

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université A. Mira de Béjaïa
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique



Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme Master en Electrotechnique
Option : Réseaux Electriques

THÈME

Stabilité de la tension d'un réseau électrique
hybride autonome Diesel-Eolien

Préparé par :

- IRBAH Mohand Zine.
- KHALED Omar.

Promoteur :

- Mr M. Boutebel.

Membres de jury :

- Mr A. Kasdi.
- Mr R. Medjoudj.

Promotion 2015

Remerciements

Nous tenons d'abord à exprimer nos remerciements, et notre profonde reconnaissance à notre promoteur Mr. Boutebel qui est à l'origine de ce sujet. Son orientation et ses conseils ont été essentiels et enrichissantes pour l'aboutissement de ce mémoire.

Nous remercions également tous les membres du jury pour nous avoir fait l'honneur d'examiner ce mémoire, qu'ils trouvent ici notre profond respect.

Nous adressons nos remerciements aux enseignants et personnel du département de génie électrique, à tous ceux qui ont contribué à notre formation ces dernières années, et à tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin pour la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

Je dédie ce travail :

*A mes très chers parents, qui m'ont soutenu tout au long
de mes études ;*

*A mon cher frère Faycel, et mes deux chères sœurs
Souhila et Katia ;*

A tous mes cousins et cousines et leurs parents ;

*A tous mes amis (es) et tous ceux qui ont contribué à
l'aboutissement de ce travail.*

Mohand Zine

Dédicace

Ce modeste travail est dédié

A mes très chers parents

Je vous dois ce que je suis aujourd'hui grâce à votre amour, à votre patience et vos innombrables sacrifices.

Que ce modeste travail, soit pour vous une petite compensation et reconnaissance envers ce que vous avez fait d'incroyable pour moi.

A mes frères (Ferhat, Khoutir et Boubker)

et ma sœur Nadjet

Et tous ceux qui me les aime et m'aiment

A toute la promotion de réseau électrique

(Enseignants et étudiants)

KHALED omar

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I

Recherche sur la stabilité de la tension et le système hybride Diesel-Eolienne

I.1 Introduction.....	3
I.2 Stabilité de la tension	3
I.2.1 Définition	3
I.2.1.1 Stabilité de tension vis-à-vis des petites perturbations	4
I.2.1.2 Stabilité de tension vis-à-vis des grandes perturbations	4
I.2.2 Causes d'instabilité de tension.....	4
I.2.2.1 Manque local d'énergie réactive	5
I.2.2.2 Charge appelée trop importante	6
I.2.3 Effondrement de tension dans le monde	7
I.2.4 Analyse de la stabilité de tension.....	8
I.2.4.1 Analyse dynamique.....	9
I.2.4.2 Analyse statique	9
I.2.5 Différentes méthodes d'amélioration de la stabilité d'un réseau électrique	9
I.2.5.1 Compensation traditionnelles.....	9
I.2.5.1.1 Compensateurs synchrones	9
I.2.5.1.2 Batteries de condensateurs	10
I.2.5.1.3 Les inductances	10
I.2.5.1.4 Les PSS (Power System Stabiliser)	10
I.2.5.2 Les compensateurs FACTS.....	11
I.3 Systèmes autonomes Diesel-Eolien	11

I.3.1 Présentation de système autonome Diesel-Eolien	11
I.3.1.1 Modes de fonctionnement des réseaux hybrides autonomes Diesel-Eolien	12
I.3.2 Principaux éléments d'un réseau électrique hybride autonome Diesel-Eolien.....	12
I.3.2.1 Générateur diesel	12
I.3.2.2 L'éolienne	13
I.3.2.3 Les charges.....	14
I.3.3 Principe de fonctionnement	14
I.3.4 Problèmes rencontrés dans le fonctionnement dans réseau électrique hybride autonome Diesel-Eolien	15
I.4 Conclusion	16

Chapitre II

Modélisation mathématique du système

II.1 Introduction	17
II.2 Modélisation mathématique du système.....	17
II.2.1 Modélisation des éléments du système.....	21
II.2.1.1 Modèle du générateur diesel.....	21
II.2.2.1.1 Modèle réduit de la génératrice synchrone.....	22
II.2.2.1.2 Le régulateur de tension.....	24
II.2.2.2 Modèle de générateur asynchrone	24
II.2.2.2.1 Cas de générateur asynchrone à aimant permanent.....	27
II.3 Représentation globale du système de gestion de l'énergie réactive	28
II.4 Conclusion	29

Chapitre III

Moyens de contrôle de la tension

III.1 Introduction	30
III.2 Contrôle de puissance réactive par le compensateur SVC	30
III.2.1 Description de la méthode	30
III.3 Contrôle de puissance réactive par le compensateur STATCOM.....	34
III.3.1Description de la méthode.....	34
III.4 Etude comparative du système employant un générateur asynchrone à cage d'écureuil et le générateur asynchrone à aimant permanent dans le système de conversion d'énergie aérodynamique	37
III.4.1 Avantages du générateur asynchrone à aimant permanent	37
III.4.2 Déroulement de la comparaison	38
III.5 Conclusion.....	40

Chapitre IV

Simulation de cas pratiques

IV.1 Introduction.....	42
IV.2 Simulation du système sans compensation	42
IV.2.1 Résultats de simulation	43
VI.2.2 Interprétation des résultats de simulation.....	44
VI.3 Simulation du système avec le compensateur SVC	44
IV.3.1 Résultats de simulation	45
VI.3.2 Interprétation des résultats de simulation.....	47
VI.4 Simulation du système avec le compensateur STATCOM.....	48
VI.4.1 Résultats de simulation	49
IV.4.2 Interprétation des résultats	51
IV.5 Comparaison des performances de stabilisation	51
IV.6 Simulation de système hybride autonome diesel employant un GAS /GAS AP.....	53

IV.6.1 Résultats de simulation	53
IV.6.3 Interprétation des résultats	55
IV.6 Conclusion	56
Conclusion générale	58
Références bibliographiques	59
Annexe	62

Liste des figures

- **Fig. I.1** : Réseau électrique à deux nœuds. 5
- **Fig. I.2** : Configuration de générateur diesel. 13
- **Fig. I.3** : Chaîne de conversion éolienne à générateur asynchrone à cage fonctionnant à vitesse fixe. 14
- **Fig. I.4** : Schéma de principe d'un système hybride Diesel-Eolienne. 15
- **Fig. II.1** : Schéma de base considéré pour la modélisation. 17
- **Fig. II.2** : Modèle sans amortisseur de générateur synchrone dans le repère dq. 22
- **Fig. II.3** : Régulateur de tension de générateur synchrone sans saturation. 24
- **Fig. II.4** : Schéma équivalent de générateur asynchrone en régime permanent. 24
- **Fig. II.5** : Circuit équivalent approximatif de générateur asynchrone à aimant permanent. 27
- **Fig. II.6** : Structure bloc de contrôle de la tension dans le système hybride Diesel-Eolien. 28
- **Fig. IV.1**: Schéma bloc du système Diesel-Eolienne sans compensation de puissance réactive. 42
- **Fig. IV.2** : Déviation de la tension au jeu de barre pour différentes variations de la charge réactive : $\Delta QL=1\%$, $\Delta QL=2\%$ et $\Delta QL=3\%$ 43
- **Fig. VI.3** : La réponse en puissance réactive de générateur synchrone du Diesel en réponse aux différentes variations de la charge. 43
- **Fig. IV.4** : Schéma bloc du système Diesel-Eolienne avec le compensateur SVC 45
- **Fig. IV.5** : La réponse en puissance réactive de générateur synchrone du Diesel en réponse aux différentes variations de la charge. 46
- **Fig. IV.6** : L'évolution des puissances réactives du Diesel et de compensateur SVC en réponse à la variation de la charge. 47
- **Fig. IV.7** : L'évolution de la puissance réactive de générateur asynchrone de l'éolienne. 47

- **Fig. IV.8** : Schéma bloc du système Diesel-Eolienne avec le compensateur STATCOM..... 49
- **Fig. IV.9** : La déviation de tension au jeu de barre en réponse à une variation de la puissance réactive de la charge (avec compensation par STATCOM)..... 50
- **Fig. IV.10** : L'évolution de la puissance réactive du Diesel de compensateur STATCOM en réponse à la variation de la charge. 50
- **Fig. IV.11** : L'évolution de puissance réactive dans l'éolienne en réponse à la variation de la charge..... 51
- **Fig. VI.12** : Courbes de déviations de la tension avec les compensateurs SVC et STATCOM..... 52
- **Fig. IV.13** : Schéma bloc du système utilisant le GAS/ GAS AP. 53
- **Fig. IV.14**: Déviation de la tension au jeu de barre principal..... 54
- **Fig. IV.15**: Evolution de la puissance réactive dans le générateur synchrone du Diesel. 55
- **Fig. IV.16**: Evolution de la puissance réactive dans le compensateur STATCOM. ... 55
- **Fig. IV.17**: Evolution de la puissance réactive dans le GAS ET GAS AP..... 56

Liste des Tableaux

- **Tableau 1:** Tableau de l'effondrement de la tension à travers le monde..... 7
- **Tableau A.1 :** Paramètres du système Diesel-Eolienne sans compensateur de puissance réactive..... 62
- **Tableau A.2 :** Données du compensateur SVC..... 65
- **Tableau A.3:** Données de STATCOM..... 65
- **Tableau A.4:** Paramètres du système considéré pour la comparaison des GAS et GAS AP..... 66

Nomenclature

Lettres latines :

\bar{S}_2 : Puissance apparente au nœud 2.

P_2 : Puissance active au nœud 2.

Q_2 : Puissance réactive au nœud 2.

V_1 : Tension au nœud 1.

P_{max} : Puissance maximale transmissible.

Q_{source} : Puissance réactive débitée.

Q_{charge} : Puissance réactive absorbée.

Q_L : Puissance réactive absorbée par la charge,

Q_{GAS} : Puissance réactive absorbée par le générateur asynchrone,

Q_{SG} : Puissance réactive débitée par le générateur synchrone,

ΔQ_{GS} : Variation de la puissance réactive fournie par le générateur synchrone.

ΔQ_{GAS} : Variation de la puissance réactive absorbée par le générateur asynchrone.

ΔQ_L : Variation de la puissance réactive absorbée par la charge.

ΔQ_S : Excédent de la puissance réactive.

E_m : L'énergie magnétique emmagasinée par le générateur asynchrone.

L_m, I_m : Inductance de magnétisation de générateur asynchrone, courant de magnétisation.

V : Tension au jeu de barre principal.

X_m : Réactance de magnétisation de générateur asynchrone.

f : Fréquence.

E_{m0} : Énergie magnétique initiale, emmagasinée par le générateur asynchrone

V_0 : Tension initiale, au jeu de barre principal.

ΔE_m : Variation de l'énergie magnétique emmagasinée par le générateur asynchrone.

ΔV : Variation de la tension initiale, au jeu de barre principal.

Q_{LN} : Puissance réactive nominale, de la charge.

V_N : Tension nominal au jeu de barre principal.

Q_{L0} : Puissance réactive initiale, de la charge.

n_q : Coefficient empirique fonction de la composition de la charge.

Q_{ref} : Puissance réactive de base.

E'_q : F.e.m. induite par le champ rotorique de la génératrice synchrone.

X'_d : Réactance transitoire d'axe d

x_d : Réactance propres d'axes d

x_{md} : Réactances de magnétisation d'axes d

i_d : Courant dans l'axes d

i_f, v_f : courant et tension rotorique

v_d, v_q : Tension et courant statorique d'axes dq

r_f : Résistance du champ

T'_{D0} : Constante de temps transitoire d'axe d en circuit ouvert.

v_f, i_f : Tension et courant de champ.

N_E : Nombre de spires de la bobine de champ de l'excitatrice.

R_E : La résistance de la bobine de champ de l'excitatrice.

v_R : la tension rotorique de l'excitatrice

S_E : Coefficient de saturation.

$Z_{réel}, Z_{imag}$: impédance réel et imaginaire

P_{mec} : Pertes rotationnelles.

P_{Rm} : Puissance mécanique de l'éolienne.

P_J : Perte joules.

Q_{SVC} : La puissance réactive fournit par le SVC.

B_{SVC} : est la susceptance réactive du SVC.

Q_{com} : La puissance réactive de compensation.

V_{dc} : Tension de la source continue de SVC

p : est le nombre d'impulsion de l'inverseur

Lettres grecques :

δ : L'angle de transport.

ω_e : Pulsation électrique

ψ_f, ψ_d, ψ_q : Flux rotoriques de la machine synchrone.

.

Abréviations

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

FACTS: Flexible ac Transmission Systems.

PSS: Power System Stabilizer.

GS : Générateur synchrone.

GAS : Générateur asynchrone.

GAS AP : Générateur asynchrone à aimant permanent.

AC : Alternatif current.

CC : Contious current.

SVC: Static Var Compensator.

STATCOM: Static Synchronous Compensator.

Introduction générale

La croissance de la demande énergétique et l'exigence d'une fiabilité plus élevée avec le souci astreignant de la réduction des coûts, a recentré tous les regards sur une éventuelle alternative, préconisant les réseaux distribués comme la solution la plus optimale et la plus efficace à l'extension des réseaux de distribution actuels.

Les micro-réseaux de production distribuée, fonctionnant typiquement avec des niveaux de puissance allant de 1 KW à 10 MW, situés près des charges, gagnent de popularité à cause de leurs efficacités d'opération plus élevées. Le réseau électrique hybride autonome Diesel-Eolien, a une large portée dans les pays en voie de développement où existe un grand déséquilibre entre l'offre et la demande d'énergie électrique.

Le groupe diesel est composé d'un moteur à combustion interne, d'un exciteur, et d'un générateur synchrone, couplé sur le même axe. De tels systèmes sont employés couramment comme support ou en tant qu'alimentation de secours dans les installations commerciales et industrielles. Les groupes diesel sont aussi, intensivement employés dans des sites éloignés où n'existe aucun approvisionnement de réseau public.

Le groupe diesel à base de générateur synchrone est généralement jumelé avec une éolienne à base de générateur asynchrone. L'induction du générateur asynchrone a besoin de puissance réactive et dans la plus part du temps elle est fournie par le générateur synchrone du Diesel. En outre, généralement, la plupart des charges sont également inductives en nature. Mais la puissance réactive assurée n'est pas suffisante et elle crée un déséquilibre entre la consommation et la production en puissance réactive. Ce déséquilibre mène aux problèmes comme la fluctuation et l'instabilité de tension.

L'ampleur du phénomène de l'instabilité de tension dans les réseaux électriques fait objet, de plusieurs recherches, qui tentent d'y remédier aux dommages qui peuvent en résulter, telle est la direction que nous voulons prendre dans notre étude.

Et pour cela, notre mémoire, a été organisé au tour de quatre chapitres :

- **Chapitre I**, dans un premier temps, traitera, les concepts théoriques relatifs à la stabilité de la tension dans le réseau électrique d'une manière générale. Par suite, un

aperçu sur le réseau hybride autonome Diesel-Eolien sera abordé dans sa composition, son fonctionnement et le problème de l'instabilité rencontré par celui-ci.

- **Chapitre II**, ce chapitre sera consacré pour la modélisation mathématique du système hybride autonome diesel-éolienne.
- **Chapitre III**, ce chapitre proposera des méthodes de contrôle de tension pour le système hybride autonome Diesel-Eolien.
- **Chapitre IV**, ce chapitre sera réservé pour la simulation du système dans l'environnement SIMULINK/MATLAB, pour différents cas de son fonctionnement, et les résultats seront interprétés.

Chapitre I

*Recherche sur la stabilité de la
tension et le système hybride
autonome
Diesel-Eolien*

I.1 Introduction

À tout instant, le fonctionnement du réseau électrique devrait être stable, satisfaisant divers critères opérationnels, et devrait également être sécurisé en cas de n'importe quelle perturbation. De nos jours, les réseaux électriques sont amenés à fonctionner, plus près de leurs limites de stabilité à cause des contraintes économiques et environnementales. Le maintien d'un fonctionnement stable et sécurisé du réseau électrique est donc un sujet, très important et préoccupant. Ces dernières années, les chercheurs et les planificateurs des réseaux électriques ont accordé beaucoup d'attention à l'instabilité de tension, elle est considérée en tant qu'une des sources principales d'insécurité du réseau électrique.

Dans les régions isolées, les frais de construction ou d'extension du réseau électrique sont élevés et le surcoût de l'approvisionnement en carburant croît avec l'éloignement. Le terme "Système d'Énergie Hybride" veut dire l'ensemble des systèmes de production d'énergie électrique employant plus d'un type de source. L'utilisation des sources d'énergie renouvelable comme l'éolienne constitue un complément aux groupes diesels employés dans la production d'électricité dans les régions éloignées.

Les capacités de production des sources d'énergie renouvelable, sont aléatoires et fluctuantes et non adaptées aux variations de la charge, ce qui dégrade la stabilité de la tension.

I.2 Stabilité de la tension

I.2.1 Définition

La stabilité de tension est la capacité d'un réseau électrique à maintenir des tensions acceptables à tous ses nœuds, dans des conditions du fonctionnement normales ou suite à une perturbation. L'instabilité de tension est le résultat de l'incapacité du réseau électrique à fournir la puissance demandée par la charge. Généralement, elle se manifeste sous forme d'une déviation monotone de la tension.

Selon l'amplitude de la perturbation, on distingue la stabilité de tension de petites perturbations et celle de grandes perturbations.

I.2.1.1 Stabilité de tension vis-à-vis des petites perturbations

La stabilité de tension de petites perturbations concerne la capacité du réseau électrique à maintenir la tension dans les limites permises en présence de perturbations telles que : une variation faible de la charge, de la production,...etc.

I.2.1.2 Stabilité de tension vis-à-vis des grandes perturbations

Elle est définie comme la capacité du réseau électrique à maintenir les tensions des nœuds dans les limites de fonctionnement permises en présence des grandes perturbations à savoir la perte d'équipement de transport ou de production, le court-circuit,...etc.

Définition IEEE [1]

La stabilité de tension est la capacité du réseau à maintenir la tension dans les limites permises de sorte que, lorsque l'admittance de charge augmente, la puissance demandée par la charge augmente, dans ce cas la puissance et la tension doivent être contrôlables.

L'effondrement de tension est le processus par lequel l'instabilité de tension conduit à une tension très faible dans une partie ou dans la totalité du réseau qui cause un effondrement en cascade du réseau, sans détruire nécessairement le synchronisme entre les générateurs.

D'autre part, la notion de la sécurité de tension et plus large que la stabilité de tension, elle est définie comme la capacité du réseau électrique à maintenir son fonctionnement stable après chaque perturbation ou changement défavorable du système.

I.2.2 Causes d'instabilité de tension

Le phénomène d'écroulement de tension est toujours lié à la difficulté de régler la tension au-dessus d'une certaine valeur appelée tension critique [2]. Généralement, l'effondrement de tension se produit dans les réseaux électriques qui sont fortement chargés, court-circuités et/ou ont un manque de la puissance réactive [3] ; dans cette situation le réseau électrique ne peut pas assurer la puissance réactive demandée par la charge.

Ceci est dû à des limitations sur la production et la transmission de la puissance réactive, de telle sorte que, la puissance réactive des générateurs et des systèmes FACTS est limitée par des contraintes physiques.

En plus la puissance réactive générée par des bancs de condensateur est relativement réduite à des tensions basses. La limite sur le transport d'énergie réactive est due

principalement aux pertes réactives élevées dans les lignes électriques fortement chargées. Les principales causes de l'instabilité de tension sont présentées dans la section suivante.

I.2.2.1 Manque local d'énergie réactive

L'effondrement de tension est fortement lié au manque de la puissance réactive requise pour maintenir le profil de tension dans une marge de fonctionnement permise [1]. A un certain niveau de charge, le réseau électrique ne satisfait pas la puissance réactive demandée par la charge à cause des limitations sur la production et la transmission de la celle-ci. La limitation de production de la puissance réactive inclut les générateurs et les équipements FACTS ainsi que la puissance réactive limitée des condensateurs [3]. La limite de production de la puissance réactive des générateurs est due principalement aux contraintes thermiques exercées sur le bobinage rotorique et statorique.

Sans la limitation thermique, l'instabilité et l'effondrement de tension sont souvent impossibles.

Dans le même contexte, les équipements FACTS sont de très grande dimension.

Pour bien comprendre l'influence de la puissance réactive sur l'effondrement de tension, on considère un réseau simple à deux nœuds de la Fig. I.1.

