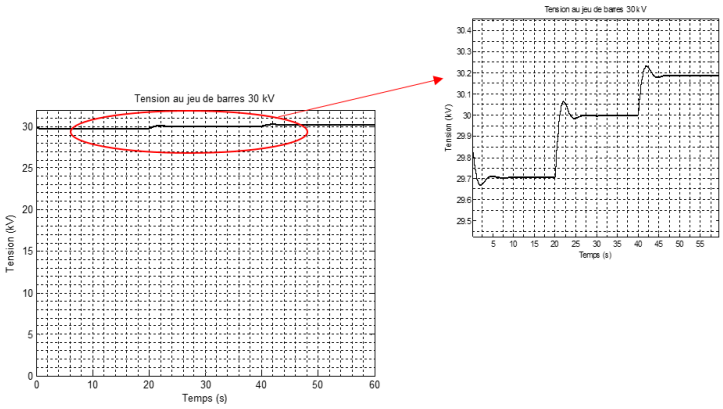


Figure 3.7 – Evolution de la tension au jeu de barres **30 kV** , en situation normale.

Les résultats de simulation montrent l'énorme flexibilité, rapidité et précision du STATCOM, tout étant loin des limites tolérées en puissance réactives. Cependant, la courbe d'étalonnage représente une faiblesse de la méthode indirecte notamment dans le cas d'un réseau à plusieurs nœuds.

3.2.3.7 Simulation de la compensation réactive du réseau d'étude avec STATCOM

Dans cette simulation, nous visons à compenser la puissance réactive au jeu de barres de **30 kV** du réseau d'étude en utilisant un STATCOM en utilisant la méthode indirecte, afin de stabiliser la tension à ce niveau de jeu de barres de **30 kV** .

3.2.3.7.1 Réseau d'étude avec STATCOM en situation normale :

En utilisant la méthode indirecte à l'aide de la courbe d'étalonnage représentée dans la figure (3.8), la figure (3.9) qui représente la puissance réactive injectée au jeu de barres 30kV en fonction du temps, les figures (3.10) (3.9), (3.10) et (3.11) représentent les évolutions de la puissance réactives injectée au jeu de barres **30 kV** , de sa tension et des tensions aux jeux de barres **5.5 kV** respectivement. L'objectif étant d'avoir des tensions nominales.

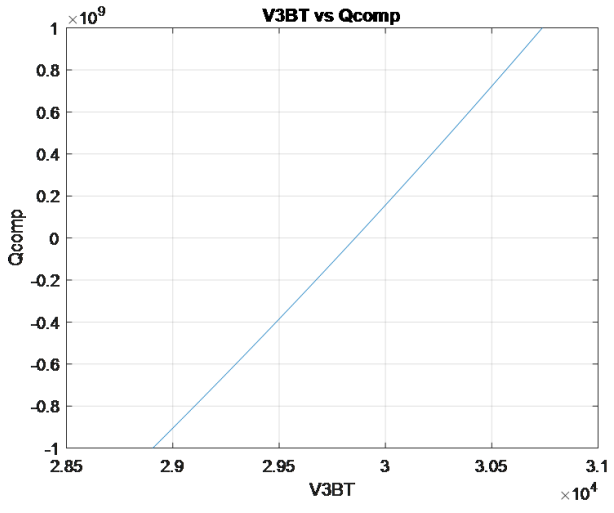


Figure 3.8 – Courbe d'étalonnage du réseau, en situation normale.

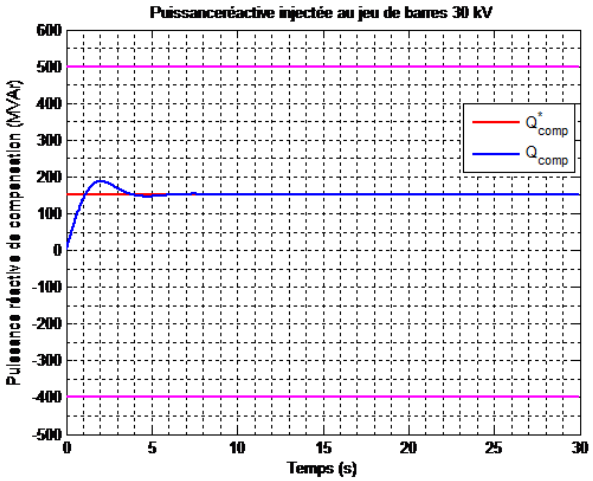


Figure 3.9 – Evolution de la puissance réactive injectée au jeu de barres **30 kV** , en situation normale.

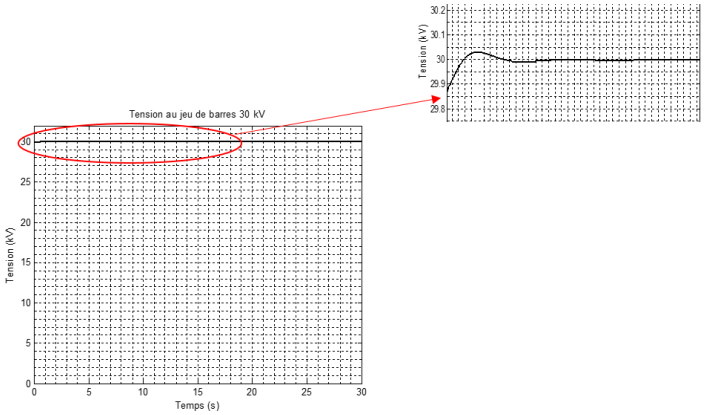


Figure 3.10 – Evolution de la tension au jeu de barres **30 kV** , en situation normale.

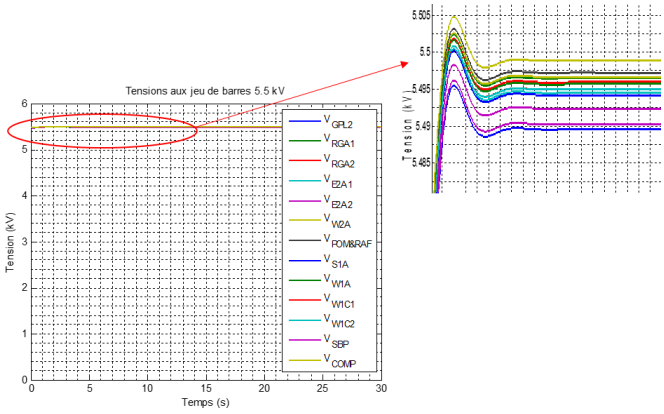


Figure 3.11 – Evolution de la tension aux jeux de barres **5.5 kV** , en situation normale.