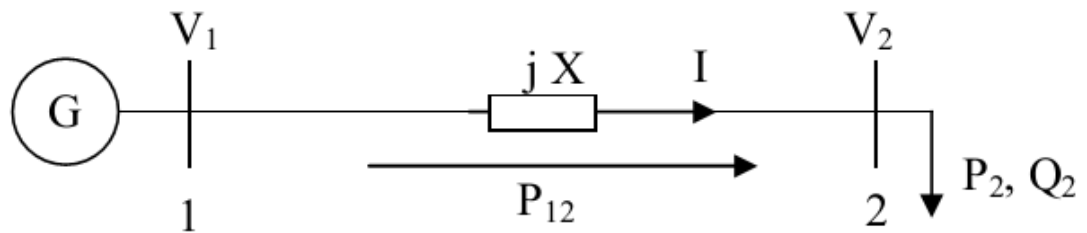


Fig. I.1 : Réseau électrique à deux nœuds.

$$\begin{aligned} \bar{S}_2 &= P_2 + jQ_2 & (I.1) \\ &= V_2 \left[\frac{V_1 \cos \delta + jV_1 \sin \delta - V_2}{jX} \right]^* \end{aligned}$$

$$= \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta + j \left[\frac{V_1 V_2 \cos \delta - V_2^2}{X} \right]$$

$$P_2 = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta = P_{max} \sin \delta \quad (1.2)$$

$$Q_2 = \frac{V_1 V_2 \cos \delta - V_2^2}{X} \quad (1.3)$$

De même pour le nœud 1

$$P_1 = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta = P_{max} \sin \delta \quad (1.4)$$

$$Q_1 = \frac{V_1 V_2 \cos \delta - V_2^2}{X} \quad (1.5)$$

Pour la puissance active au bus 2, l'équation (1.2) montre clairement que lorsque la puissance P_2 augmente, la turbine doit fournir plus d'énergie pour augmenter l'angle de puissance δ afin de satisfaire la demande de la charge. Par conséquent, la puissance réactive Q_2 diminuera ou même reviendra négative à cause de la diminution du $\cos \delta$. Autrement, l'équation (1.5) montre que la puissance réactive Q_1 augmentera brusquement. Donc la différence entre la puissance réactive aux nœuds 1 et 2 (pertes réactives) augmentera rapidement. On peut conclure que le transport de la puissance réactive n'est pas économique à cause de l'augmentation des pertes réactives à des niveaux de charge relativement élevés.

La meilleure solution de ce problème est de produire cette énergie localement, proche de la consommation, par l'installation de batteries de condensateurs, de compensateurs synchrones (génératrices synchrones avec $P=0$) ou des compensateurs statiques (FACTS).

1.1.2.2 Charge appelée trop importante

L'une des causes de l'instabilité de tension correspond à une charge élevée. Ceci est dû à l'augmentation croissante de la demande et à un large transfert d'énergie entre compagnies [4,5,6,7]. Une instabilité de tension peut se produire en particulier lorsque la charge élevée est plus importante que celle prévue et le risque est d'autant plus grand que la consommation réactive est également plus grande que prévue.

I.2.3 Effondrement de tension dans le monde

A travers le monde entier, il y a plusieurs incidents qui causent l'effondrement de tension au cours de vingt dernières années, la majorité de ces incidents depuis 1970 [8]. Le tableau I-a et I-b [8], résumant respectivement une liste des incidents qui ont provoqués un effondrement de la tension et de creux qui n'ont pas été suivis d'un effondrement.

Tableau 1: Tableau de l'effondrement de la tension à travers le monde.

Tableau 1-a : Incidents suivis d'un effondrement [8]		
Date	Lieu	Durée
22-08-1970	Japon	30 minutes
22-09-1977	Jacksonville, Floride, E-U	Quelques minutes
19-12-1978	France	4 heures de coupures
04-08-1982	Belgique	4.5 minutes
27-12-1983	Suède	1 minute
12-01-1987	Ouest de la France	6-7 minutes
Été 1996	Ouest USA	Plusieurs heures
03-02-2003	Algérie	Plus de 3 heures
31-03-2003	Iran	8 heures
28-08-2003	Ville de Londres, Angleterre	Quelques heures
23-09-2003	Suède et Danemark	Quelques heures
28-09-2003	Italie	Plus de 4 heures
18-01-2005	Arc lémanique	1 heure

25-05-2005	Moscou, Russie	5 heures de panne
Tableau 1.b : Incidents non suivis d'un effondrement [8]		
Date	Lieu	Durée
22-09-1970	Etat de New York, E-U	Incertitude pendant des heures
02-03-1979	Zélande, Danemark	15 minutes
17-09-1981	Longview, Wash, E-U	Quelques minutes
10-08-1981	Centre de l'Oregon, E-U	Quelques minutes
21-05-1983	Caroline du nord, E-U	2 minutes
11-06-1984	Nord-est des E-U	Incertitudes pendant des heures
20-05-1986	Angleterre	5 minutes
20_07-1987	Illinois et Indiana, E-U	Incertitudes pendant des heures
03-02-1990	Ouest de France	Quelques minutes
05-07-1990	Baltimore, Wash E-U	Incertitudes pendant des heures
Nove-1990	Ouest de la France	Quelques minutes

I.2.4 Analyse de la stabilité de tension

Généralement, il y a deux types d'analyse de la stabilité de tension : dynamique et statique.

L'analyse dynamique se base sur des simulations dans le temps afin de résoudre des équations non linéaires différentielles/algébriques du système. Par contre, l'analyse statique

est basée sur la solution des équations conventionnelles ou modifiées du problème d'écoulement de puissance [1].

I.2.4.1 Analyse dynamique

L'analyse dynamique fournit des réponses temporelles précises dans le domaine de simulation des réseaux électriques. La détermination précise des temps critiques des différents événements menant à l'instabilité de tension est essentielle pour l'analyse post-perturbation et la coordination de la protection et de la commande. Cependant, l'analyse dynamique consomme beaucoup de temps en termes de calculs et de traitement des résultats. En outre, l'analyse dynamique ne fournit pas aisément l'information concernant la sensibilité ou le degré d'instabilité de tension, ce qui la rend impraticable pour l'analyse de certaines conditions du fonctionnement du système ou pour déterminer les limites de stabilité de la tension [1].

I.2.4.2 Analyse statique

A l'inverse de l'analyse dynamique, l'analyse statique de la stabilité de tension implique seulement la solution des équations algébriques du problème d'écoulement de puissance. De ce fait, du point de vue calcul, elle est beaucoup plus efficace que l'analyse dynamique. L'analyse statique est idéale pour la majeure partie des études dans lesquelles des limites de stabilité de tension pour des pré-contingences et des post-contingences doivent être déterminées [1].

I.2.5 Différentes méthodes d'amélioration de la stabilité d'un réseau électrique

La compensation est une technique de la gestion d'énergie réactive afin d'améliorer la qualité énergétique dans les réseaux électriques à courant alternatif. Elle peut se réaliser de plusieurs manières, ayant pour buts :

- La correction du facteur de puissance
- Amélioration de la régulation de la tension
- Equilibre des charges
- L'aide au retour à la stabilité en cas de perturbation.

I.2.5.1 Compensation traditionnelles [9]

I.2.5.1.1 Compensateurs synchrones

Les compensateurs synchrones sont des machines tournantes branchées sur le tertiaire

du transformateur THT/HT qui peut fournir ou absorber de l'énergie réactive sans mettre en jeu de puissance active. La fourniture de la puissance réactive est limitée par l'échauffement des enroulements et l'absorption par des problèmes de stabilité statique.

Ces machines qui sont constituées de 20 à 60 MVAR posent des problèmes de maintenance et leur installation nécessite des ouvrages de génie civil important et le coût est élevé tant en investissement qu'en exploitation. Leur emploi est de plus en plus abandonné principalement à cause de leur entretien trop onéreux.

I.2.5.1.2 Batteries de condensateurs

Elles ont pour rôle de fournir une partie de l'énergie réactive fixe consommée par les charges ou le réseau. On distingue deux types de matériels :

Batteries de condensateurs HT :

Ces batteries raccordées aux jeux de barres HT des postes THT/HT compensent les pertes réactives sur les réseaux HT et THT et les charges. Leur puissance est de 20 à 30 MVAR.

Batteries de condensateurs MT :

Raccordées aux jeux de barres MT des postes HT/MT et THT/MT, elles compensent l'appel global de l'énergie réactive des réseaux de distribution aux réseaux de transport.

Ces batteries sont fractionnées en gradins de 2.4 ou 3 MVAR (selon la puissance du transformateur HT/MT). Chaque gradin commandé séparément est dimensionné pour limiter à 5% la variation de la tension maximale sur le jeu de barre MT au moment de la manœuvre d'un gradin.

I.2.5.1.3 Les inductances

Elles sont utilisées pour compenser la puissance réactive fournie par les lignes et les réseaux de câbles souterrains en heures creuses. Elles sont raccordées soit directement au réseau, soit branchées sur les tertiaires des autotransformateurs. Toutefois, ces inductances engendrent des harmoniques importants dont les filtrages nécessitent des installations importantes où les pertes peuvent ne pas être négligeables. Compte tenu de ces problèmes, elles sont en cours de déclassement.

I.2.5.1.4 Les PSS (Power System Stabiliser)

La structure du stabilisateur de puissance est une structure classique qui consiste en un gain, un filtre passe-haut et un ou plusieurs blocs de compensation de phase. Ces stabilisateurs de puissance sont un moyen efficace et économique d'amélioration de la stabilité dynamique d'un système électrique. Un choix adéquat des paramètres des PSS engendre un bon amortissement des oscillations induites par les perturbations et améliore la stabilité de l'ensemble du système.

Les moyens cités ci-dessus sont certes efficaces mais présentent tout de même certaines limitations telles que : temps de réaction élevé, et génération d'harmoniques.

Aujourd'hui des systèmes de contrôle plus sophistiqués et de nouvelles structures à base d'électronique de puissance sont de plus en plus requis.

I.2.5.2 Les compensateurs FACTS [10] [11] [12]

Selon l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), la définition du terme FACTS est la suivante: Systèmes de Transmission en Courant Alternatif comprenant des dispositifs basés sur l'électronique de puissance et d'autres dispositifs statique utilisés pour accroître la contrôlabilité et augmenter la capacité de transfert de puissance du réseau.

Avec leurs aptitudes à modifier les caractéristiques apparentes des lignes, les FACTS sont capables d'accroître la capacité du réseau dans son ensemble en contrôlant les transits de puissances. Les dispositifs FACTS ne remplacent pas la construction de nouvelles lignes. Ils sont un moyen de différer les investissements en permettant une utilisation plus efficace du réseau existant [13] [14].

I.3 Systèmes autonomes Diesel-Eolien

I.3.1 Présentation de système autonome Diesel-Eolien

Les communautés où l'approvisionnement de réseau public n'est pas disponible se sont bénéficiées des systèmes hybrides [15].

Ces systèmes constituent une alternative, à la réalisation de nouveaux réseaux, ou à la l'extension des anciens réseaux avec des prix exorbitants.

Un système hybrides Diesel-Eolien, est un réseau autonome qui utilise des générateurs Eoliens avec des générateurs Diesel utilisés dans les régions éloignées, pour obtenir la plus grande contribution par l'énergie éolienne sporadique à toute la puissance développée, tout en assurant un courant électrique non interruptible et de qualité [16]. En conséquence, la consommation de carburant diminue et les frais d'exploitation globaux réduisent, tandis qu'aussi il y aura une contribution à la limitation des émissions des gaz à effet de serre CO₂. En raison de la faible efficacité de conversion des panneaux solaires, l'énergie éolienne est considérée plus prometteuse parmi diverses sources d'énergie non conventionnelles.

I.3.1.1 Modes de fonctionnement des réseaux hybrides autonomes Diesel-Eolien

Ils ont deux modes : diesel seulement et diesel-éolienne. Les régions ayant une ressource suffisante de vent peuvent fonctionner dans le troisième mode c.-à-d. éolienne seulement et par conséquent mettant en arrêt les moteurs diesel.

I.3.2 Principaux éléments d'un réseau électrique hybride autonome Diesel-Eolien

I.3.2.1 Générateur diesel

Comme beaucoup de systèmes électromécaniques de production de courant électrique, un générateur diesel peut être divisé en trois principaux composants (Fig. I.2) : le moteur diesel qui inclut un moteur à combustion avec un régulateur de vitesse, le générateur synchrone (GS), et le régulateur de tension.

Le régulateur de vitesse assure une opération de vitesse constante et le régulateur de tension stabilise la tension produite pour différentes conditions de charge.

Le rôle du régulateur de vitesse c'est de maintenir la fréquence du courant à sortie.

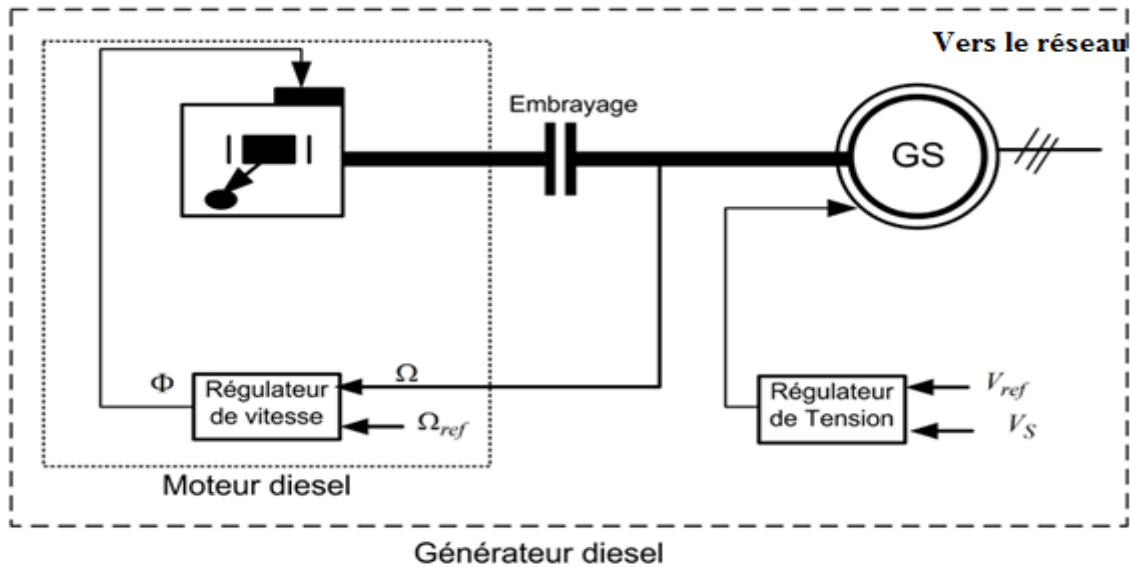


Fig. I.2 : Configuration de générateur diesel [17].

I.3.2.2 L'éolienne

Le principe de l'énergie éolienne est basé sur la récupération de l'énergie cinétique produite par le vent (densité de l'air ayant une certaine vitesse) par des profils de pales particulières qui seront soumises à des forces qui vont les entraîner en rotation et ainsi fournir l'énergie mécanique nécessaire au générateur qui la transformera ensuite en énergie électrique. Dans les éoliennes envisagées pour le système hybride Diesel-Eolien, il est préférable d'utiliser des générateurs asynchrones à cage d'écureuil [18].

Un générateur asynchrone offre beaucoup d'avantages par rapport à un générateur synchrone conventionnel comme une source d'alimentation isolée et on peut citer les avantages principaux suivants [19][20] :

- Le prix unitaire réduit
- La rigidité,
- l'absence des balais (dans la construction à cage),
- L'absence de source séparée de courant continu,
- Facilité de l'entretien,
- L'autoprotection contre des surcharges graves et les courts-circuits, etc.

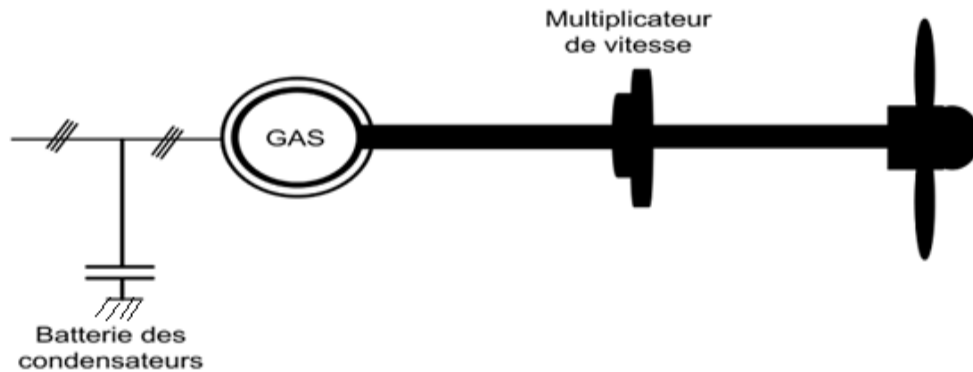


Fig. I.3 : Chaîne de conversion éolienne à générateur asynchrone à cage fonctionnant à vitesse fixe [17].

I.3.2.3 Les charges

C'est avec les charges électriques que la puissance électrique sera rendue utile. Il existe deux charges à caractère résistif et inductif. Les charges résistives incluent les ampoules à incandescence, les chauffe-eau etc. Les appareils utilisant des machines électriques sont des charges résistives et inductives. Ils sont les principaux consommateurs de puissance réactive. Les charges à CC peuvent avoir aussi des composants inductifs, mais les seuls effets introduits par ceux-ci sont :

Les variations transitoires de tension et de courant pendant les changements dans le fonctionnement de système [21]

Les demandes des charges montrent des tendances en fréquence à court terme et à long terme. Mais à la différence du vent il est relativement facile de les prévoir (l'ensemble fréquence et amplitude) puisqu'elles suivent les habitudes de la communauté. Avec la connaissance du modèle de demande tout au long de la journée, la charge peut être prévue, et la capacité de génération diesel appropriée peut être apportée sur la ligne pour fournir un approvisionnement fiable et de façon optimale et efficace.

I.3.3 Principe de fonctionnement

Un schéma global du système Diesel-Eolien est montré sur la fig. I.7. Le système diesel initial comporte le générateur diesel alimentant la charge du village. Avec l'addition des

éoliennes, une charge secondaire sera très probablement nécessaire pour absorber l'énergie excessive, chaque fois que l'énergie éolienne développée dépasse la demande. Un embrayage peut être ajouté entre le moteur diesel et le générateur, pour permettre au générateur synchrone de fonctionner en tant que compensateur synchrones quand il est souhaitable de fonctionner exclusivement à partir de l'énergie éolienne. Dans ce système le générateur synchrone règle la tension de réseau et fournit la puissance réactive nécessaire pour exciter le générateur asynchrone de l'éolienne. Une certaine forme de stockage de l'énergie dans les systèmes, peut être également justifiée.

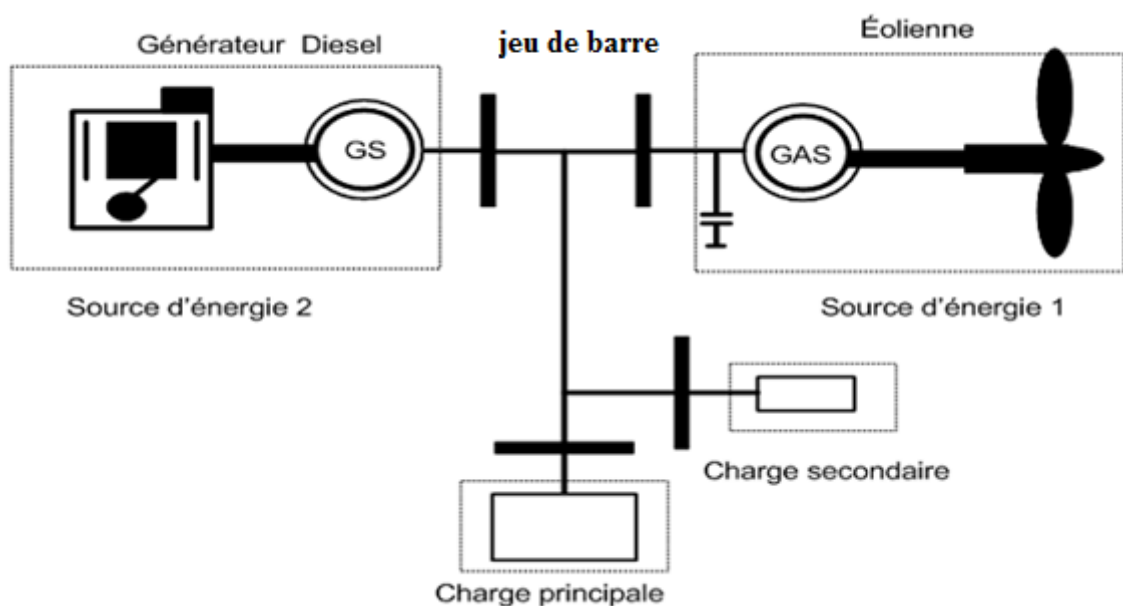


Fig. I.4 : Schéma de principe d'un système hybride Diesel-Eolien [17].

I.3.4 Problèmes rencontrés dans le fonctionnement dans réseau électrique hybride autonome Diesel-Eolien

Les facteurs pouvant dégrader le fonctionnement du réseau électrique hybride autonome Diesel-Eolien:

- Les variations de la charge.
- Les ressources d'énergies renouvelables sont aléatoires et très difficiles à prédire.
- L'instabilité de la tension :

Généralement le générateur asynchrone est utilisé comme dispositif de conversion d'énergie dans la génération d'énergie éolienne [22], l'inconvénient principal du générateur

asynchrone, est son besoin de puissance réactive pour son opération. En outre, la plupart des charges dans le système sont naturellement inductives. Le déséquilibre dans la production et la demande de la puissance réactive, peut poser le grave problème de grandes fluctuations de tension sur le jeu de barre terminal de générateur. La fluctuation de tension affectera la qualité de l'approvisionnement, et peut même endommager la stabilité de système en l'absence du contrôle approprié de tension.

I.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini d'une manière générale la stabilité de tension dans le réseau électrique, ses différents types et les causes principales conduisant à l'instabilité, et on constate que la stabilité de la tension est directement liée à la puissance réactive fournie par le réseau, en citant les solutions prévues pour améliorer la stabilité de la tension. Un aperçu sur le réseau électrique hybride autonome Diesel-Eolien est donné, son importance, ces différents composants, son fonctionnement et les problèmes que peut rencontrer lors de son fonctionnement, on a conclu que les problèmes de fluctuation et d'instabilité de la tension de ce système sont causés par le générateur asynchrone qui absorbe la puissance réactive du réseau pour sa magnétisation ainsi que la variation de la puissance réactive de la charge.

Chapitre II

Modélisation mathématique du système

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, les composants du réseau électrique hybride autonome Diesel-Eolien seront modélisés, dans le but d'établir des équations mathématiques qui nous permettront d'analyser la stabilité de tension du système.

II.2 Modélisation mathématique du système

Pour l'analyse de la stabilité du système, on a adopté l'approche de la modélisation dynamique en termes de petites variations pour tous les équipements du système, les équations et le raisonnement qui s'en suivront se feront selon le travail fait dans [23].

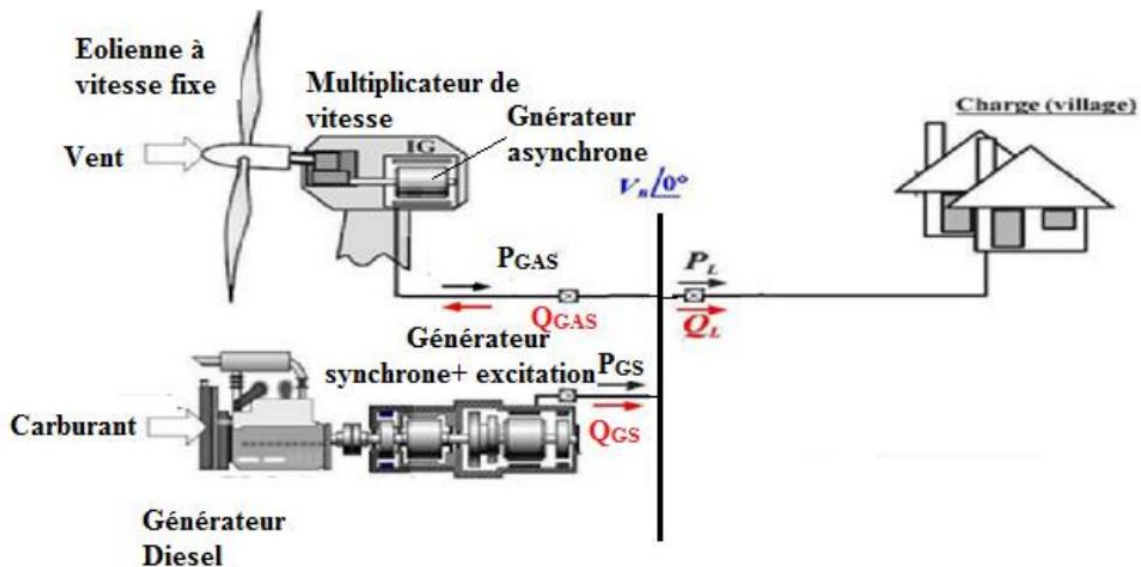


Fig. II.1 : Schéma de base considéré pour la modélisation [23].

La Fig. II.1 montre le réseau électrique Diesel-Eolien considéré pour la modélisation est représenté dans la Fig. II.1. Ce système est composé de deux sources et la charge :

- **Première source :**

Le générateur diesel qui alimente une charge locale, est couplé avec une turbine éolienne, à travers des lignes supposées sans pertes.

- **Deuxième source :**

L'éolienne : elle est dotée d'un générateur asynchrone à cage d'écureuil. Ce générateur a été choisi pour cette modélisation à cause de l'influence qu'il peut avoir sur la tension du jeu de barre principal [24].

- **La charge :**

Elle est composée de la charge du village et la charge secondaire utilisée pour dissiper le surplus de la puissance, etc.).

Les petites variations de la puissance active, dépendent principalement de la fréquence, tandis qu'une petite variation de la puissance réactive dépend principalement de la tension [25].

L'équation d'équilibre de puissances réactives du système au régime permanent est :

$$\sum Q_{source} - \sum Q_{charge} = 0$$

$$Q_{SG} - Q_{GAS} - Q_L = 0 \quad (\text{II.1})$$

Où :

- Q_L : la puissance réactive absorbée par la charge,
- Q_{GAS} : représente la puissance réactive absorbée par le générateur asynchrone,
- Q_{SG} : représente la puissance réactive fournie par le générateur synchrone,

Pour l'analyse par accroissement de l'équilibre en puissance réactive du système hybride, on laisse le système hybride éprouver une variation ΔQ_L , dans la puissance réactive de la charge.

En tenant compte, de l'action du régulateur tension, la production de puissance réactive dans le système augmentera avec une quantité ΔQ_{GS} .

La puissance réactive exigée par le système changera également en raison d'un changement ΔV dans la tension. L'excédent net de puissance réactive ΔQ_S dans le système, donc, égale :

$$\Delta Q_S = \Delta Q_{GS} - \Delta Q_{GAS} - \Delta Q_L \quad (\text{II.2})$$

Cet excédent de puissance réactive, augmentera la tension du système de deux manières :

- 1) En augmentant l'absorption de l'énergie électromagnétique E_m de générateur asynchrone avec une vitesse $\frac{dE_m}{dt}$.
- 2) Par une plus grande consommation de puissance réactive de la charge, due à l'augmentation de tension.

L'expression de l'énergie magnétique E_m emmagasinée par le générateur asynchrone est donnée par :

$$E_m = \frac{1}{2} L_m I_m^2 \simeq \frac{L_m}{2} \left(\frac{V}{X_m} \right)^2 \text{ Avec } X_m = L_m \omega_e \quad (\text{II.3})$$

Où : L_m est définie comme l'inductance de magnétisation de générateur asynchrone et I_m comme étant le courant circulant dans sa maille de magnétisation (Fig. II.4).

En développant l'expression (II.4), on aura (II.5) :

$$E_m = \frac{V^2}{4\pi f X_m} \quad (\text{II.4})$$

A partir de (II.4), la variation d'énergie magnétique de générateur asynchrone est donnée dans (II.6) et l'expression dynamique de la variation de puissance réactive de générateur asynchrone est donnée dans (II.7).

$$\Delta E_m = E_m - E_{m0} = \left. \frac{\partial E_m}{\partial V} \right|_{V_0} \Delta V \quad (\text{II.5})$$

$$\Rightarrow \Delta E_m = 2 \frac{V_0}{4\pi f X_m} \Delta V = \frac{2E_{m0}}{V_0} \Delta V \quad (\text{II.6})$$

$$\Rightarrow \Delta Q_{GAS} = \frac{d\Delta E_m}{dt} = \frac{2E_{m0}}{V_0} \frac{d\Delta V}{dt} \quad (\text{II.7})$$

Avec l'augmentation dans la tension, toutes les charges de puissance réactives connectées au jeu de barre principal, éprouveront une augmentation de l'ordre $D_L = \frac{\partial Q_L}{\partial V}$.

L'expression (II-9) met en relation la puissance réactive de la charge avec la tension V de jeu de barre, où n_q est le coefficient empirique fonction de la composition de la charge [26].

$$Q_L = Q_{LN} \left(\frac{V}{V_N} \right)^{n_q} \quad (\text{II.8})$$

Q_{LN} : représente la puissance réactive absorbée par la charge sous une tension nominale V_N de jeu de barre. Elle s'écrit [22]: $Q_{LN} = Q_{L0} \left(\frac{V}{V_0}\right)^{n_q}$ où Q_{L0} et V_0 sont des conditions initiales.

On donne alors la variation de puissance réactive de la charge par l'expression (II.9).

$$\Delta Q_L = \left. \frac{\partial Q_L}{\partial V} \right|_{V_0} \Delta V = n_q Q_{LN} \frac{V_0^{n_q-1}}{V_N^{n_q}} \Delta V = n_q \frac{Q_{L0}}{V_0} \Delta V \quad (\text{II.9})$$

$$\Rightarrow \Delta Q_L = D_L \Delta V \quad \text{Avec } D_L = n_q \frac{Q_{L0}}{V_0} \quad (\text{II.10})$$

Par le remplacement de (II.7) et (II.10) dans (II.1), on aura l'expression (II.11).

$$\Delta Q_S = \frac{2E_{m0}}{V_0} \frac{d(\Delta V)}{dt} + D_L \Delta V \quad (\text{II.11})$$

On divise les deux membres cette expression par la puissance réactive de base, on obtiendra une équation exprimée en pu et qui est donnée dans l'expression (II.13) [23].

$$\frac{\Delta Q_S}{Q_{ref}} = \frac{2E_{m0}}{V_0 Q_{ref}} \frac{d(\Delta V)}{dt} + \frac{D_L}{Q_{ref}} \Delta V \quad (\text{II.12})$$

$$\Rightarrow \Delta Q_S = \frac{2H_R}{V_0 Q_{ref}} \frac{d(\Delta V)}{dt} + D_V \Delta V \quad (\text{II.13})$$

$$\text{Avec } H_R = \frac{E_{m0}}{Q_{ref} V_0} \text{ et } D_V = \frac{n_q Q_{L0}}{Q_{ref} V_0} \quad (\text{II.14})$$

L'expression (II.13) qui exprime la relation dynamique entre la variation de puissance réactive dans le réseau et la variation de tension peut s'exprimer en termes de fonction de transfert [23].

Et on a :

$$G(s) = \frac{\Delta V(s)}{\Delta Q_S(s)} = \frac{1}{D_V + \frac{2H_R}{V_0} s} \quad (\text{II.15})$$

$$\Rightarrow G(s) = \frac{K_V}{1+sT_V} \quad (\text{II.16})$$

$$\text{Avec } K_V = \frac{1}{D_V} \text{ et } T_V = \frac{2H_R}{D_V V_0} \quad (\text{II.17})$$

$$\Delta V(s) = \frac{K_V}{1+sT_V} [\Delta Q_{GS}(s) - \Delta Q_{GAS}(s) - \Delta Q_L(s)] \quad (\text{II.18})$$

II.2.1 Modélisation des éléments du système

II.2.1.1 Modèle du générateur diesel

En régime transitoire, la puissance réactive Q_{GS} est donnée par [23] :

$$Q_{GS} = \frac{E'_q V \cos(\delta_{GS0}) - V^2}{X'_d} \quad (\text{II.19})$$

En petites perturbations, (II.19) peut s'écrire comme suit :

$$\begin{aligned} \Rightarrow \Delta Q_{GS} &= \frac{V_0 \cos(\delta_{GS0})}{X'_d} \Delta E'_q + \frac{E'_q \cos(\delta_{GS0}) - 2V_0}{X'_d} \Delta V \\ &= \frac{\cos(\delta_{GS0})}{X'_d} \Delta E'_q + \frac{E'_q \cos(\delta_{GS0}) - 2V_0}{X'_d} \Delta V_B \end{aligned} \quad (\text{II.20})$$

$$\Leftrightarrow \Delta Q_{GS} = K_{GS1} \Delta E'_q + K_{GS2} \Delta V$$

$$\text{Avec } K_{GS1} = \frac{\cos(\delta_{GS0})}{X'_d} = K_1 \text{ et } K_{GS2} = \frac{E'_q \cos(\delta_{GS0}) - 2V_0}{X'_d} = K_2 \quad (\text{II.21})$$

II.2.2.1.1 Modèle réduit de la génératrice synchrone

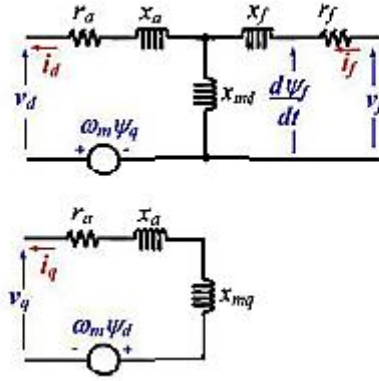


Fig. II.2 : Modèle sans amortisseur de générateur synchrone dans le repère dq [23].

Le modèle de générateur synchrone est représenté suivant le schéma de la Fig. II.2. Dans cette section, le modèle considéré du GS assume une opération à vitesse constante, aucun effet de la partie mécanique et les transitoires du flux rotorique sont négligés. Cette simplification conduit vers des implications traitées dans [27].

On aura alors les équations données par (II.22).

$$\begin{aligned} \psi_d &= -x_a i_d + x_{md} i_f & v_d &\simeq -\psi_q \\ \psi_f &= -x_{md} i_d + x_{ff} i_f & v_q &\simeq -\psi_d \\ \psi_q &= -x_q i_q & v_f &= r_f i_f + \frac{1}{\omega_{ref}} \frac{d\psi_f}{dt} \end{aligned} \quad (\text{II.22})$$

$$\begin{aligned} E_q &= \omega_{ref} x_{md} i_f \\ E'_q &= \omega_{ref} \frac{x_{md}}{x_{ff}} \psi_f \end{aligned} \quad (\text{II.23})$$

Par les changements de variables dans l'expression (II.23) et en remplaçant dans (II.22) on obtient l'expression (II.24) :

$$\begin{aligned} E_{fd} &= \frac{x_{md}}{r_f} v_f \\ \frac{d}{dt} E'_q &= \frac{1}{T'_{D0}} (E_{fd} - E_q) \end{aligned} \quad (\text{II.24})$$

A partir de l'expression (II.24) on déduit (II.25) :

$$\frac{d\Delta E'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{D0}} (\Delta E_{fd} - \Delta E_q) ;$$

$$\text{Avec } T'_{D0} = \frac{x_{ff}}{r_f} \quad (\text{II.25})$$

L'expression de la tension derrière la réactance synchrone nous donne l'équation (II.26) :

$$E_q = \frac{x_d}{x'_d} E'_q - \frac{x_d - x'_d}{x'_d} V \cos(\delta_{GS})$$

$$\Rightarrow \Delta E_q = K_{GS3} \Delta E'_q + K_{GS4} \Delta V \quad (\text{II.26})$$

En remplaçant (II.26) dans (II.27) et en écrivant le tout sous forme de fonction de transfert, on obtient le lien entre la tension de champ E_{fd} , la tension de jeu de barre V et la tension derrière la réactance synchrone exprimé dans (II.27) [23].

$$\Delta E'_q(s) = \frac{1}{K_{GS3} + sT'_{d0}} (\Delta E_{fd}(s) + K_{GS4} \Delta V(s)) \quad (\text{II.27})$$

De la même manière l'équation (II.28) peut s'écrire :

$$\Delta E'_q(s) = \frac{K_3 \Delta E_{fd}(s) + K_4 \Delta V(s)}{(1 + sT_g)}$$

$$\text{Où : } T_g = X'_d T'_{d0} / X_d$$

$$K_3 = X'_d / X_d$$

$$K_4 = (X_d - X'_d) \cos \delta / X_d$$

Les expressions (II.27) et (II.21), étant couplées, on obtient un modèle d'ordre 1 de générateur synchrone [23].

II.2.2.1.2 Le régulateur de tension

La tension du champ est assurée par le régulateur de tension. Le modèle linéaire IEEE type I de régulateur de tension est généralement utilisée dans des études transitoires des réseaux électriques, est considéré ici. Son schéma fonctionnel est montré dans Fig. II.3 et les équations dynamiques correspondantes sont données dans [28].

En petites variations, la tension de référence est nulle ($V_{ref}=0$) et la saturation de l'excitatrice n'influence pas beaucoup sur le comportement du régulateur [23].

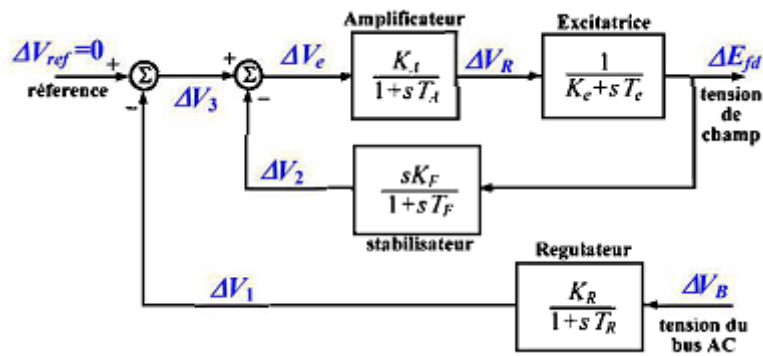


Fig. II.3 : Régulateur de tension de générateur synchrone sans saturation [22].

II.2.2.2 Modèle de générateur asynchrone

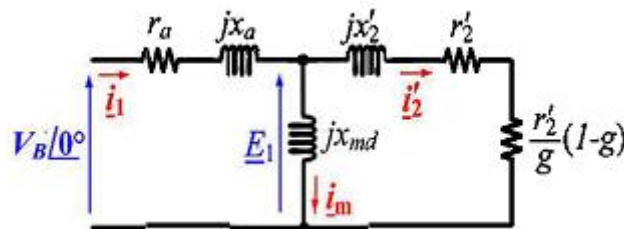


Fig. II.4 : Schéma équivalent de générateur asynchrone en régime permanent [23].

Le schéma équivalent en régime permanent du générateur asynchrone est montré dans la

Fig. II.4

L'impédance équivalente du générateur asynchrone est donnée sous cette forme :

$$\bar{Z}_E = Z_{réel} + jZ_{imag} \quad (\text{II. 28})$$

$Z_{réel}$ et Z_{imag} sont respectivement la partie réelle et la partie imaginaire de l'impédance complexe du générateur asynchrone.

$$\text{Avec : } Z_{réel} = r_1 - \frac{(r_2'/g)x_m^2}{(r_2'/g)^2 + (x_2' + x_m)^2} \quad (\text{II.29})$$

$$\text{Et } Z_{imag} = x_1 + \frac{(r_2'/g)^2 x_m + x_2' x_m (x_2' + x_m)}{(r_2'/g)^2 + (x_2' + x_m)^2}$$

On note que pour l'opération de générateur, le glissement g et $Z_{réel}$ sont négatifs et Z_{imag} reste négatif, ce qui montre que la génératrice absorbe de la puissance réactive [23].

Le courant complexe circulant dans le générateur asynchrone peut s'écrire :

$$\bar{i}_1 = \frac{V}{\bar{Z}_E} = I_{1réel} + jI_{1imag} \quad (\text{II. 30})$$

A partir de (II. 30), les expressions de la puissance les puissances active et réactive de générateur asynchrone qui sont respectivement :

$$Q_{GAS} = VI_{1réel} \quad (\text{II. 31})$$

Et

$$P_{GAS} = VI_{1imag}$$

$$Q_{GAS} = \frac{Z_{imag}}{Z_{réel}} P_{GAS} \quad (\text{II.32})$$

La puissance réelle provient de la conversion de la puissance mécanique [23] :

$$P_{GAS} = P_{Rm} - P_j - P_{mec}$$

Où :

P_J : représente les pertes joules

Et

P_{mec} : représente les pertes rotationnelles.

En remplaçant P_{GAS} dans (II. 48), on obtient :

$$Q_{GAS} = \frac{Z_{imag}}{Z_{réel}} (P_{Rm} - P_J - P_{mec}) \quad (\text{II. 33})$$

Dans L'analyse en petits signaux [23], les pertes sont quasi constantes et on obtient :

$$\Delta Q_{GAS} = K_{GAS1} \Delta P_{Rm} + K_{GAS2} \Delta V \quad (\text{II. 34})$$

Avec

$$K_{GAS1} = K_5 = \frac{X_1}{R_m - (R_1^2 + X_1^2)/2R_1} ; \quad (\text{II.35})$$

$$K_{GAS2} = K_6 = \frac{2V_0}{(R_1^2 + X_1^2)} \left[X_1 - \frac{X_1}{R_1 - (R_1^2 + X_1^2)/2R_1} \right] ; \quad (\text{II.36})$$

Et

$$R_m = \frac{r_2'}{g} (1 - g) ; R_1 = R_m - (r_1 + r_2') ; X_1 = x_1 + x_2' \quad (\text{II. 37})$$

II.2.2.2.1 Cas de générateur asynchrone à aimant permanent

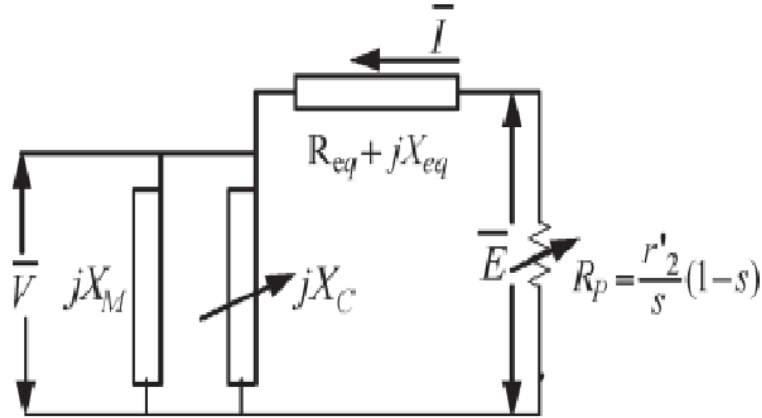


Fig. II.5 : Circuit équivalent approximatif de générateur asynchrone à aimant permanent.