3.2.3.7.2 Régulation de la tension, en situation de déclenchement d'une ligne 220 kV

En utilisant la méthode indirecte et à l'aide de la courbe d'étalonnage représentée à la figure (3.12), les figures (3.13), (3.14) et (3.15) représentent les évolutions de la puissance réactives injectée au jeu de barres **30 kV**, de la tension au jeu de barres **30 kV** et du courant injecté au jeu de barres **30 kV**, respectivement. L'objectif étant d'avoir une tension nominale.

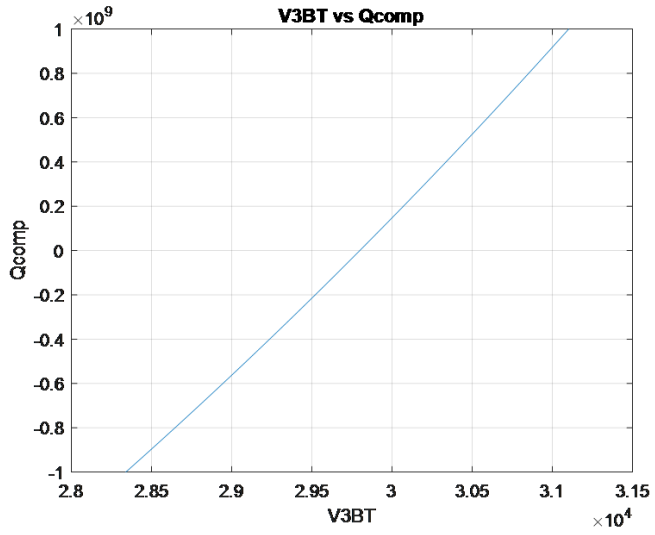


Figure 3.12 – Courbe d'étalonnage du réseau en situation de déclenchement d'une ligne **220 kV**.

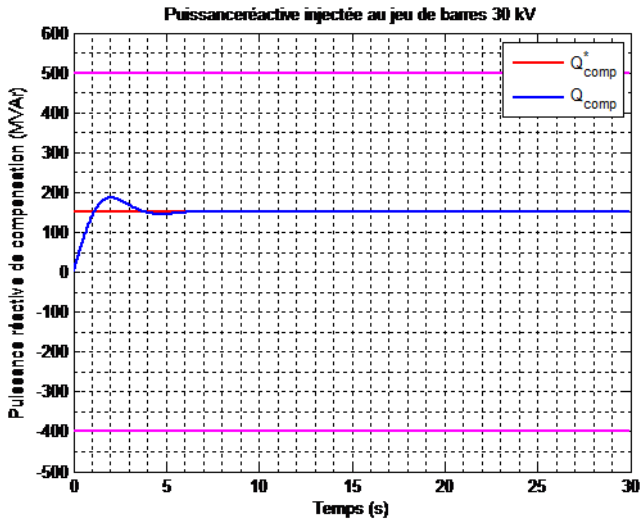


Figure 3.13 – Evolution de la puissance réactive injectée au jeu de barres **30 kV** , en situation de déclenchement d'une ligne **220 kV** .

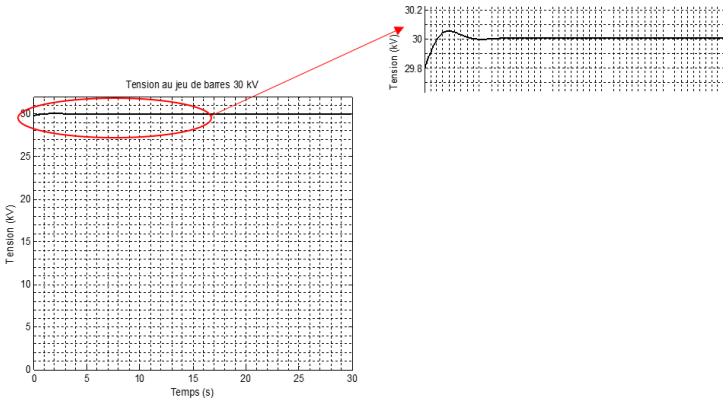


Figure 3.14 – Evolution de la tension au jeu de barres **30 kV**, en situation de déclenchement d'une ligne **220 kV** .

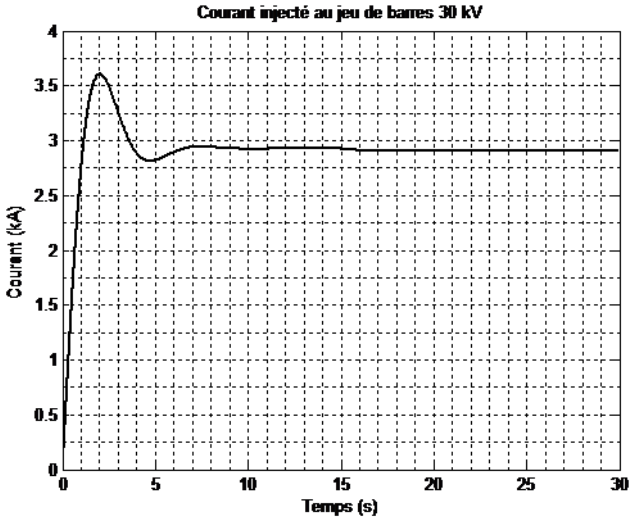


Figure 3.15 – Evolution du courant injecté au jeu de barres **30 kV** , en situation de déclenchement d'une ligne **220 kV** .

3.2.3.7.3 Régulation de la tension, en situation déclenchement d'un transformateur 220/30 kV :

En utilisant la méthode indirecte et à l'aide de la courbe d'étalonnage représentée à la figure (3.16), les figures (3.17), (3.18) et (3.19) représentent les évolutions de la puissance réactives injectée au jeu de barres **30 kV**, du courant injecté au jeu de barres **30 kV**, de la tension au jeu de barres **30 kV** et respectivement. L'objectif étant d'avoir une tension nominale.