Le schéma de circuit équivalent approximatif du générateur asynchrone à aimant permanent est donné dans la Fig. II.5. Pour de petites perturbations, la puissance réactive absorbé par le GAS AP, $\Delta Q_{GAS AP}$, en fonction de la tension de jeux de barre terminal et des paramètres du générateur, la puissance mécanique peut s'écrire comme suit :

$$\Delta Q_{GAS AP} = K_{GAS AP1} \Delta V \quad (\text{II.38})$$

$$\text{Avec : } K_{GAS AP1} = \frac{-2X_{eq}V_0}{R_Y^2 + X_{eq}^2} + \frac{V^2}{X_c} \left\{ \frac{3aV_0^2 + 2bV_0 + c}{(X_c^3)} - \frac{2}{V_0} \right\} \quad (\text{II.39})$$

$$R_Y = R_P + R_{eq} \quad (\text{II.40})$$

$$X_c = (3aV_0^2 + 2bV_0 + c + d)^{1/3} \quad (\text{II.41})$$

$$R_P = \frac{r'_2}{g} (1 - g) \quad (\text{II.42})$$

De même manière, pour la variation de la puissance débitée par l'éolienne, la puissance réactive absorbée $\Delta Q_{GAS AP}$, en fonction de la tension de jeu de barre principal, paramètres du générateur et le glissement peut s'écrire comme suit :

$$K_{GAS\ AP2} = \frac{-2-2X_{eq}R_Y V_0}{(R_Y^2+X_{eq}^2)\{2R_Y(P_{Rm}-P_{fer})\}} \quad (II.43)$$

$$K_{GAS\ AP3} = K_{c1} + \frac{V_0^2}{X_c} \left\{ \frac{(3aV_0^2+2bV_0+c)}{(3X_c^2)} - \frac{2}{V_0} \right\} \quad (II.44)$$

Où : $K_{c1} = \frac{-2X_{eq}V_0}{R_Y^2+X_{eq}^2}$ (II.45)

Si X_c est infinie, alors le GAS AP se comporte comme un GAS.

II.3 Représentation globale du système de gestion de l'énergie réactive

Les équations dynamiques et algébriques développées dans la précédente peuvent être implémentée dans le logiciel de simulation MATLAB/SIMULINK suivant le schéma de la Fig. II.6.

Le système sera simulé en employant les paramètres système Diesel-Eolien, représentés au Tableau A.1 dans l'annexe.

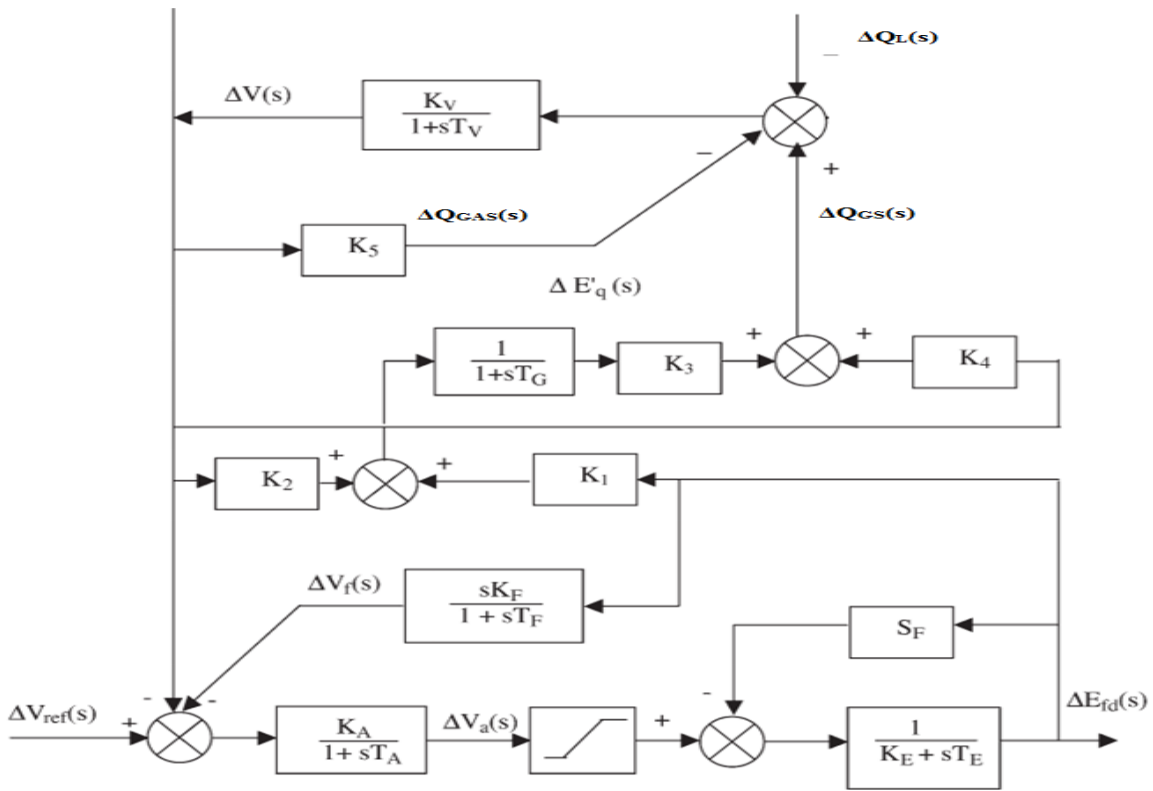


Fig. II.6 : Structure bloc de contrôle de la tension dans le système hybride Diesel-Eolien.

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons procédé à la modélisation mathématique du réseau hybride autonomes Diesel-Eolien. La stabilité de la tension de jeu de barre principal est étudiée en employant des modèles dynamiques d'ordre réduit pour représenter les différents équipements. Nous avons introduit une petite variation de puissance réactive de la charge, afin de modéliser la variation de tension au jeu de barre principal et tous les équipements du système.

Un modèle globale de la gestion de puissance réactive du système est élaboré à partir des équations des transferts des sous-systèmes représentant les relations entre les puissances réactives et la variation de la tension.

Chapitre III

Moyens existants pour le contrôle de la tension

III.1 Introduction

Dans un réseau électrique hybride autonome diesel-éolien constitué d'un générateur synchrone (GS) et d'un générateur asynchrone (GAS), l'induction du GAS a besoin de puissance réactive et dans la plus part du temps elle est fournie par le générateur synchrone du Diesel. En outre, généralement, la plupart des charges sont également inductives en nature. Mais la puissance réactive assurée n'est pas suffisante et elle crée un écart entre la consommation et la production en puissance réactive. Cet écart mène aux problèmes comme la fluctuation et l'instabilité de tension.

Généralement des banques de capacités sont utilisées pour compenser la puissance réactive dans le système d'alimentation. Les banques de capacités fixes ne peuvent pas relever le défi pour compenser la puissance réactive parce que la puissance produite par l'éolienne est imprévisible et les charges varient constamment. Les défis des issues de qualité de l'énergie comme l'instabilité de tension et la compensation de puissance réactive sont généralement relevés en employant des compensateurs FACTS (Flexible AC Transmission Systems).

III.2 Contrôle de puissance réactive par le compensateur SVC

III.2.1 Description de la méthode

Il y a un grand besoin d'améliorer la stratégie de contrôle de puissance réactive du réseau hybride autonome pour maintenir la tension dans les limites spécifiques. SVC est l'un des FACTS, qui est utilisé généralement pour le contrôle de la puissance réactive dans le réseau électrique. Le premier but du SVC est de régler la tension des réseaux électriques.

Dans un réseau hybride autonome diesel-éolienne, le compensateur de puissance réactive doit remplir les conditions variables de la puissance au niveau de GAS et de la charge. En l'absence du compensateur et des contrôles réactifs appropriés, le système peut être soumis à de grandes fluctuations de tension, qui ne sont pas souhaitables.

Les équations d'état de système ont été dérivées avec la représentation de schéma fonctionnel en fonctions de transfert du système de contrôle (Fig. III.1). Le signal de déviation de tension est utilisé en tant que erreur par le contrôle de puissance réactive afin d'éliminer le manque de puissance réactive dans le système.

Le modèle mathématique du système (Fig. III.1) utilisant des équations d'écoulement de puissances réactive est développé.

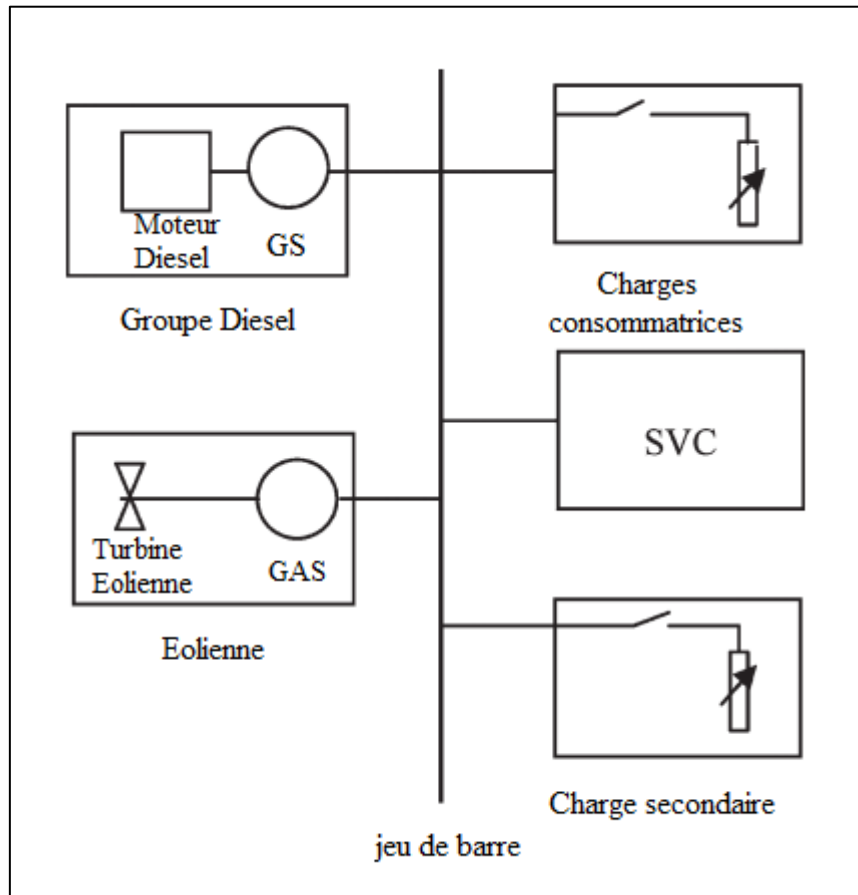


Fig. III.1 : Schéma de réseau autonome hybride avec SVC.

L'équation d'équilibre de puissance réactive du système dans le régime permanent est :

$$\sum Q_{source} - \sum Q_{charge} = 0 \quad (III.1)$$

$$Q_{GS} - Q_{SVC} = Q_L + Q_{GAS} \quad (III.2)$$

Pour l'analyse par accroissement d'équilibre de puissance réactive du système hybride, on a laissé le système hybride éprouver un changement de la charge en puissance réactive de la grandeur ΔQ_L . En raison de l'action des contrôleurs AVR et de SVC, la production de puissance réactive de système augmente d'une quantité $\Delta Q_{GS} + \Delta Q_{SVC}$ la puissance réactive exigée par le système changera également en raison d'un changement dans la tension de ΔV

L'excédent net de puissance réactive dans le système donc, égale :

$$\Delta Q_{GS} + \Delta Q_{SVC} - \Delta Q_{GAS} - \Delta Q_L = \Delta V(s) \frac{K_V}{1+sT_V} \quad (III.3)$$

ΔQ_{GS} , ΔQ_{GAS} , ΔQ_L , K_V , et T_V sont développées dans le chapitre II.

La puissance réactive fournie par le SVC est donnée [29], [30] :

$$Q_{SVC} = V^2 B_{SVC} \quad (III.4)$$

Où B_{SVC} est la susceptance réactive du SVC.

Pour la petite perturbation, dans le la transformation de Laplace on peut écrire :

$$\Delta Q_{SVC} = K_6 \Delta V + K_7 \Delta B_{SVC} \quad (III.5)$$

$$K_6 = 2VB_{SVC} \quad (III.6)$$

$$K_7 = V^2 \quad (III.7)$$

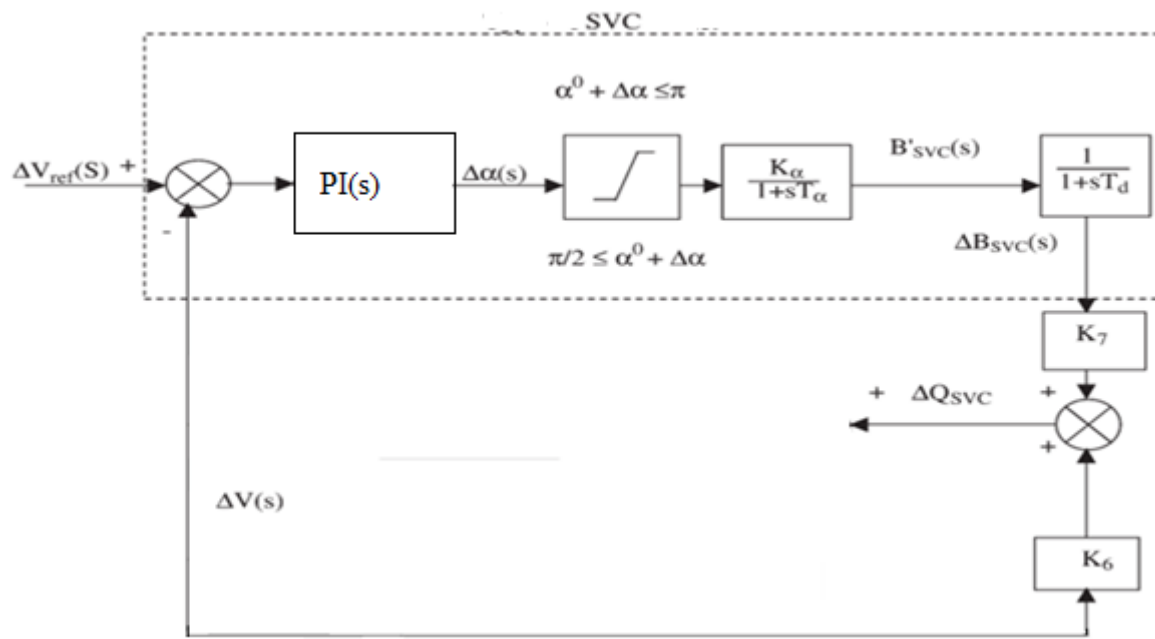


Fig. III.2 : Schéma du modèle en petit signal du SVC à thyristors contrôlés.

Les équations dynamiques et algébriques développées précédemment peuvent être implémentée dans le logiciel de simulation MATLAB/SIMULINK suivant le schéma de la Fig. III.3.

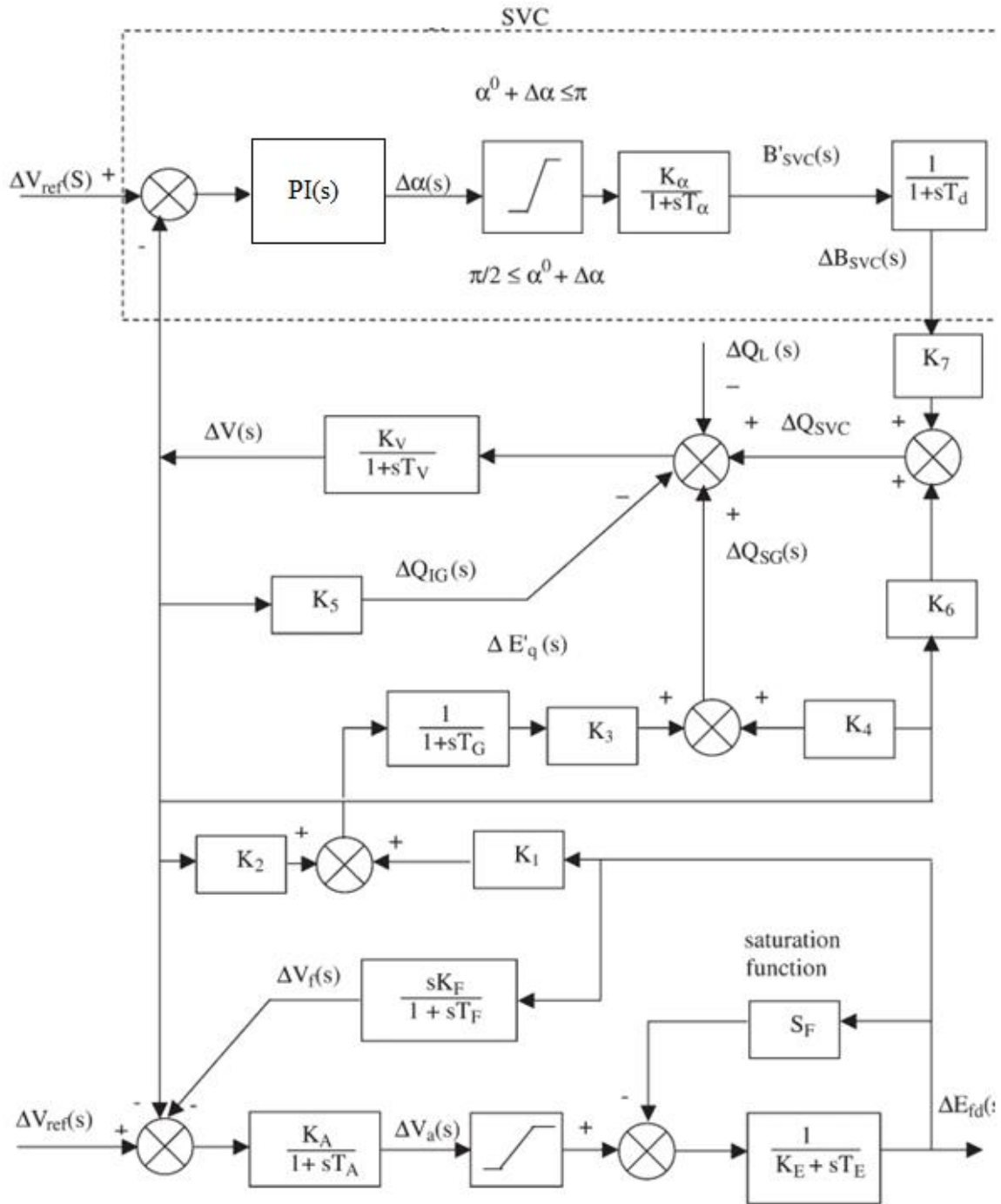


Fig. III.3 : Schéma en fonctions de transfert pour le contrôle de la puissance réactive d'un réseau hybride diesel-éolienne.

On utilise les paramètres du Tableau A.2 représenté dans l'annexe, pour la simulation du système de la Fig. III.3.

III.3 Contrôle de puissance réactive par le compensateur STATCOM

III.3.1 Description de la méthode

Le STATCOM utilise un onduleur de source de tension (VSC) qui développe intérieurement une puissance réactive inductive/capacitive. le STATCOM a les avantages par rapport au compensateur SVC, il a la capacité de fournir ou d'absorber la puissance réactive par le contrôle approprié de la tension de l'onduleur en gardant la valeur spécifique de la tension du nœud où le STATCOM est relié.

D'abord les équations d'état de système sont dérivées des équations d'équilibre de puissance active et réactive du système. Un signal de déviation de tension est employé par le contrôleur de STATCOM pour éliminer l'écart de puissance réactive dans le système. Également le signal de déviation de tension est employé par le système d'excitation du générateur synchrone pour éliminer la déviation de tension, et finalement les réponses transitoires du système hybride sont également illustrées pour le générateur asynchrone à différentes valeur de glissement et un changement de 1% en puissance réactive de la charge.

La fig. III.4 montre le schéma de système hybride diesel-éolienne avec le compensateur STATCOM.

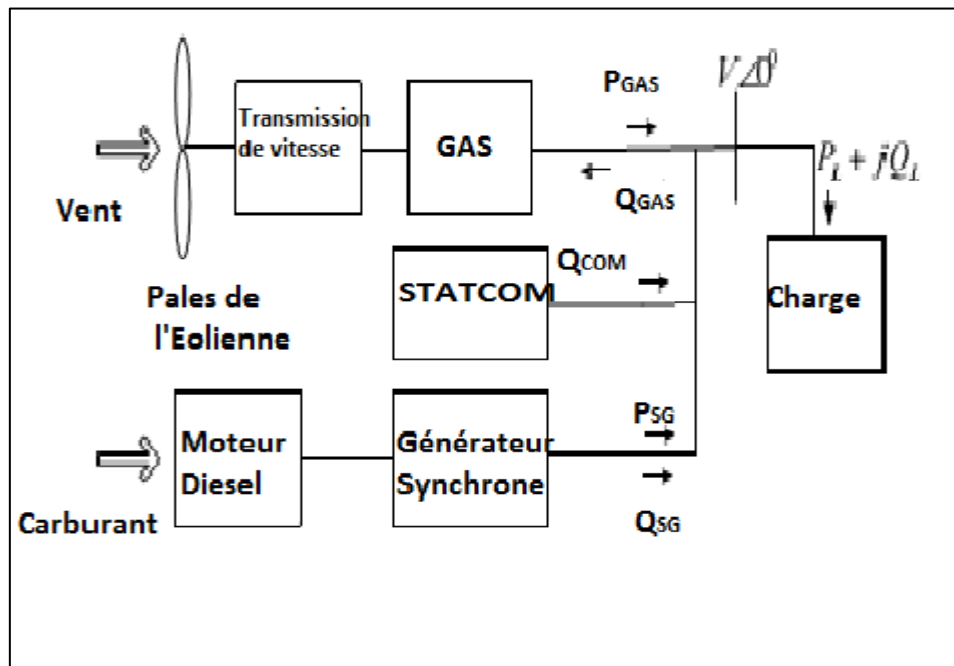


Fig. III.4 : Schéma unifilaire de réseau hybride Eolienne-Diesel avec compensateur STATCOM.

L'équation d'équilibre de puissance réactive du système dans le régime permanent est :

$$\sum Q_{source} - \sum Q_{charge} = 0 \quad (III.8)$$

$$Q_{GS} - Q_{com} = Q_L + Q_{GAS} \quad (III.9)$$

Pour l'analyse par accroissement d'équilibre de puissance réactive du système hybride, on a laissé le système hybride éprouver un changement de la charge en puissance réactive de la grandeur ΔQ_L . En raison de l'action des contrôleurs AVR et de STATCOM, la production de puissance réactive de système augmente d'une quantité $\Delta Q_{GS} + \Delta Q_{com}$ la puissance réactive exigée par le système changera également en raison d'un changement dans la tension de ΔV .

L'excédent net de puissance réactive dans le système donc, égale :

$$\Delta Q_{GS} + \Delta Q_{com} - \Delta Q_{GAS} - \Delta Q_L = \Delta V_B(s) \frac{K_V}{1+sT_V} \quad (III.10)$$

Pour la modélisation d'écoulement de puissance dans le STATCOM, la génération de puissance réactive au jeu de barre AC est sous la forme [31].

Le schéma et le circuit équivalent de STA TCOM est montré dans fig. III (a) et III (b).

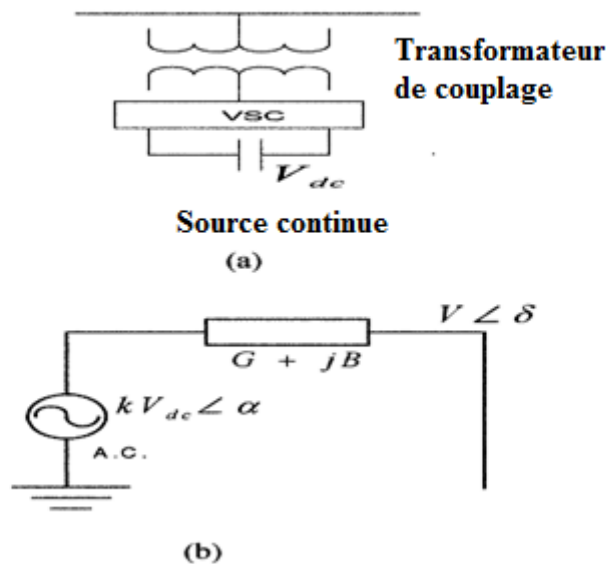


Fig. III.5 : Schéma de principe de STATCOM (a) et (b) circuit équivalent.

$$Q_{com} = kV_{dc}^2 B - kV_{dc} V B \cos(\alpha - \delta) + kV_{dc} V G \sin(\alpha - \delta) \quad (III.11)$$

Considérant la valeur de G et de δ égale zéro pour les calculs suivants :

$$Q_{com} = kV_{dc}^2 B - kV_{dc}VB \cos(\alpha) \tag{III.12}$$

Comme l'écoulement de la puissance réactive dépend des variables principales V et α , ainsi

$$Q_{com} = f(V, \alpha) \tag{III.13}$$

L'équation linéarisée de STATCOM pour la petite perturbation est donnée ci-dessous :

$$\Delta Q_{com} = \frac{\partial Q}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial Q}{\partial V} \Delta V \tag{III.14}$$

$$\Delta Q_{com} = K_6 \Delta \alpha + K_7 \Delta V \tag{III.15}$$

Où $k = \frac{p}{6} \cdot \frac{\sqrt{6}}{\pi}$

$$K_6 = kV_{dc}VB \sin(\alpha) \tag{III.16}$$

$$K_7 = -kV_{dc}B \cos(\alpha) \tag{III.17}$$

p : est le nombre d'impulsion de l'onduleur.

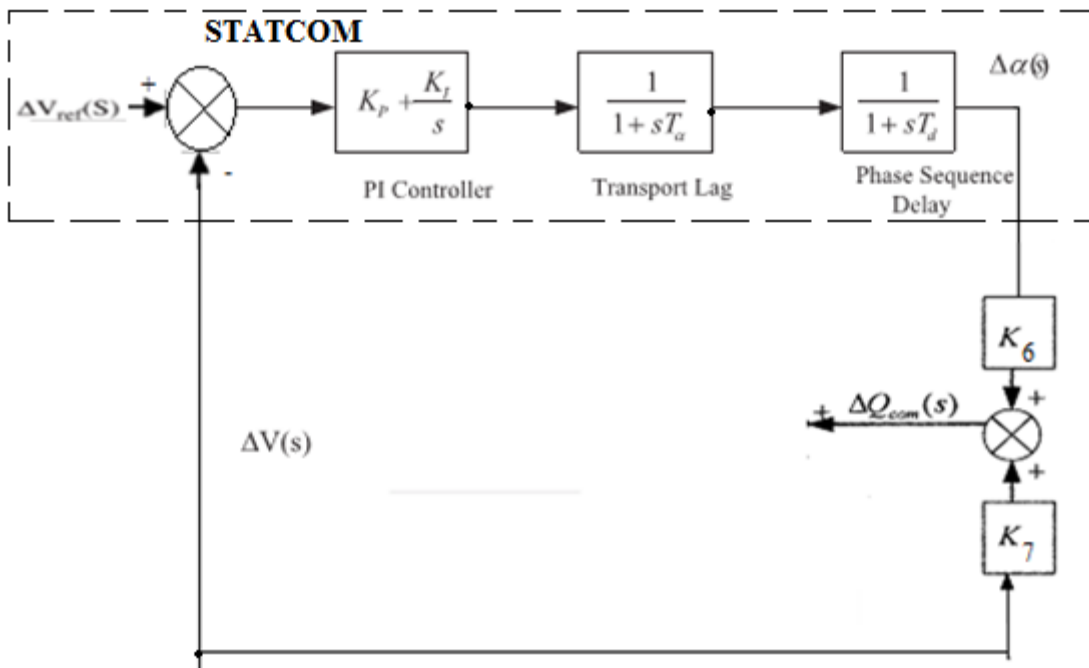


Fig. III.6 : Schéma équivalent du STACOM.

Les équations dynamiques et algébriques développées précédemment peuvent être implémentée dans le logiciel de simulation MATLAB/SIMULINK suivant le schéma de la Fig. III.6. Les paramètres de Tableau 3 dans l'annexe, seront considérés pour la simulation avec STATCOM.

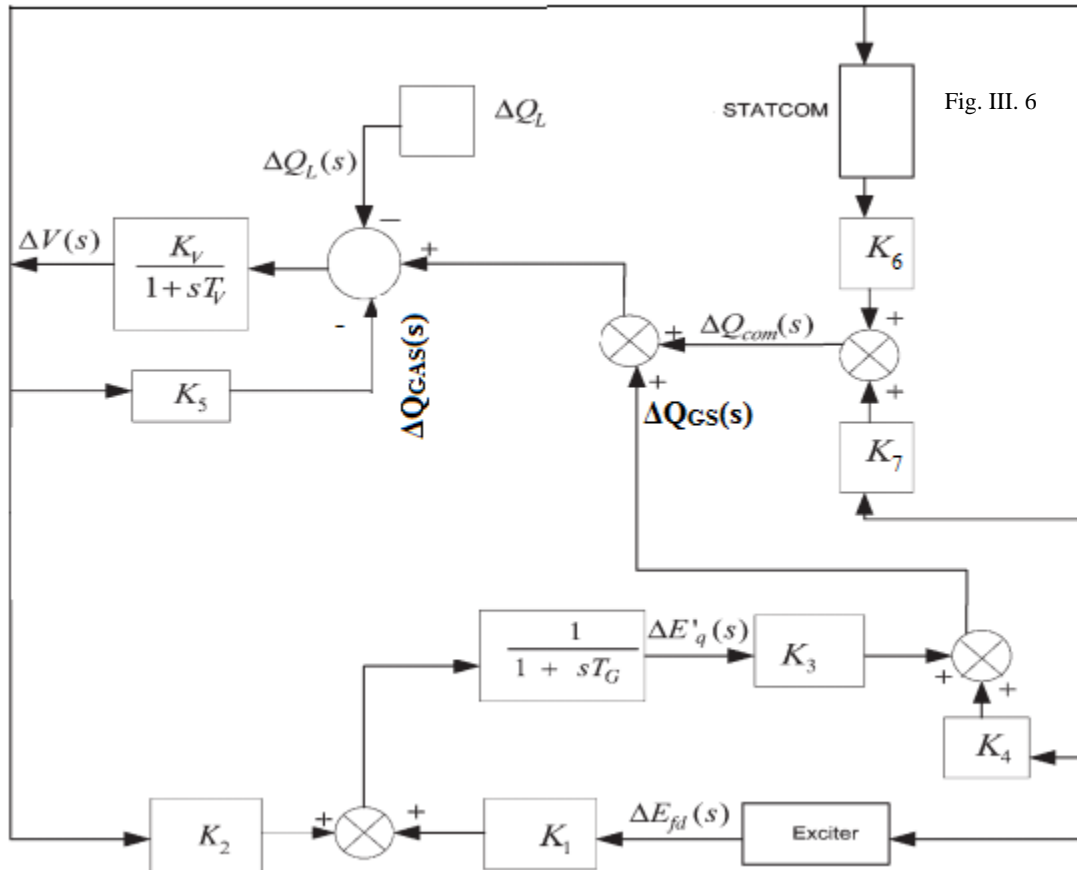


Fig. III.7 : Diagramme du système construit avec des fonctions du transfert.

III.4 Etude comparative du système employant un générateur asynchrone à cage d'écureuil et le générateur asynchrone à aimant permanent dans le système de conversion d'énergie aérodynamique

III.4.1 Avantages du générateur asynchrone à aimant permanent

Le générateur asynchrone à cage d'écureuil a le principal avantage de non synchronisation après la variation de la vitesse de l'éolienne dans la plage du fonctionnement. Mais son fonctionnement est pauvre en termes de régulation de tension, car il absorbe un

courant de magnétisation pour son excitation. Ceci diminue le facteur de puissance, et le rendement.

Le facteur de puissance, la régulation de tension et le rendement peuvent être améliorés en utilisant le générateur asynchrone à aimant.

Dans le générateur asynchrone à aimant permanent, un second rotor constitué d'un aimant permanent est monté. L'aimant permanent fournit le flux dans les nouvelles contreparties de générateur asynchrone. Le rotor à base de l'aimant permanent est monté sur un axe de rotation libre, pour fournir un flux alternatif. A présent les pôles du rotor à aimant permanent, coïncident avec les pôles magnétiques induits par la partie statorique.

Le rotor principal fonctionne dans le mode asynchrone, et suit toujours le champ tournant du stator avec un glissement.

Le besoin de puissance réactive de la machine devient sensiblement réduit, pendant que le courant magnétisant absorbé diminue, en raison des aimants permanents. D'autre part, le GAS AP directement entraîné peut être employé en supprimant le besoin d'un multiplicateur de vitesse et ces problèmes de maintenance. L'autre avantage majeur, est que même si la tension des nœuds de réseau est déséquilibrée, le GAS AP peut fonctionner avec un rendement élevé sur une plage déterminée de glissement, et le rotor à aimant permanent intégré est moins affecté par les séquences négatives du champ rotationnel. La taille de la machine devient réduite en raison de la grande densité de puissance et de réduction de l'irruption des courants.

III.4.2 Déroulement de la comparaison

Dans cette partie, les réponses transitoires du système pour une variation dans la puissance réactive de la charge, seront analysées et une comparaison des performances de stabilité de tension sera élaborée pour le système utilisant un générateur asynchrone à cage d'écureuil, et un générateur asynchrone à aimant permanent.

Modélisation mathématique du système

Le réseau hybride diesel- éolienne, avec le compensateur de puissance réactive STATCOM, considéré pour l'étude est montré dans Fig. III.8

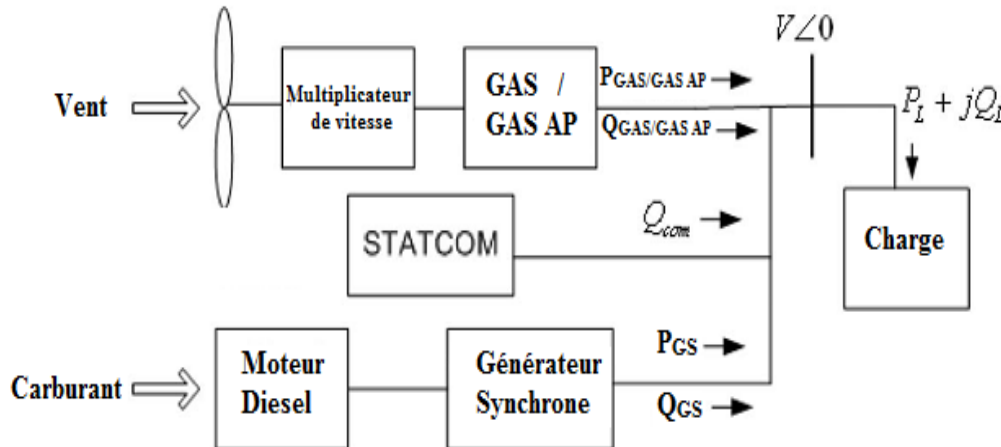


Fig. III.8 : Schéma unifilaire de réseau hybride Eolienne-Diesel en employant le GAS/GAS AP avec compensateur STATCOM.

Les équations d'équilibre de puissance active et réactive du système dans le régime permanent, sont :

$$P_{GAS AP/GAS} + P_{GS} = P_L \tag{III.18}$$

$$Q_{GS} + Q_{com} + Q_{GAS AP/GAS} = Q_L \tag{III.19}$$

A cause d'une perturbation ΔQ_L dans la puissance réactive de la charge, la tension du système peut changer, ce qui en résulte un changement par accroissement de la puissance réactive des autres composants.

L'excédent net, de la puissance réactive est :

$$\Delta Q_{GS} + \Delta Q_{com} + \Delta Q_{GAS AP/GAS} - \Delta Q_L$$

Et celui-ci, changera la tension de jeu de barre de système qui sera régit, par la fonction de transfert suivante :

$$\Delta V(s) = \frac{K_V}{1+sT_V} [\Delta Q_{GS}(s) + \Delta Q_{com}(s) + \Delta Q_{GAS AP/GAS}(s) - \Delta Q_L(s)] \tag{III.20}$$

A travers les équations dynamiques et algébriques développées précédemment, un modèle de gestion de puissance réactive du système peut être développé, et le schéma fonctionnel du système construit en fonctions de transfert est montré dans Fig. III.9.

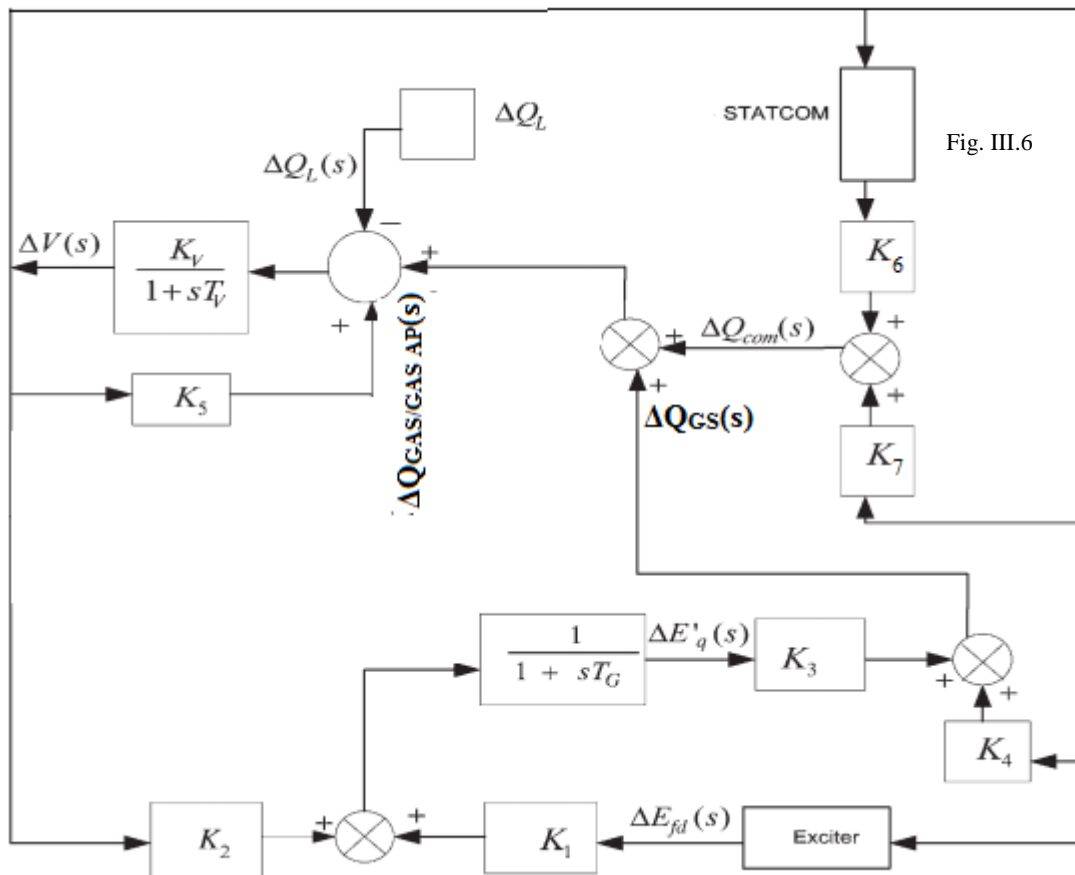


Fig. III.9 : Diagramme du système construit avec des fonctions du transfert.

On utilise les paramètres du Tableau A.4, représenté dans l'annexe, pour la simulation du système de la Fig. III.9.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé, la compensation de la puissance réactive dans le système hybride autonome Diesel-Eolienne.

Dans un premier temps, nous avons considéré la méthode du contrôle de la tension par le compensateur de puissance réactive SVC, avec une description de la méthode.

La modélisation mathématique du système avec SVC est élaborée, ainsi que le schéma global représentant la gestion de puissance réactive.

Pour la deuxième méthode, nous avons procédé au contrôle de la tension par le compensateur de puissance réactive STATCOM, suivi par un description de la méthode.

La modélisation mathématique du système avec STATCOM est donnée ainsi que le schéma global représentant la gestion de puissance réactive.

Dans ce chapitre un recueil des performances de générateur asynchrone à cage d'écureuil et de générateur asynchrone à aimant permanent, est établi. Le modèle de gestion de la puissance réactive, nous permettra la simulation, puis la comparaison effective des différentes variables du système.

Chapitre IV

Simulation de cas pratiques

IV.2.1 Résultats de simulation

La Fig. IV.2 montre les résultats obtenus en termes de déviation de tension ΔV , au jeu de barre principal, avec différentes valeurs de variation de la puissance réactive de la charge ΔQ_L .

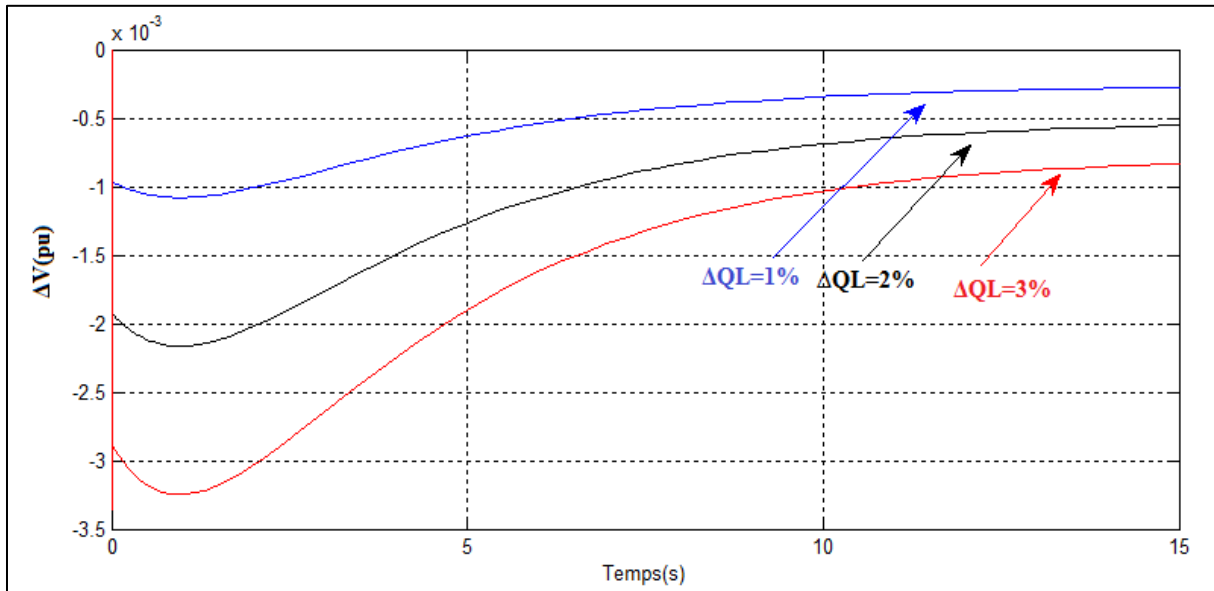


Fig. IV.2 : Déviation de la tension au jeu de barre pour différentes variations de la charge réactive : $\Delta Q_L=1\%$, $\Delta Q_L=2\%$ et $\Delta Q_L=3\%$.