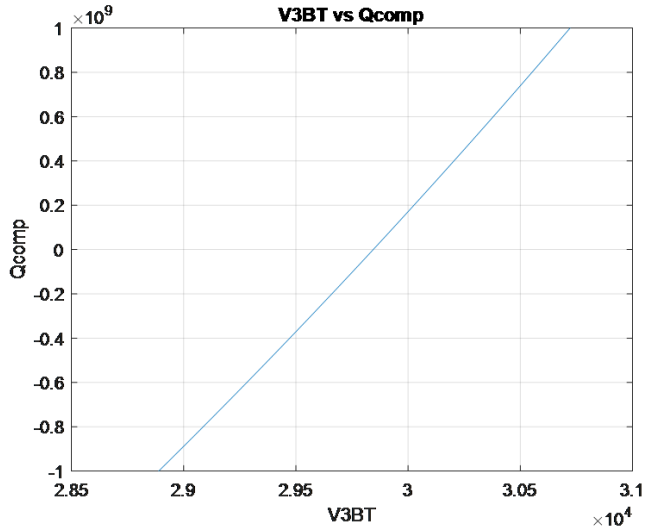


Figure 3.16 – Courbe d'étalonnage du réseau, en situation de déclenchement d'un transformateur 220/**30 kV**.

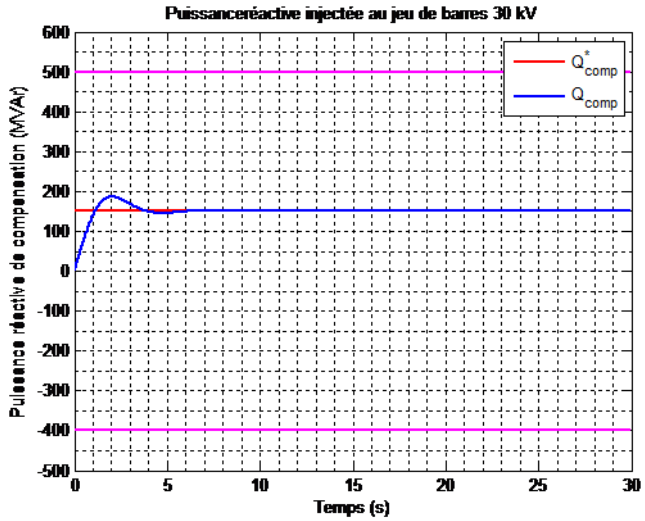


Figure 3.17 – Evolution de la puissance réactive injectée au jeu de barres **30 kV**, en situation de déclenchement d'un transformateur 220/**30 kV** .

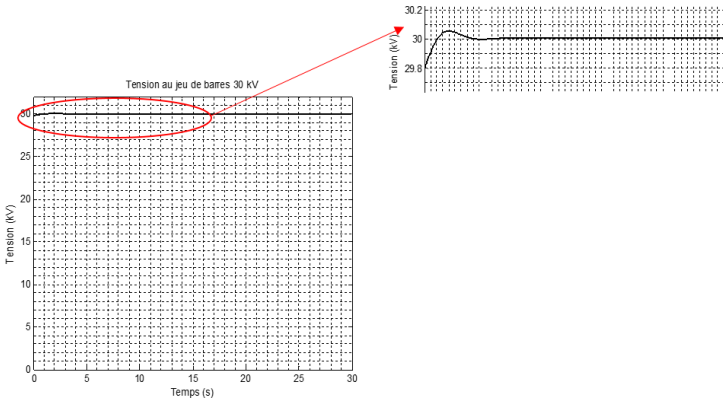


Figure 3.18 – Evolution de la tension au jeu de barres **30 kV** , en situation de déclenchement d'un transformateur 220/**30 kV** .

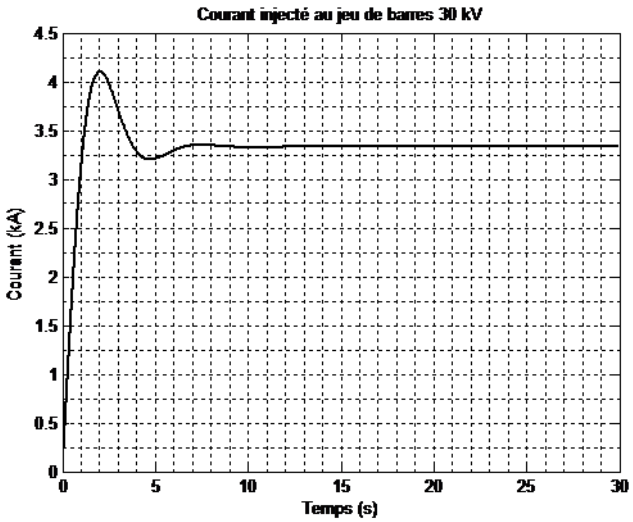


Figure 3.19 – Evolution du courant injecté au jeu de barres **30 kV**, en situation de déclenchement d'un transformateur 220/**30 kV** .

3.2.3.7.4 Régulation de la tension, en situation démarrage des plus gros moteurs :

En utilisant la méthode indirecte et à l'aide de la courbe d'étalonnage représentée à la figure (3.20), les figures (3.21), (3.22) et (3.23) représentent les évolutions de la puissance réactives injectée au jeu de barres **30 kV**, de la tension au jeu de barres **30 kV** et du courant injecté au jeu de barres **30 kV**, respectivement

L'objectif étant d'avoir une tension nominale

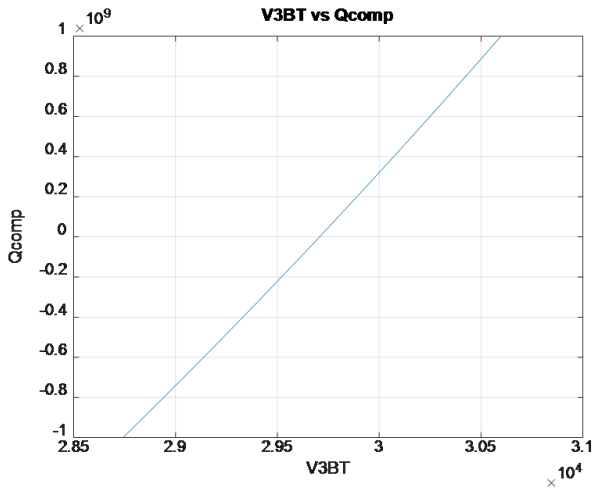


Figure 3.20 – Courbe d'étalonnage du réseau, en situation de démarrage des plus gros moteurs.

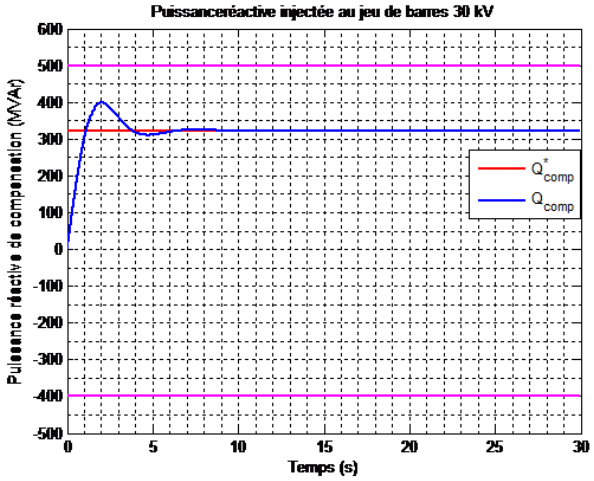


Figure 3.21 – Evolution de la puissance réactive injectée au jeu de barres **30 kV**, en situation de démarrage des plus gros moteurs.

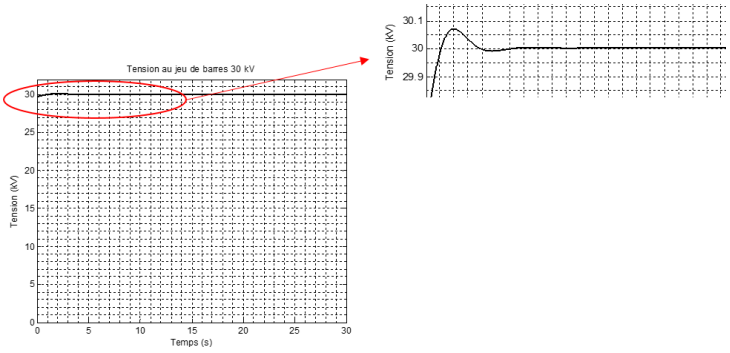


Figure 3.22 – Evolution de la tension au jeu de barres **30 kV** , en situation de démarrage des plus gros moteurs.

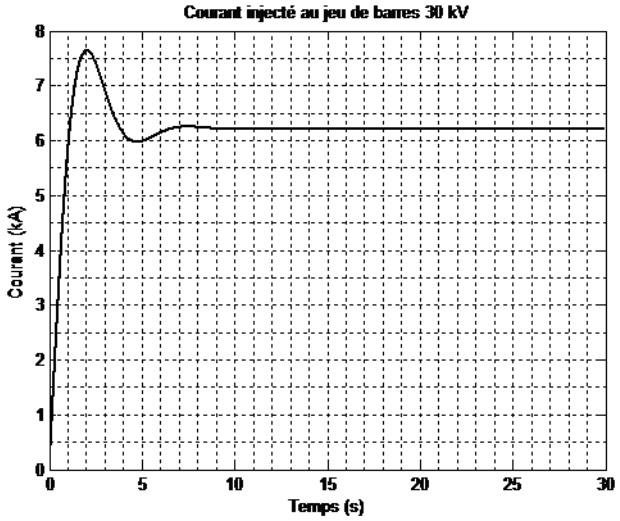


Figure 3.23 – Evolution du courant injecté au jeu de barres **30 kV**, en situation de démarrage des plus gros moteurs.

3.2.3.7.5 Régulation de la tension, en situation démarrage du plus grand moteur à vide

En utilisant la méthode indirecte et à l'aide de la courbe d'étalonnage représentée à la figure (3.20), les figures (3.24), (3.25) et (3.26) représentent les évolutions de la puissance réactives injectée au jeu de barres **30 kV** , de la tension au jeu de barres **30 kV** et du courant injecté au jeu de barres **30 kV** , respectivement. L'objectif étant d'avoir une tension nominale.

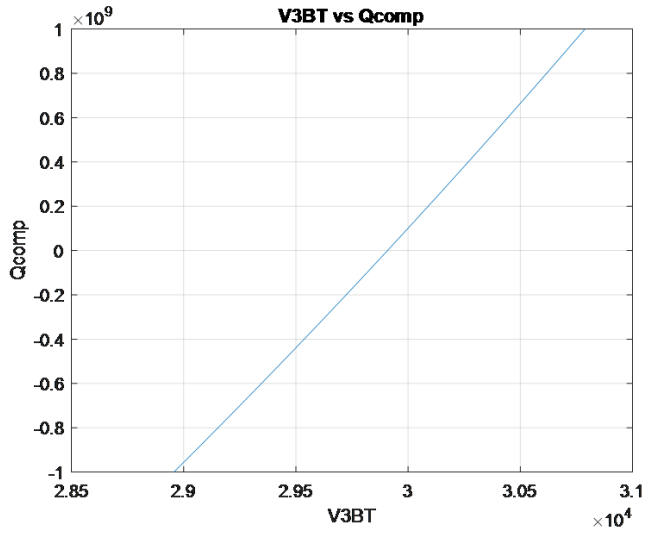


Figure 3.24 – Courbe d'étalonnage du réseau, en situation de démarrage du plus gros moteur à vide.