La figure Fig. IV.3 montre la réponse en puissance réactive de générateur synchrone du Diesel en réponse aux différentes variations de la charge.

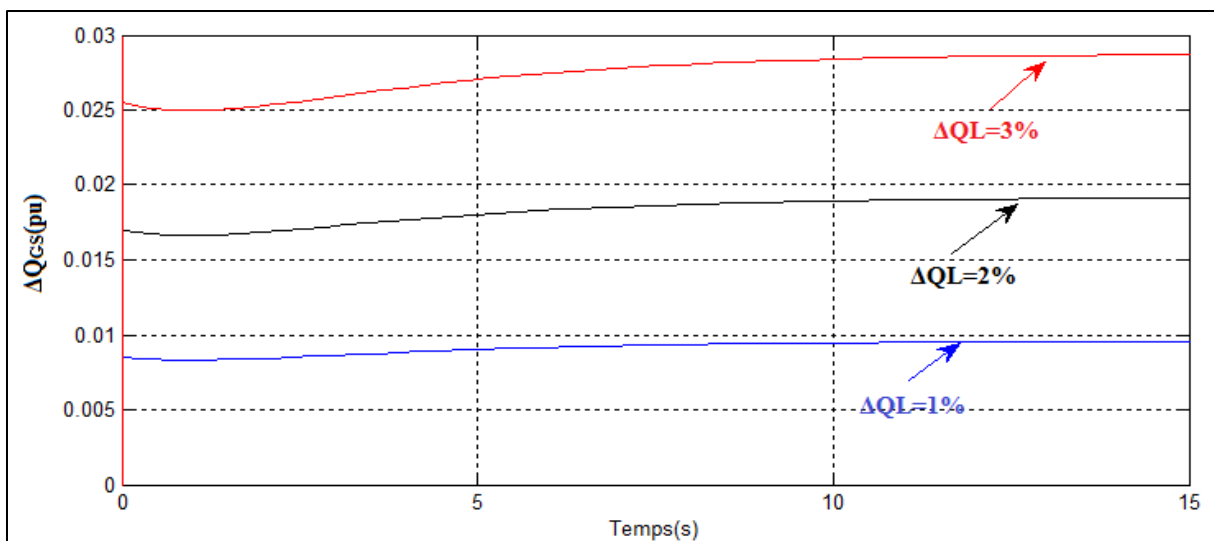


Fig. VI.3 : La réponse en puissance réactive de générateur synchrone du Diesel en réponse aux différentes variations de la charge.

VI.2.2 Interprétation des résultats de simulation

On observe à chaque fois des transitoires durant approximativement 15s, dans la Fig. IV.2, l'amplitude de la déviation de la tension est plus forte lorsque la variation de la puissance réactive de la charge augmente.

La variation de la tension dans le jeu de barre principal tente à s'annuler après 12s, à peu près. Ceci correspond à une lente réponse du régulateur de tension de générateur Diesel qui fournit toute la variation de puissance réactive de la charge.

Les résultats de la Fig. IV.3 montrent l'évolution de la puissance réactive de générateur synchrone de Diesel pour chaque variation de puissance réactive de la charge.

Le générateur synchrone tente de satisfaire le manque en puissance réactive grâce à l'action de régulateur de tension, à chaque fois qu'il détecte une erreur de la tension, réagit automatiquement pour modifier l'excitation de générateur.

Le manque en puissance réactive est fourni après 12 s, toutefois on remarque que le manque n'est pas complètement fourni pour de grandes variations au niveau de la charge, ce qui laisse une déviation de tension qui persiste.

L'ajout d'un compensateur de puissance réactive, est nécessaire pour réduire l'impact de l'ajout de puissance réactive pour une charge initiale donnée.

VI.3 Simulation du système avec le compensateur SVC

Le système de la Fig. IV.4 a été simulé en employant les paramètres du Tableau A.1 et Tableau A.2 dans l'annexe. Une variation de 1% de la puissance réactive de la charge, est appliquée au système, pour analyser la réponse en termes de déviation de la tension au jeu de barre principal, ainsi que l'évolution de la puissance réactive des différents composants de système.

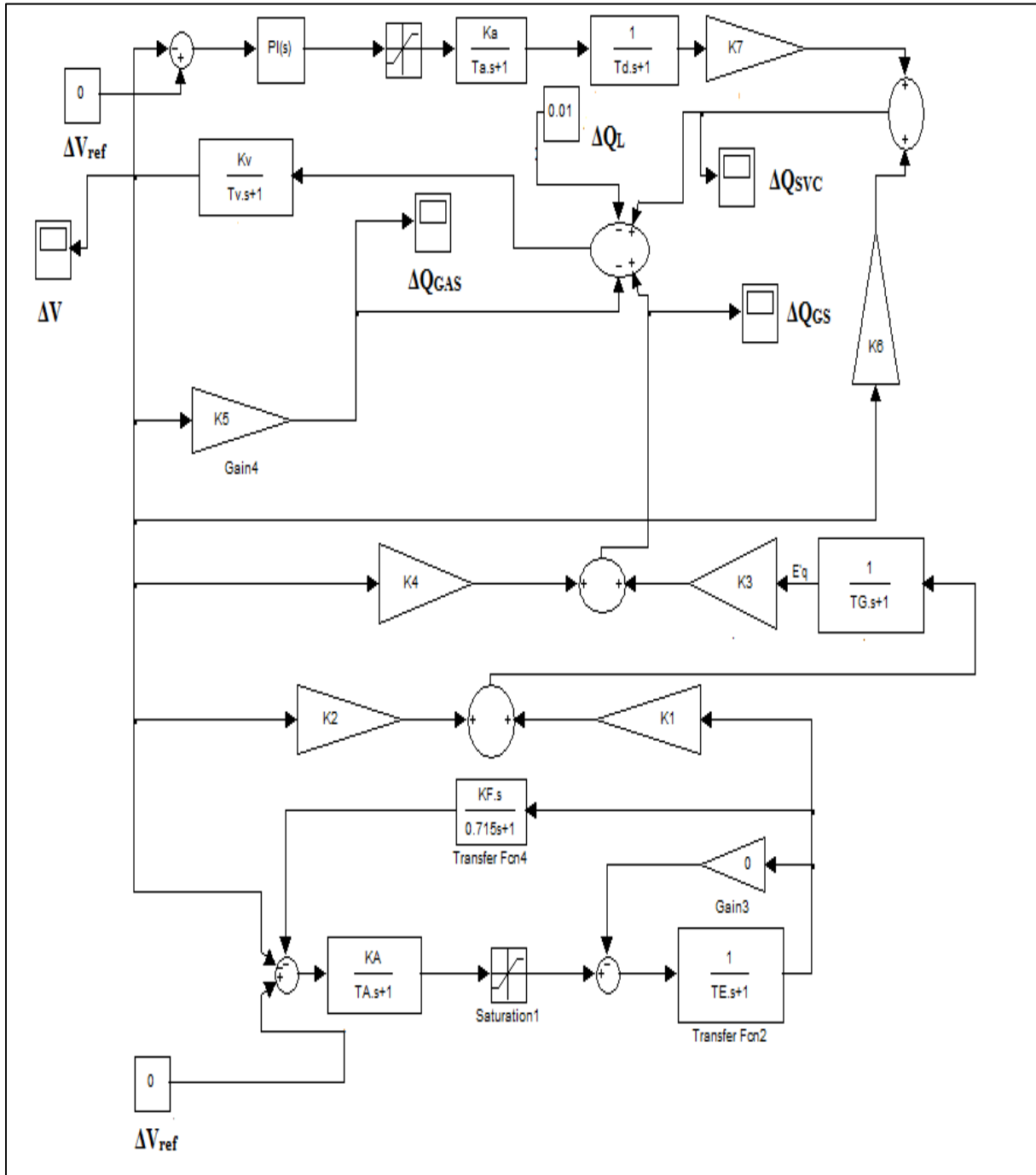


Fig. IV.4 : Schéma bloc du système Diesel-Eolienne avec le compensateur SVC.

IV.3.1 Résultats de simulation

La Fig. IV.5 montre la déviation de tension au jeu de barre en réponse à une variation de la puissance réactive de la charge (avec compensation par SVC).

Les fig. IV.6 et fig. IV.7 montrent respectivement l'évolution des puissances réactives du Diesel, compensateur SVC et de l'éolienne en réponse à la variation de la charge.

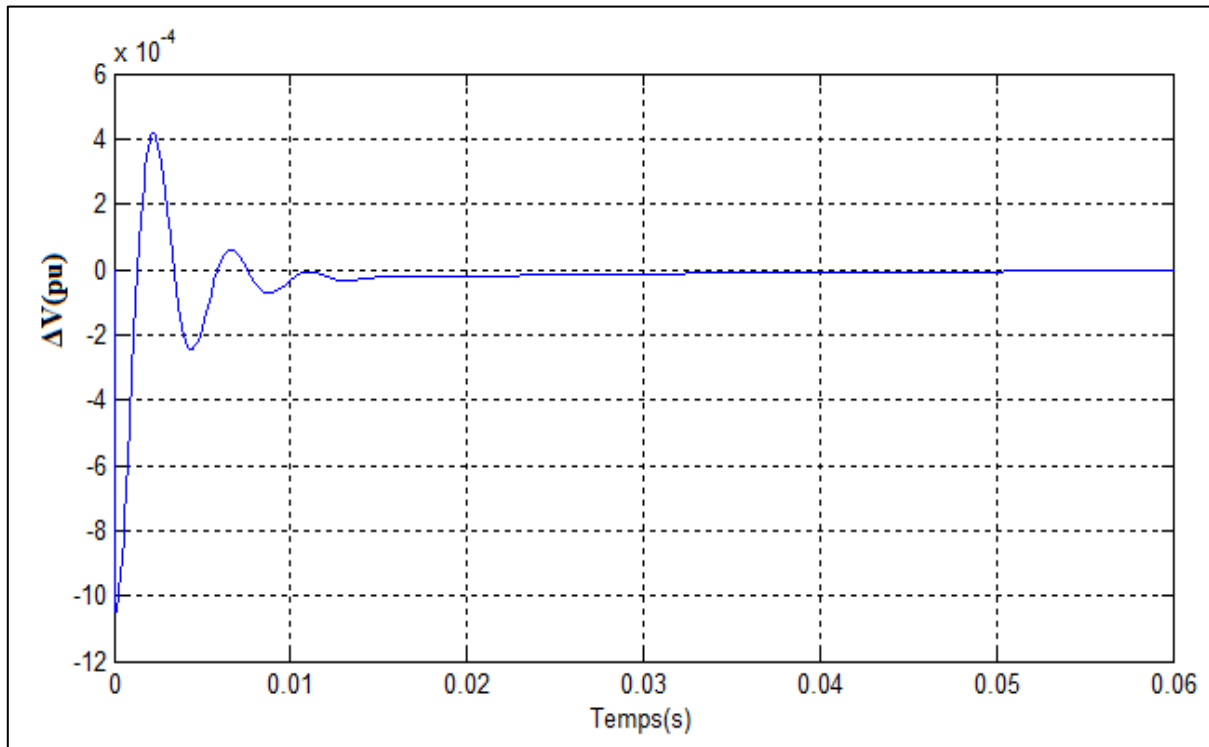


Fig. IV.5 : La réponse en puissance réactive de générateur synchrone du Diesel en réponse aux différentes variations de la charge.

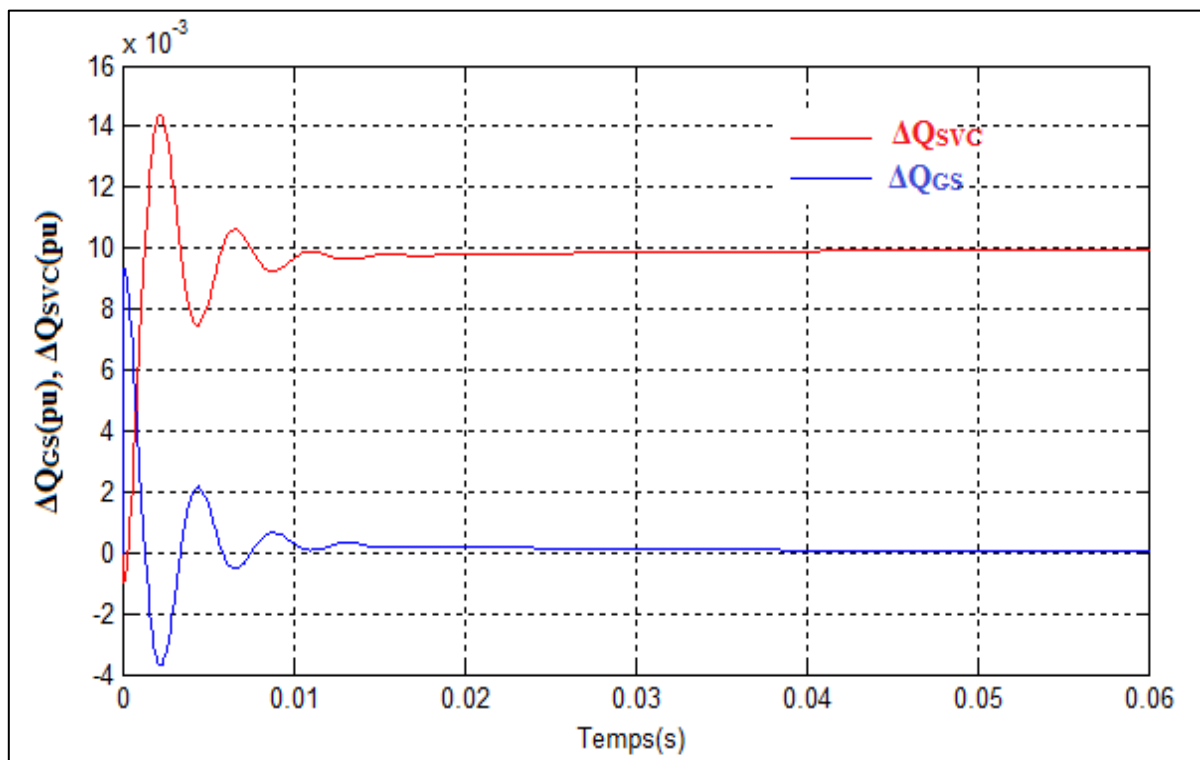


Fig. IV.6 : L'évolution des puissances réactives du Diesel et de compensateur SVC en réponse à la variation de la charge.

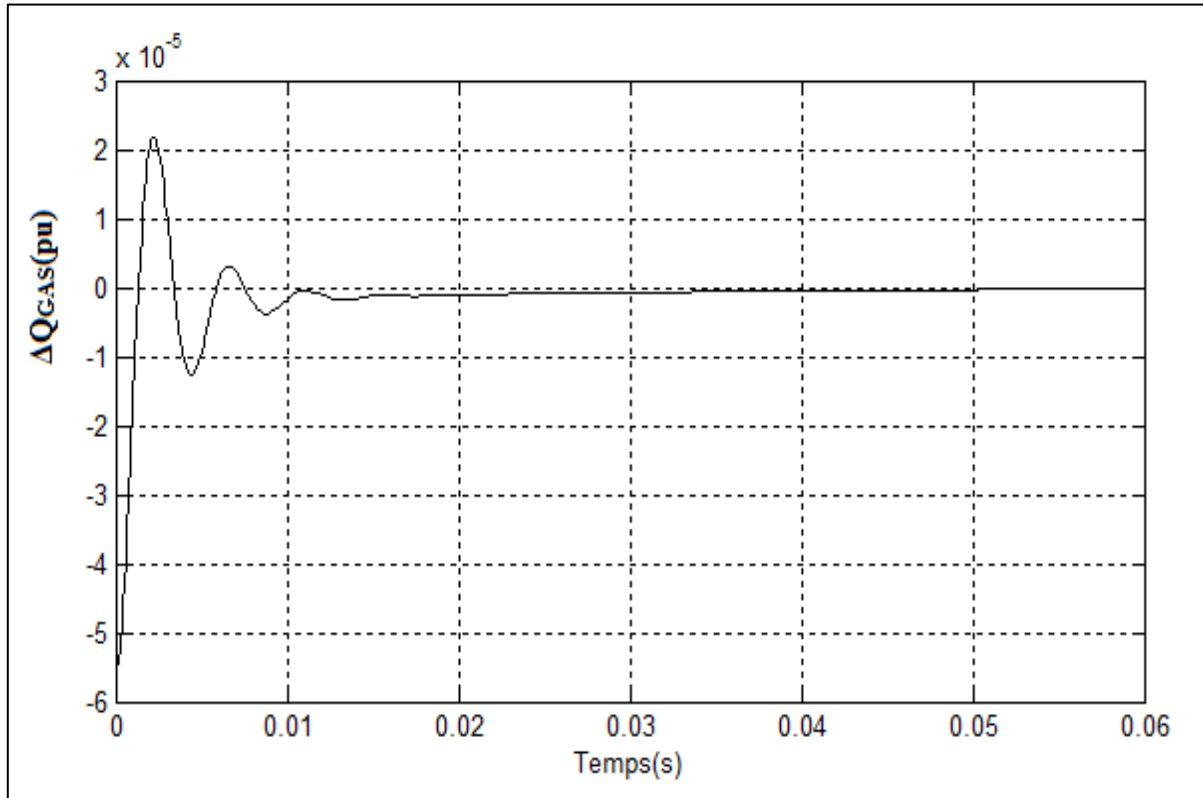


Fig. IV.7 : L'évolution de la puissance réactive de générateur asynchrone de l'éolienne.

VI.3.2 Interprétation des résultats de simulation

Pour l'analyse de la déviation de la tension au jeu de barre principal, la variation de 1% de puissance réactive de la charge est appliquée au système. On analyse les transitoire durant 0.06s, le SVC est branché comme compensateur de puissance réactive. Dans la Fig. IV.5, le retour à l'état d'équilibre est plus rapide que l'expérience précédente. La variation de tension enregistrée a seulement un niveau maximal d'amplitude -0.001049 pu, le temps de réponse est de l'ordre de 0.058s, résultat de compensation rapide apportée par le SVC. La stabilité de la tension du système est meilleure avec le compensateur SVC, mais une légère déviation de la tension persiste toujours en régime permanent.

Dans les signaux de l'évolution de la puissance réactive, on constate que la variation brusque de la charge se répercute sur toutes les parties du système en termes d'accroissement en puissance réactive. Sans compensation, le générateur diesel opère tout seul pour absorber cet ajout et maintenir la tension stable. Avec le compensateur SVC, toute l'augmentation de la puissance réactive est totalement prise en charge par celui-ci, un soulagement du générateur Diesel, et du régulateur de tension est accompli.

Les différents résultats obtenus, sont similaires aux résultats, du travail plus détaillé dans l'article scientifique [31].

VI.4 Simulation du système avec le compensateur STATCOM

Le système de la Fig. IV.8 a été simulé en employant les paramètres du Tableau A.1 et Tableau A.3 dans l'annexe. Une variation de 1% de la puissance réactive de la charge, est appliquée au système, pour analyser la réponse en termes de déviation de la tension au jeu de barre principal, ainsi que l'évolution de la puissance réactive des différents composants de système.

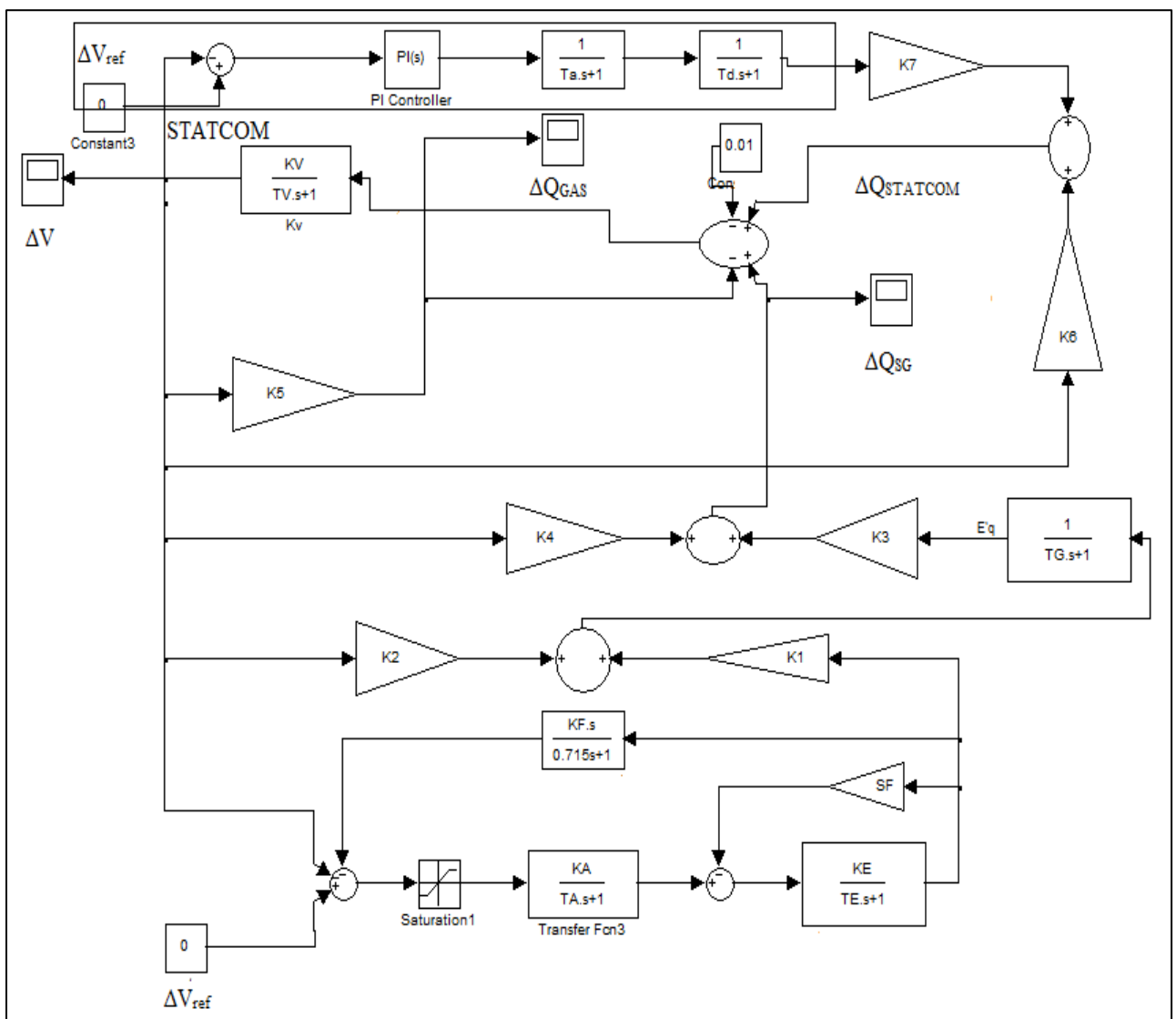


Fig. IV.8 : Schéma bloc du système Diesel-Eolienne avec le compensateur STATCOM.

VI.4.1 Résultats de simulation

La Fig. IV.9 montre la déviation de tension au jeu de barre, en réponse à une variation de la puissance réactive de la charge (avec compensation par SVC).

Les Fig. IV.10 et Fig. IV.11 montrent respectivement l'évolution des puissances réactives du Diesel, compensateur STATCOM et de l'éolienne en réponse à la variation de la charge.

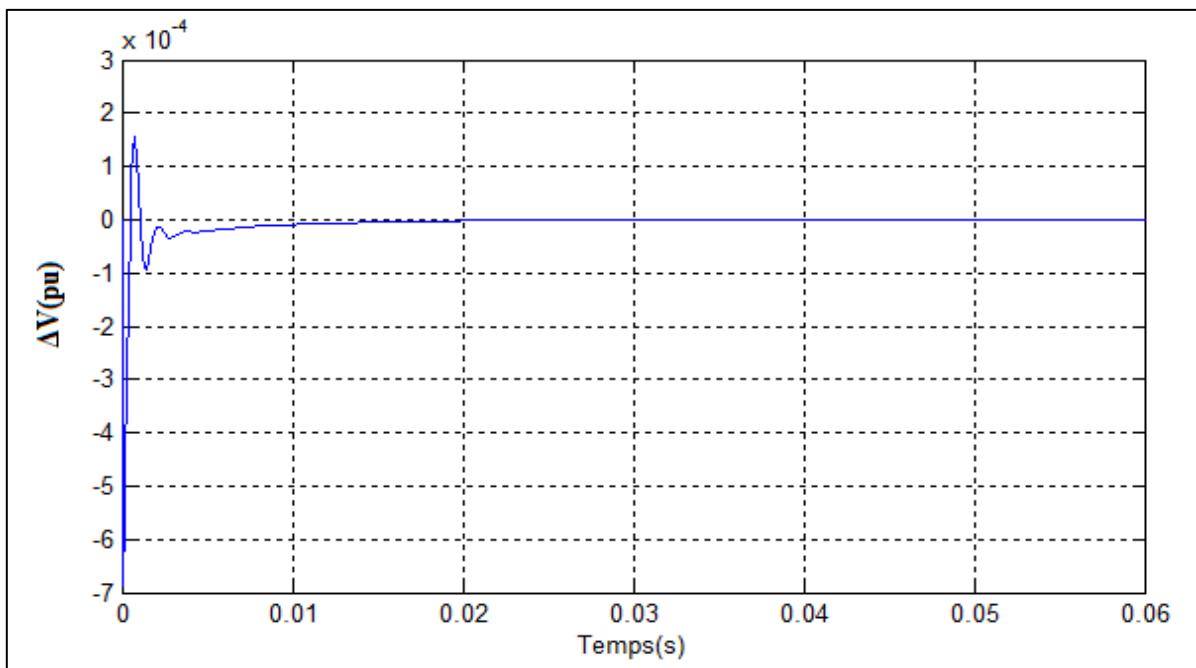


Fig. IV.9 : La déviation de tension au jeu de barre en réponse à une variation de la puissance réactive de la charge (avec compensation par STATCOM).

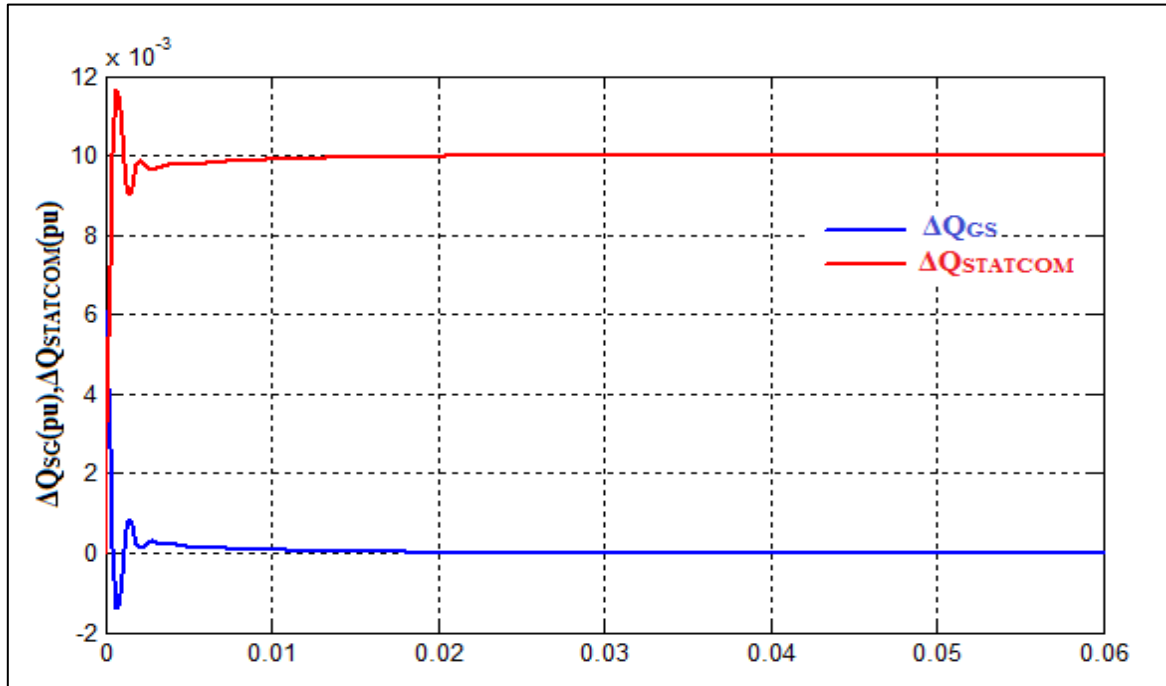


Fig. IV.10 : L'évolution de la puissance réactive du Diesel de compensateur STATCOM en réponse à la variation de la charge.

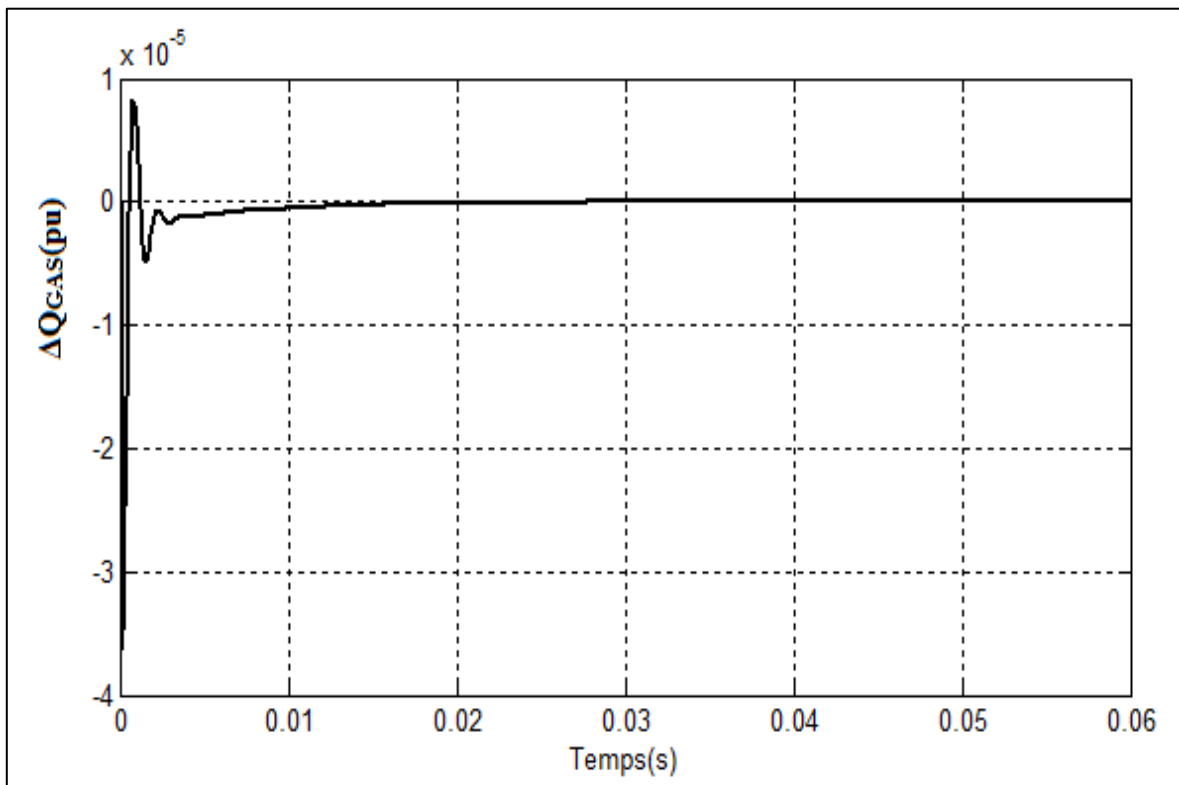


Fig. IV.11 : L'évolution de puissance réactive dans l'éolienne en réponse à la variation de la charge.

IV.4.2 Interprétation des résultats

Dans la Fig. IV.9 qui représente la déviation de la tension au jeu de barre principale durant 0.06s, l'atténuation des transitoires est nettement meilleur en comparaison avec les précédentes expériences, l'état d'équilibre est atteint en seulement 0.026s, tandis que la déviation en amplitude maximale est de seulement 0.00069 pu, le compensateur STATCOM offre une bonne performance en terme de stabilisation de tension du système. On peut constater que la déviation disparaît presque totalement, dans le régime permanent.

La Fig. IV.10 et Fig. IV.11 représentent respectivement l'évolution des puissances réactives dans le générateur synchrone de Diesel, le compensateur STATCOM et le générateur asynchrone de l'éolienne.

La variation brusque de la charge se répercute sur toutes les parties du système en termes d'accroissement en puissance réactive. Avec le compensateur STATCOM, toute l'augmentation de la puissance réactive est purement prise en charge par celui-ci, un soulagement du générateur Diesel, et du régulateur de tension est accompli.

Les résultats obtenus, sont similaires aux résultats, du travail plus détaillé dans l'article scientifique [31].

IV.5 Comparaison des performances de stabilisation

La Fig. IV.12 représente la déviation de la tension au jeu de barre principal, dans les deux cas de compensation pour une variation de la puissance réactive de la charge de 1% : Avec SVC et STATOM.

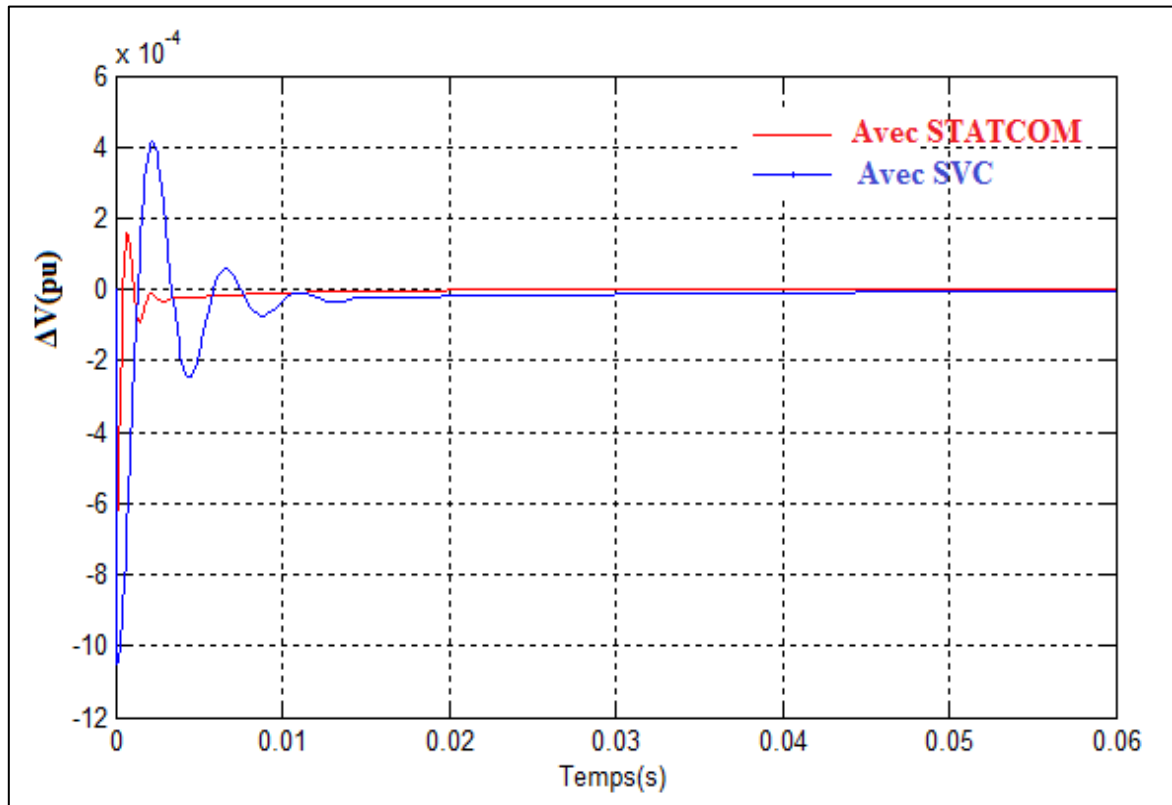


Fig. VI.12 : Courbes de déviations de la tension avec les compensateurs SVC et STATCOM.

Le compensateur STATCOM offre une meilleure performance par rapport au compensateur SVC en termes de stabilisation de tension du système, une rapidité accrue de temps de réponse et une stabilisation plus efficace.

Les transitoires de la tension au jeu de barre principal, atteignent des pics d'amplitude élevées avec le SVC et s'atténuent lentement en comparaison avec le STATCOM.

Avec le SVC, une légère déviation de la tension persiste toujours dans le régime permanent, tandis que la compensation avec STATCOM annule presque, toute la déviation et en un temps plus rapide.

IV.6 Simulation de système hybride autonome diesel employant un GAS /GAS AP

En utilisant les données du tableau A.4 dans l'annexe, la gestion de la puissance réactive et le contrôle de la tension est simulée dans l'environnement SIMULINK/MATLAB selon le schéma bloc de la Fig.13.

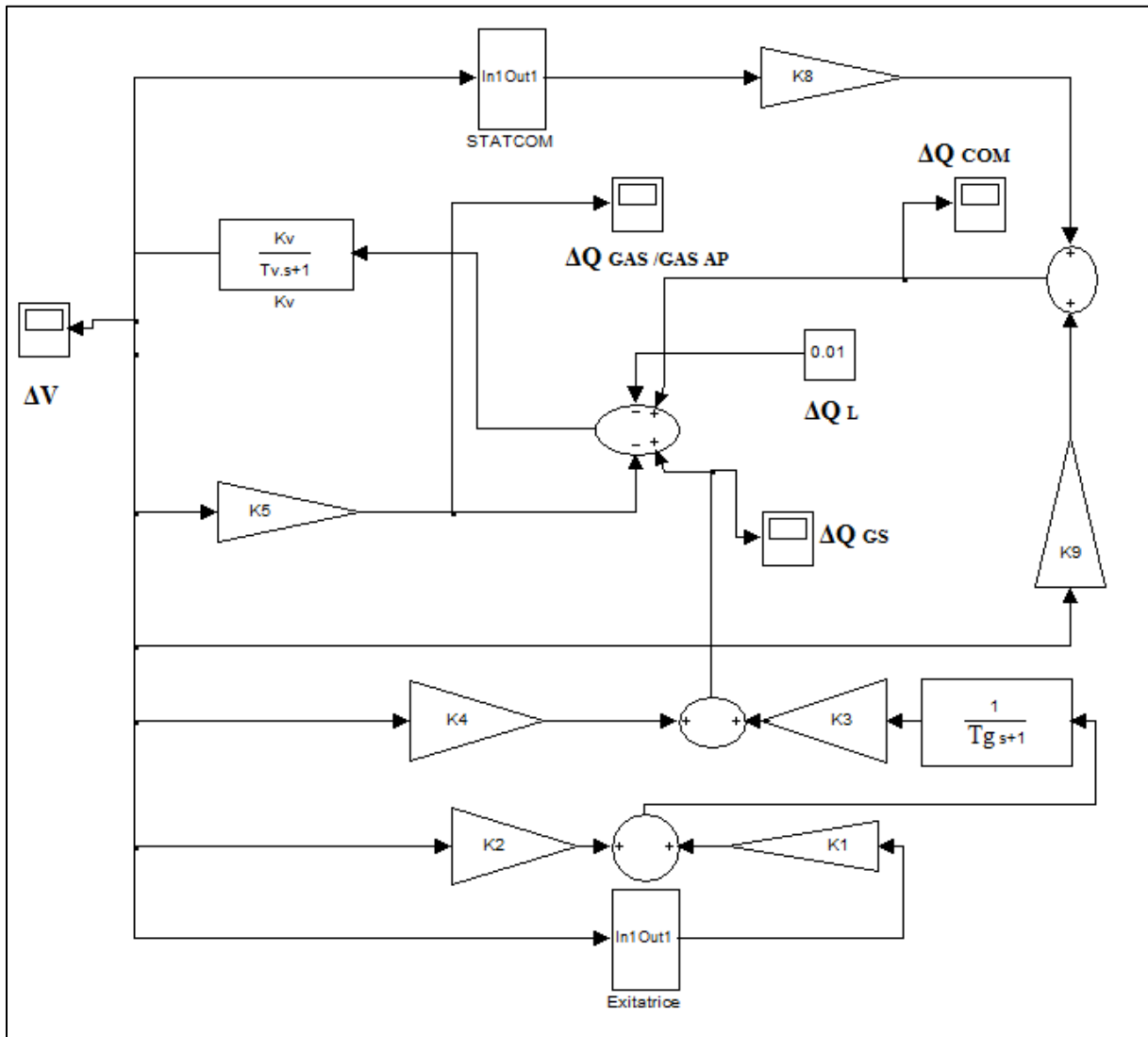


Fig. IV.13 : Schéma bloc du système utilisant le GAS/ GAS AP.

IV.6.1 Résultats de simulation

La Fig. IV.14, représente la déviation de la tension au jeu de barre principal du système, pour les deux cas : utilisation d'un générateur asynchrone à cage d'écureuil, et le

générateur asynchrone à aimant permanent, les signaux sont analysés durant 0.01 s pour une variation de puissance réactive de la charge $\Delta Q_L=0.01$ pu.

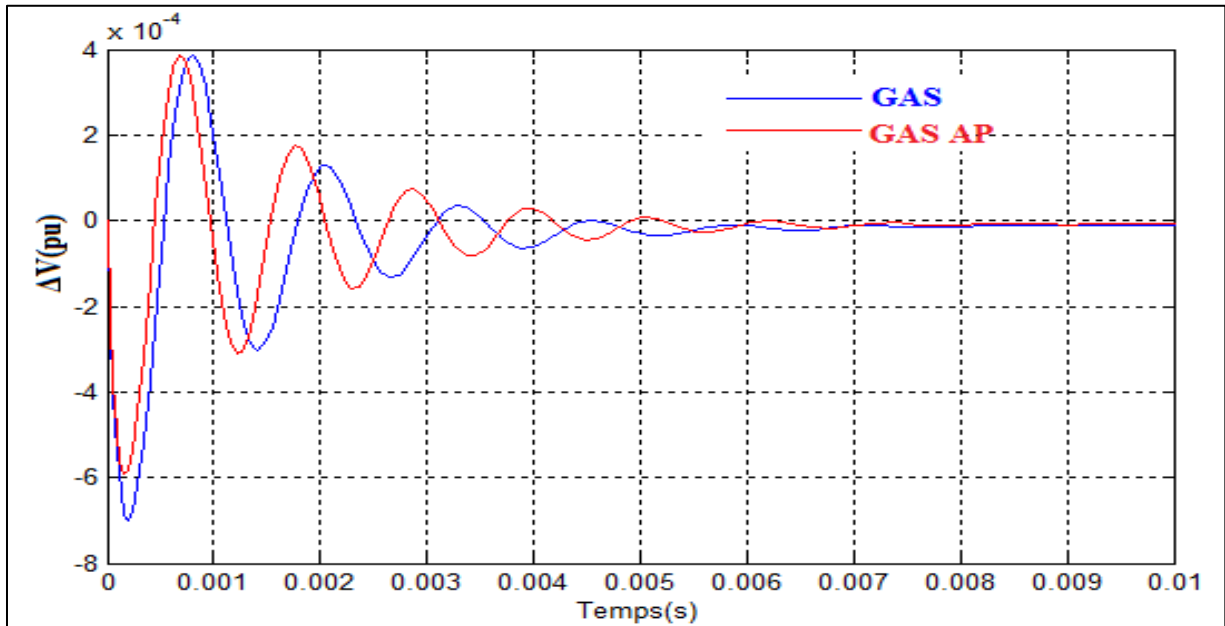


Fig. IV.14: Déviation de la tension au jeu de barre principal.