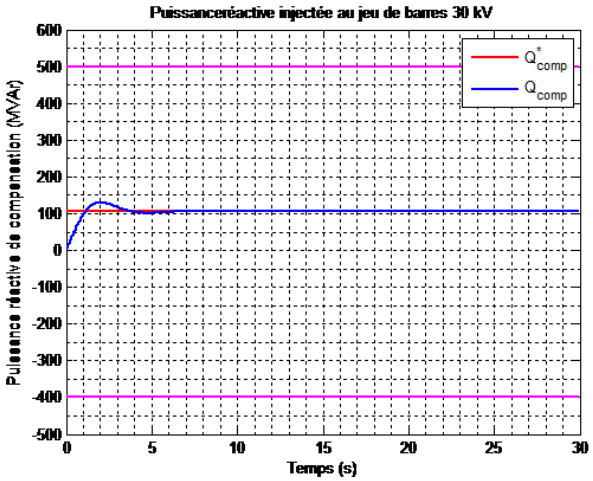


Figure 3.25 – Evolution de la puissance réactive injectée au jeu de barres **30 kV**, en situation de démarrage du plus gros moteur à vide.

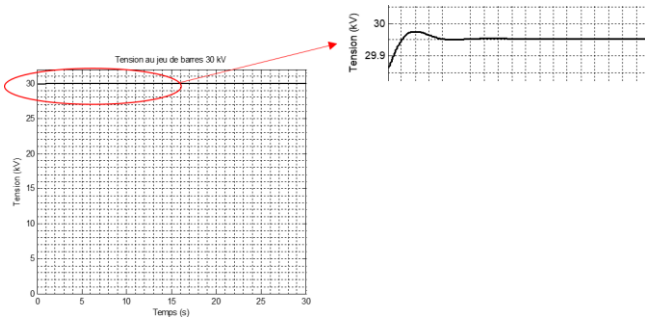


Figure 3.26 – Evolution la tension au jeu de barres **30 kV**, en situation de démarrage du plus gros moteur à vide.

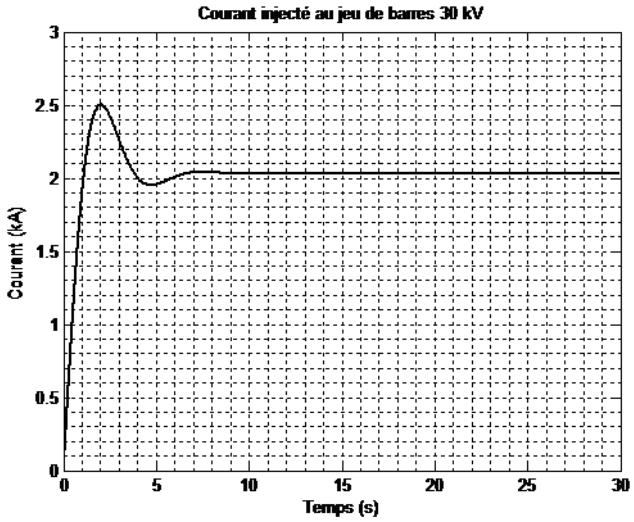


Figure 3.27 – Evolution du courant injecté au jeu de barres 30kV en situation démarrage du plus grand moteur sans charges

3.2.3.7.6 Régulation de la tension, en situation perturbée par déclenchement d'une ligne 220 kV : En utilisant la méthode indirecte et à l'aide de la courbe d'étalonnage, les figures (3.28), (3.29) et (3.30) représentent les évolutions de la puissance réactives injectée au jeu de barres **30 kV**, de la tension au jeu de barres **30 kV** et du courant injecté au jeu de barres **30 kV**, respectivement. L'objectif étant d'avoir une tension nominale après une perturbation apparue à l'instant 15 s, suite au déclenchement d'une ligne **220 kV**.

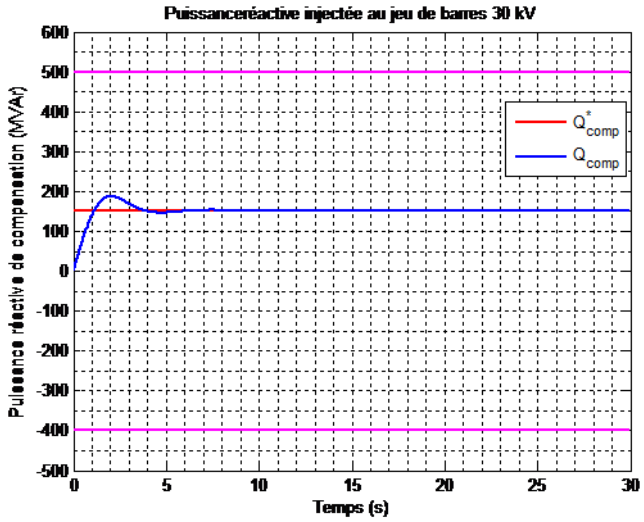


Figure 3.28 – Evolution de la puissance réactive injectée au jeu de barres **30 kV .**

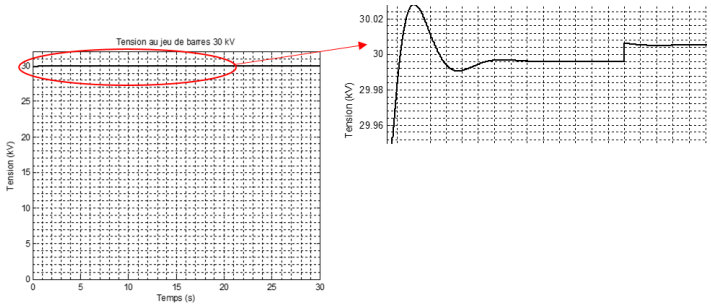


Figure 3.29 – Evolution la tension au jeu de barres **30 kV**.

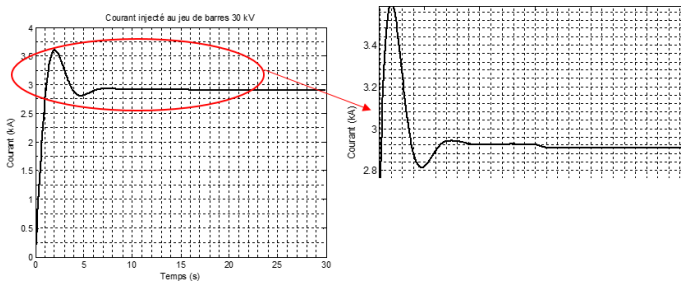


Figure 3.30 – Evolution du courant injecté au jeu de barres **30 kV**.

3.2.3.7.7 Régulation de la tension, en situation perturbée par déclenchement d'un transformateur dans le poste 220/30 kV

Le STATCOM compense deux cas différents, notamment en situation normale et lors de la défaillance d'un transformateur 220/30kV après un instant précis. Pour cela, il est nécessaire de disposer des courbes d'étalonnage pour les deux situations. Les figures à obtenir sont les suivantes : la figure(3.31) représentant la puissance générée avant et après la défaillance, la figure (3.32) représentant les tensions au jeu de barres de **30 kV** avant et après la défaillance, la figure (3.33) représentant les courants injectés avant et après la défaillance :

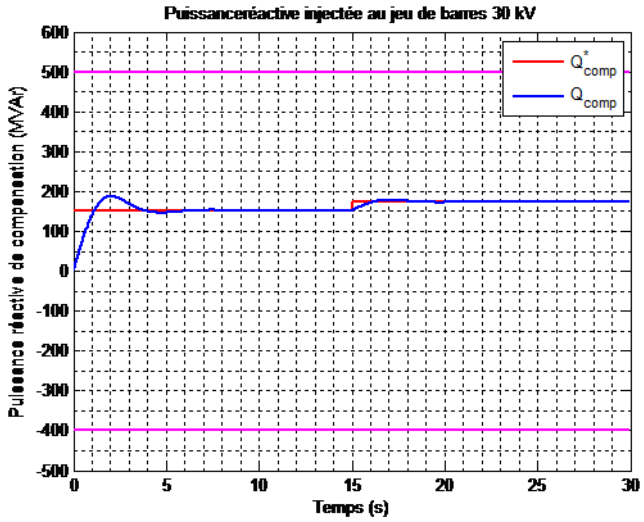


Figure 3.31 – Evolution de la puissance réactive injectée au jeu de barres **30 kV** .

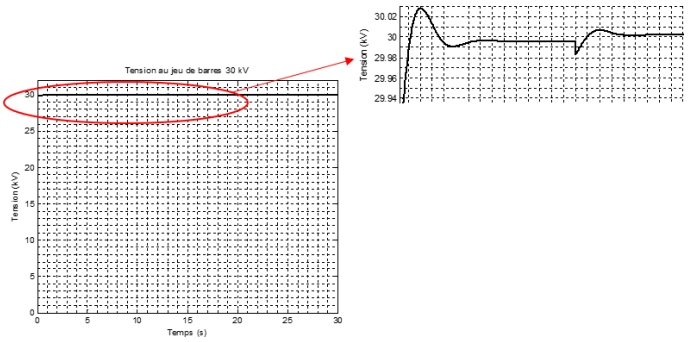


Figure 3.32 – Evolution la tension au jeu de barres **30 kV**

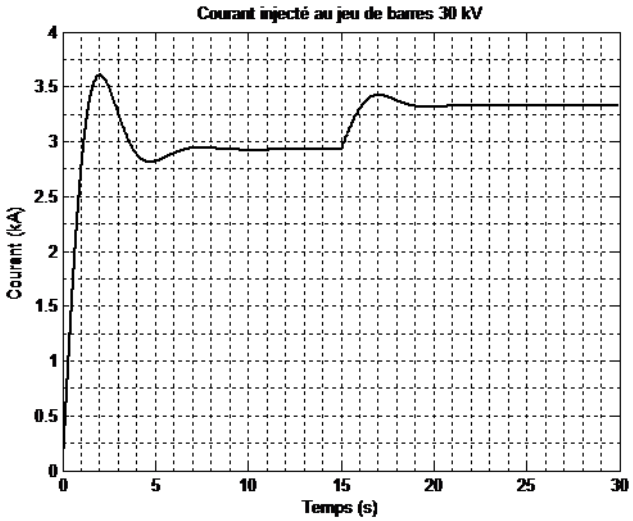


Figure 3.33 – Evolution du courant injecté au jeu de barres **30 kV**.

3.2.3.7.8 Régulation de la tension, en situation perturbée par le démarrage des plus gros moteurs :

En utilisant la méthode indirecte et à l'aide de la courbe d'étalonnage, les figures (3.34), (3.35) et (3.36) représentent les évolutions de la puissance réactives injectée au jeu de barres **30 kV**, de la tension au jeu de barres **30 kV** et du courant injecté au jeu de barres **30 kV**, respectivement. L'objectif étant d'avoir une tension nominale après une perturbation apparue à l'instant 15 s, suite au démarrage des plus gros moteurs.

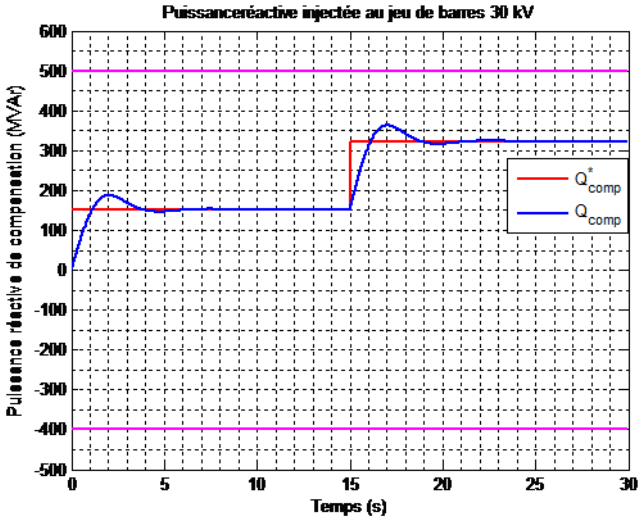


Figure 3.34 – Evolution de la puissance réactive injectée au jeu de barres **30 kV**.

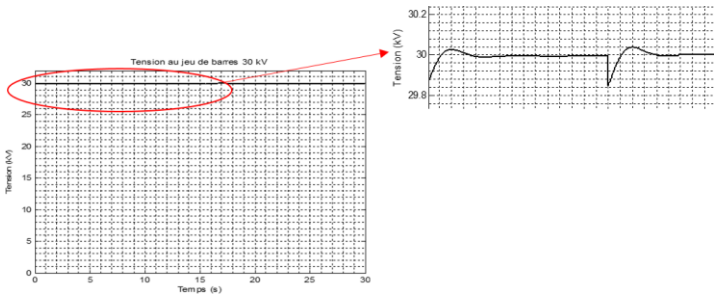


Figure 3.35 – Evolution la tension au jeu de barres **30 kV**.

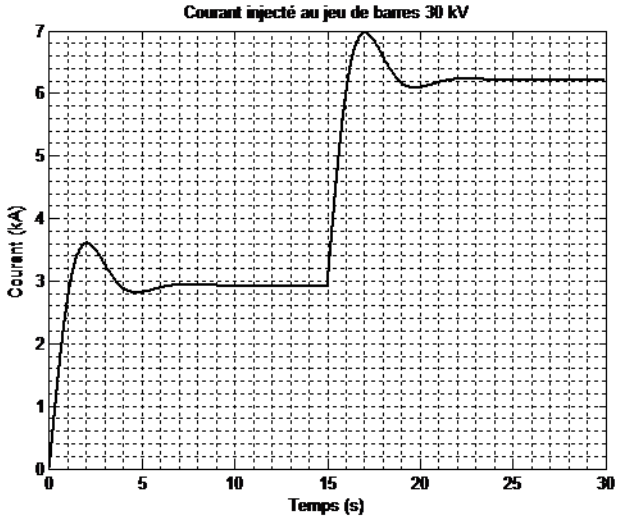


Figure 3.36 – Evolution du courant injecté au jeu de barres **30 kV**.

3.2.3.7.9 Régulation de la tension, en situation perturbée par le démarrage du plus gros moteur à vide En utilisant la méthode indirecte et à l'aide de la courbe d'étalonnage, les figures (3.37), (3.38) et (3.39) représentent les évolutions de la puissance réactives injectée au jeu de barres **30 kV** , de la tension au jeu de barres **30 kV** et du courant injecté au jeu de barres **30 kV** , respectivement. L'objectif étant d'avoir une tension nominale après une perturbation apparue à l'instant 15 s, suite au démarrage du plus gros moteur à vide.

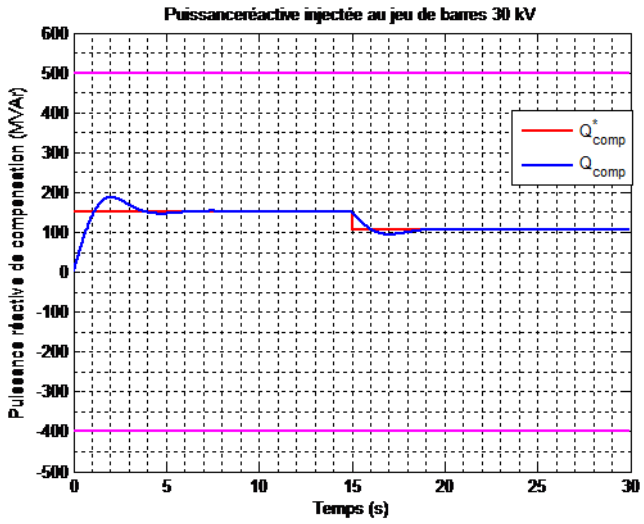


Figure 3.37 – Evolution de la puissance réactive injectée au jeu de barres **30 kV**.

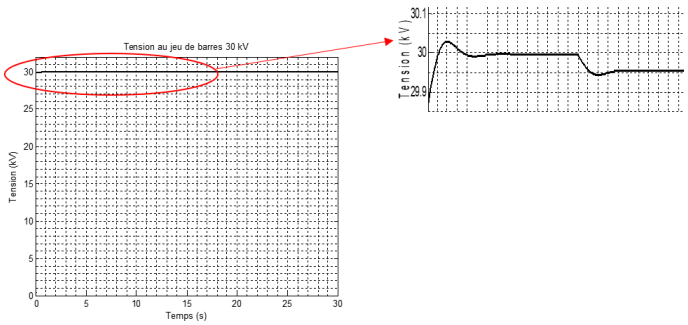


Figure 3.38 – Evolution la tension au jeu de barres **30 kV**.

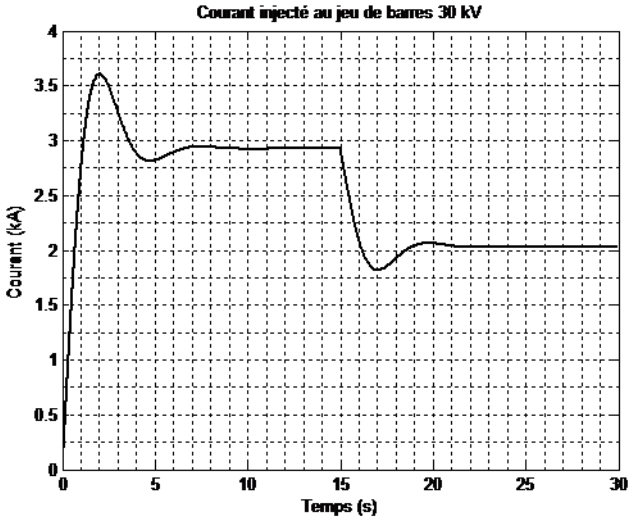


Figure 3.39 – Evolution du courant injecté au jeu de barres **30 kV**.

Discussion et interprétation :

Les résultats de simulation du fonctionnement du réseau équipé du STATCOM, sont concrétisés par les évolutions de la tension au jeu de barres **30 kV**, le courant injecté par le STATCOM et la puissance réactive pompée par le STATCOM, dans différentes situations de fonctionnement, entre autres :

- La situation normale,
- La situation de déclenchement d'une ligne **220 kV**,
- La situation de déclenchement d'un transformateur dans le poste 220/60 kV,
- La situation de délestage de la plus grande charge RGA,
- La situation de démarrage du plus gros moteur à vide,
- La situation de démarrage des plus gros moteurs en charge,

Ils révèlent que le STATCOM a réussi à réguler la tension à sa valeur nominale de **30 kV** en un temps record comparé au temps de manœuvre des batteries de condensateurs. De plus, le STATCOM a montré sa flexibilité, en changeant de point de fonctionnement de manière rapide et stable. L'algorithme de commande synthétisé a servis à imposer le cahier des charges, sans pour autant solliciter fortement l'onduleur en matière de puissance réactive générée et injectée dans le jeu de barres **30 kV**.

A noter ici, que le volume de puissance réactive mobilisé, afin de réguler la tension, est relativement très élevé (150 MVAr) ce qui est dû à la topologie radiale du réseau d'étude.

L'apport du STATCOM est, par rapport à la compensation conventionnelle, qu'il est doté d'une certaine intelligence artificielle lui conférant une prise de

décision très pertinente. En effet, le STATCOM détermine instantanément la puissance réactive à injecter et ne requiert absolument **aucune formule au préalable** !

3.3 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la régulation de la tension au jeu de barres **30 kV** du réseau d'étude. Après avoir passé en revue l'historique, la constitution et le principe de fonctionnement des systèmes FACTS, en général, et le STATCOM, en particulier, il a été question de modéliser le STATCOM en fonctionnement dynamique, en se référant à l'identification paramétrique du fournisseur ABB.

Afin d'accomplir ses tâches de manières convenable, le STATCOM a été piloté par un régulateur conventionnel de type PI, synthétisé dans l'espace fréquentiel, par la méthode d'imposition de pôles désirés d'Evans. Ensuite, le STATOM a été testé dans différentes situations normale, perturbées et contingentes et a montré ses capacités incontestables dans le domaine de compensation des réseaux électriques ainsi que sa flexibilité et intelligence dans la prise de décision.

Cette solution technique, actuellement très coûteuse, est très prometteuse, car la tendance actuelle et d'intégrer l'électronique de puissance dans le domaine des réseaux électriques pour profiter des avantages qu'elle offre comparée aux solutions techniques conventionnelles.

Conclusion générale

Les systèmes FACTS apparus il y a une trentaine d'années constituent une solution technique globale aux problèmes liés à la gestion des réseaux électriques. En effet, ils permettent de modifier les paramètres électriques d'un certain nombre de points du réseau, de manière extrêmement rapide et très flexible, afin de réaliser une compensation globale du réseau et pallier, par conséquent, aux diverses situations de contingence auxquelles est confronté le réseau électrique.

Dans ce travail de PFE, il a été question de simuler le fonctionnement du réseau électrique d'étude, couvrant la charge du client potentiel CIS-Sonatrach, équipé d'un STATCOM. L'objectif étant d'améliorer le plan de tension global des charges raccordées au poste 220/**30 kV** du client. Pour cela, il a fallu réguler la tension au jeu de barres **30 kV**, par injection d'un volume de puissance réactive allant jusqu'à 150 MVAr. Celle-ci devait être réalisée conventionnellement, soit par des batteries de condensateur, soit par engagement de l'opérateur du réseau à élever la tension au niveau de la centrale de Hassi Messaoud Ouest jusqu'à 235 kV. Comme c'est le cas actuellement, avec toutes les conséquences fâcheuses notamment le claquage des connexions avec le poste 220/**30 kV** du client CIS et la forte sollicitation des systèmes d'excitation des génératrices synchrones, au niveau de la centrale HMO qui verront leur durées de vies diminuer.

Après la collecte des données réelles, le réseau d'étude a été modélisé et son fonctionnement statique a été étudié après agrégation des niveaux de tension **400 V** et **5.5 kV**. Les chutes de tension enregistrées bien que faibles, restent une contrainte majeure contre le bon fonctionnement des installations et unités de production du client.

Pour remédier à cela et afin de garantir une tension la plus proche possible de la valeur nominale pour toutes les charges du client, un système FACTS de type STATCOM a été raccordé au jeu de barres **30 kV** du poste 220/**30 kV** du client. Le STATCOM piloté par une loi de commande de type PI a permis de relever la tension sans pour autant solliciter l'opérateur Sonelgaz. En effet, le STATCOM a montré une flexibilité, une rapidité et une précision indéniables comparé aux compensateurs conventionnels de la puissance réactive.

Pour finir, il y a lieu de citer quelques perspectives, pour compléter le travail notamment : l'utilisation de systèmes FACTS hybrides pour le filtrage actif des harmoniques qui pourrait être générés par les charges non linéaires du réseau, tout en considérant un maillage du réseau de distribution moyenne et basse tension.

Références bibliographiques:

Belatel, M. (2017). Compensation dans les réseaux electriques par un système facts de type statcom. *Proceeding of Engineering and Technology–PET*, *30*, 37–42.

BEN MOUSSA, M. L., & LAKHAL, K. E. (s. d.). *Analyse de l'écoulement de puissance dans un réseau de distribution* (Thèse de doctorat non publiée). Université KASDI-MERBAH Ouargla.

BOUAFIA, A., & NOURANI, F. (2015). *Stabilité transitoires des fermes éoliennes en présence du statcom* (Thèse de doctorat non publiée).

BOUZIDI, A. (2010). Modélisation et simulation des réseaux électriques. *Cours 1ière Année Master Electrotechnique, Université A/Mira-Bejaia*.

Buire, J. (2018). *Intégration des incertitudes liées aux prévisions de consommation et de production à la gestion prévisionnelle d'un réseau de distribution* (Thèse de doctorat non publiée). Ecole centrale de lille.

Schneider Electric. (2001). *Etude Electrotehnique CIS total* (documentation interne).

Sonatrach. (2014). *Descriptif des postes **220 kV** CIS et CINA* (documentation interne).

Eddine, N. A. (2019). *Elimination des hydrates par adsorption sur tamis moléculaire au niveau de l'unité gpl2 hassi-mesaoud : Optimisation et dimensionnement* (Thèse de doctorat non publiée). Université Echahid Hamma Lakhdar. El Oued Faculté de la Technologie.

Haimour, R. (2009). *Contrôle des puissances réactives et des tensions par les dispositifs facts dans un réseau electrique* (Thèse de doctorat non publiée). Ecole nationale polytech- nique d'Oran-Maurice Audin.

Magnoun, Y. (2014). Placement optimal de dispositif facts dans un réseau de puissance. Sonelgaz, G. (1984). Xd «guide technique de distribution». *Document technique du Groupe Sonelgaz*.

Zobeida, M., et al. (2021). *Amélioration de la sécurité des systèmes électriques à travers l'ap- proche de sensibilité pour l'emplacement optimal des dispositifsfacts* (Thèse de doctorat non publiée).