La Fig. III.15, Fig. III.16 et Fig. III.17 représentent respectivement pour les deux cas du système utilisant le GAS et le GAS AP, l'évolution de la puissance réactive dans : le générateur synchrone du Diesel, le compensateur STATOM et le générateur asynchrone à cage d'écureuil/à aimant permanent.

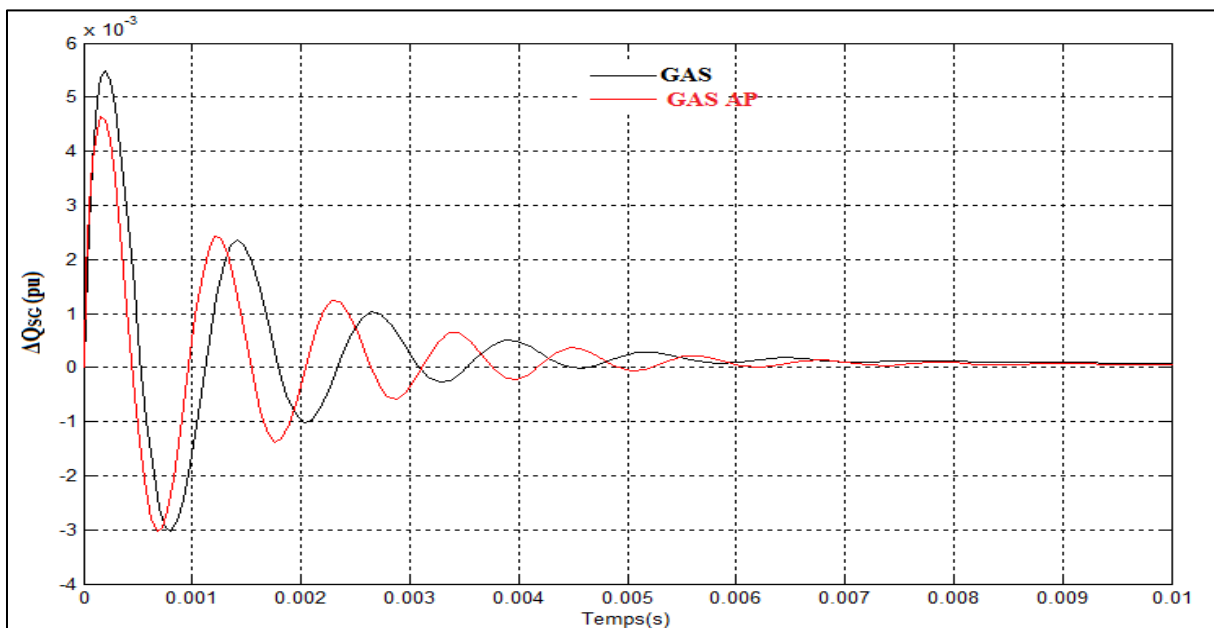
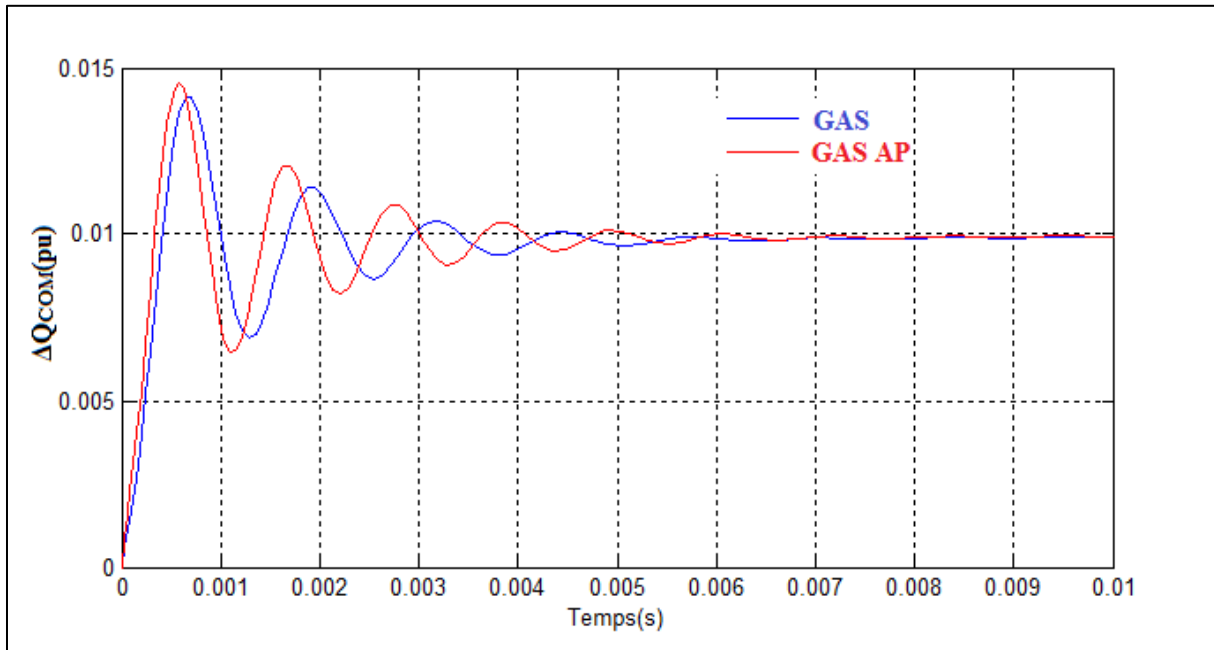
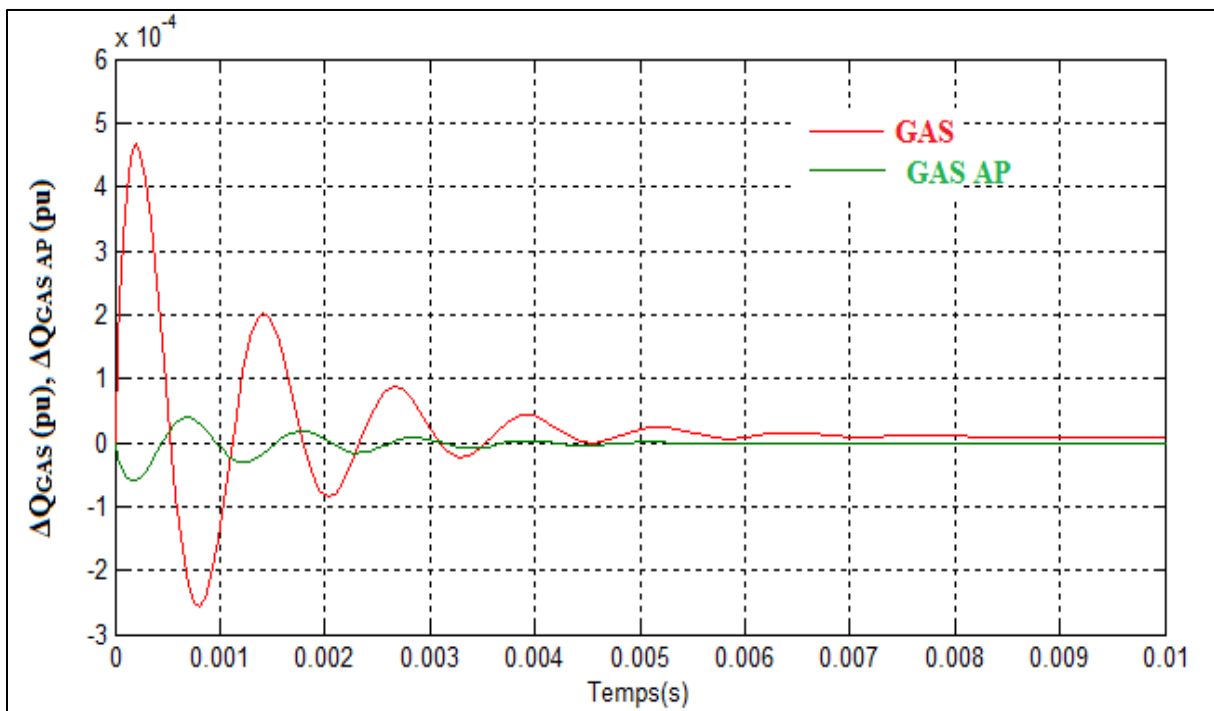


Fig. IV.15: Evolution de la puissance réactive dans le générateur synchrone du Diesel.**Fig. IV.16:** Evolution de la puissance réactive dans le compensateur STATCOM.**Fig.IV.17:** Evolution de la puissance réactive dans le GAS ET GAS AP.

IV.6.3 Interprétation des résultats

Dans la Fig. IV.14, la déviation de la tension pour une variation de 1%, de la puissance réactive de la charge est analysée durant 0.01s. On observe que le premier pic et les

sous transitoires s'atténuent plus rapidement pour le cas d'utilisation d'un générateur asynchrone à aimant permanent. Le pic maximal est plus grand dans le cas de GAS, il est près de $8.019 \cdot 10^{-4}$ pu tandis que pour le cas d'utilisation de GAS AP, il est de $6.753 \cdot 10^{-4}$ pu.

L'état d'équilibre est atteint après 0.01s pour les deux cas, grâce à l'action du compensateur STATCOM. Une déviation de tension de $-1.019 \cdot 10^{-5}$ pu persiste dans le régime dans le cas de GAS. La déviation de tension au jeu de barre dans le régime permanent est moins importante pour le cas de GAS AP, elle est seulement de $-7.246 \cdot 10^{-6}$ pu.

L'évolution de la puissance réactive après une variation de la puissance réactive de la charge pour : le générateur synchrone de diesel, le compensateur STATCOM et le GAS/GAS AP sont représentées respectivement dans les Fig. IV.15, Fig. IV.16 et Fig. IV.17.

La variation brusque de la puissance réactive de la charge, se répercute sur tous les composants du système par un accroissement de leurs puissances réactives.

Le générateur synchrone est beaucoup plus sollicité, dans le cas d'utilisation d'un GAS, la réponse est sensiblement élevée par rapport au cas d'utilisation d'un GAS AP. Par contre l'état d'équilibre est atteint plus rapidement, avec un GAS.

Dans les deux cas, le STATCOM fournit toute la variation de puissance, mais il est moins sollicité pour le cas d'utilisation d'un GAS AP.

La variation de la puissance réactive dans le GAS AP est beaucoup moins importante par rapport au GAS, les aimants permanents du rotor de GAS AP sont moins sensibles à la variation de la tension.

Les différents résultats obtenus, sont similaires aux résultats, du travail plus détaillé dans l'article scientifique [32].

IV.6 Conclusion

La simulation et l'acquisition des différentes données du réseau hybride autonome Diesel-Eolien, avec un générateur synchrone pour le moteur Diesel et un générateur asynchrone pour le système de conversion aérodynamique (éolienne) sans compensation de puissance réactive, nous a permis à travers l'analyse de signaux de la déviation de la tension et l'évolution de puissances réactive des parties du système, de saisir tout l'intérêt qu'occupe

le sujet de l'instabilité de tension dans de tels systèmes et la pertinence d'un contrôle adéquat de la tension par la compensation de la puissance réactive.

Cependant, les dispositifs FACTS ; SVC et STATCOM sont considérés comme des compensateurs de puissance réactive exigée par le système.

Les méthodes de contrôle de tension proposées ont apporté des changements significatifs sur le comportement dynamique du système.

Le compensateur STACOM est plus avantageux que le SVC, en termes de rapidité de stabilisation et de qualité du signal de tension dans le régime permanent.

En employant le générateur asynchrone à aimant permanent pour la production éolienne, la puissance réactive consommée est sensiblement réduite, lors de la conversion d'énergie dans l'ensemble éolienne-générateur asynchrone, le système gagne de meilleures performances en termes de stabilité de tension.

Conclusion générale

Le présent mémoire de fin d'études, nous a permis d'aborder la stabilité de la tension dans un réseau hybride autonome Diesel-Eolien. Le système étudié met en œuvre un ensemble d'équipements, très différents, destinés à cohabiter dans une structure de cogénération alimentant une charge isolée. Pour mieux cerner la nature des interactions entre les différents sous-ensembles de ce système, une approche d'étude de la dynamique de chaque sous système a été adoptée.

Les concepts théoriques généraux relatifs à la stabilité de la tension dans les réseaux électriques ont été abordés dans le chapitre I. On a constaté que la gestion de la puissance réactive du réseau joue un rôle important dans le maintien de la stabilité de tension.

Dans le chapitre I, on a donné un aperçu sur le fonctionnement de système hybride et son contexte socioéconomique. Ce dernier est marqué par les constats des détériorations environnementales engendrées par l'exploitation sans cesse croissante des énergies fossiles. Par ailleurs, les difficultés d'acheminement du carburant servant à alimenter les groupes diesel, moyen classique de production d'énergie en zones isolées, montre bien la nécessité de disposer d'une source d'énergie renouvelable.

Au travers d'une étude dynamique en petites variations, les équations dynamiques mécaniques, électromécaniques et électriques ont été présentées dans le chapitre II, ceci nous a permis de mettre en relation la stabilité de la tension sur le réseau et la gestion de la puissance réactive.

Enfin, dans les chapitres III et VI, l'analyse et la simulation en petits signaux de contrôle de la tension nous ont permis de mettre en évidence l'importance de la compensation de la puissance réactive et l'intérêt de l'utilisation des deux dispositifs FACTS : SVC et STATCOM, d'autre part la comparaison entre les performances des deux dispositifs, nous a permis de conclure que la compensation de la puissance réactive du système par le SATCOM est plus avantageuse. Entre autre, la comparaison des performances du système hybride Diesel-Eolienne utilisant deux types différents de générateurs asynchrones (GAS et GAS AP) dans la production éolienne, nous montre bien que l'utilisation du générateur asynchrone à aimant permanent améliore sensiblement, la stabilité de tension du système.

Références bibliographiques

- [1]. Y. Gong, "Development of an Improved On-Line Voltage Stability Index Using Synchronized Phasor Measurement." PHD thesis, Mississippi State University, Mississippi, USA, December 2005.
- [2]. A. Laifa, "Evaluation de la Stabilité de Tension d'un Réseau d'énergie électrique Développement et Application Des Indices De Stabilité", thèse de Magister, Ecole Nationale polytechnique, 27 juin 1995.
- [3]. A. Kazemi, and B. Badrzadeh, " Modeling and Simulation of SVC and TCSC to Study their Limits on Maximum Loadability Point," *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 26, pp.619-626, Apr. 2004.
- [4]. P.A. Lof et al. "Voltage Stability Indices for Stressed Power Systems." *IEEE Trans. PS*, Vol.8 No.1, pp.326-335, February 1993.
- [5]. B. Ha Lee and K. Y. Lee, "A Study on Voltage Collapse Mechanism in Electric Power System." *IEEE Trans. PS*, Vol.6 No.3, pp.966-974, August 1991.
- [6]. G. K. Morison et al. "Voltage stability Analysis using static and dynamic approaches", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 8, No. 3, pp.1159-1171, August 1993.
- [7]. T.G. Overbye et al. "Improved Techniques for Power System Voltage Stability Assessment Using Energy Methods", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol., No. 4, pp.1446-1452, November 1991.
- [8]. Bodapatti Nageswararao, B .E, "Fuzzy-Expert System for Voltage Stability Monitoring and Control", Master thesis, Faculty of Engineering and Applied Science Memorial University of Newfoundland, Canada, February, 1998.
- [9]. L.Benasla : « Compensation statique : Approche shunt et Approche série », mémoire de magister, Département d'électrotechnique, USTO, juillet 1999.
- [10]. Jacques .C, Guillaume de Preville, Jean-Louis Sanhet : « Fluctuations de tension et flicker - Évaluation et atténuation (partie I et II) » *Techniques de l'ingénieur D 4315*.
- [11]. Philippe Ferracci : « La Qualité de l'énergie électrique » *Cahier Technique n° 199*.
- [12]. Philipe Sarrand et Jean Verseille : « Compensation de l'énergie réactive et tenue de

tension dans les réseaux publics », Technique de l'ingénieur, D 4305, pp-1-10.

[13]. Michel Mathey : « Les systèmes de réglage des turbines à vapeur de grandes puissances Alstom », Revue générale d'électricité, 12/85, pp.949-959, December 1995.

[14]. K.R.Padiyar : « Investigation on strong resonance in multimachine power systems with STATCOM supplementary modulation controller », IEEE, transaction on power systems, vol.21, N°2, May 2006.

[15]. Sebastian, R., et J. Quesada. 2006. « Distributed control system for frequency control in a isolated wind system ». Renewable Energy, vol. 31, no3, p. 285-305.

[16]. Wind-Diesel Systems Architecture Guidebook. American Wind Energy Association; 1991.

[17]. M. Rezkallah, “Amélioration de la qualité d'énergie fournie au réseau autonome hybride Eolien- Diesel”, Maîtrise en Génie Électrique, École de Technologie Supérieure, Montréal, Soutenu le 3 Mai 2010.

[18]. R. Hunter and G. Elliot, Wind-Diesel Systems, a Guide to the Technology and Its Implementation. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press,1994.

[19]. R. C. Bansal, T. S. Bhatti, and D. P. Kothari, “A bibliographical survey on induction generators for application of non-conventional energy systems,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 18, no. 3, pp. 433–439, Sep. 2003.

[20]. I. J. Nagrath and D. P. Kothari, Electrical Machines, 2nd ed. New Delhi, India: Tata McGraw-Hill, 1997.

[21]. F. Baghdadi, “ Modélisation et Simulation des Performances d'une Installation Hybride de conversion d'Energies Renouvelables ”, Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2011.

[22]. Simoes MG, Farret FA. Renewable energy systems: design and analysis with induction generators. CRC Press; 2004.

[23]. T. Andy Theubou Tameghe, “Modélisation et simulation d'un système de jumelage Eolien-Diesel alimentant une charge locale”, Maîtrise en Ingénierie, Université du Québec en Abitibi-Temiscamingue, AOÛT2012.

- [24]. Donald E. Kirk, "Optimal Control Theory: An Introduction", Dover Publications, 2004.
- [25]. O. I. Elgerd, Electric Energy System Theory An Introduction. New Delhi, India: Tata McGraw-Hill, 1982, pp. 299–361.
- [26]. R. C. Bansal, "Modelling and automatic reactive power control of isolated wind-diesel hybrid system using ANN", Energy Conversion and Management, Vol. 49, 2008, pp. 357-364.
- [27]. IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, "Load representation for dynamic performance analysis," IEEE transaction on Power Systems, vol. 8, pp. 472-482, 1993.
- [28]. T. W. Mon and M. M. Aung, "Simulation of synchronous machine in stability study for power system," World Academy of Science, Engineering and Technology, vol. 39, 2008.
- [29]. K. R. Padiyar, Power Systems Dynamics, Stability and Control. Banga-lore, India: Interline Publishing, 1996.
- [30]. R. C. Bansal, "Automatic reactive power control of autonomous hybrid power systems," Ph.D. dissertation, Centre Energy Studies, Indian Inst. Technol., New Delhi, India, Dec. 2002.
- [31]. B. Kouadri, Y. Tahir, "Power Flow and Transient Stability Modeling of a 12-Pulse Statcom," Journal of Cybernetic and Informatics, vol. 7, 2008, pp. 9-25.
- [32]. R. C. Bansal, "Automatic Reactive-Power Control of Isolated Wind–Diesel Hybrid Power Systems", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 53, NO. 4, AUGUST 2006.
- [33]. Pawan Sharma, T. S. Bhatti, K. S. S. Ramakrishna, "Control of Reactive Power of Autonomous Wind-Diesel Hybrid Power Systems", IEEE, 2010.
- [34]. Pawan Sharma, Waldemar Sulkowski, Bjarte Hoff, "Dynamic stability study of an isolated wind-diesel hybrid power system with wind power generation using IG, PMIG and PMSG: A comparison", Elsevier, 2013.

Annexe

Tableau A.1 : Paramètres du système Diesel-Eolienne sans compensateur de puissance réactive [32].

<i>Paramètres du système</i>	<i>Système Diesel-Eolienne</i>
<i>Charge du système/ Puissance</i>	
Puissance de l'Eolienne (KW)	150
Puissance de Diesel (KW)	150
Puissance de la charge (KW)	250
<i>Puissance apparente de la base (kVA)</i>	250
GS	
P_{GS} , pu KW	0.4
Q_{GS} , pu KVAR	0.2
E_q , pu	1.1136
δ , °	21.05
E'_q , pu	0.9603
V, pu	1.0
X_d , pu	1.0
X'_d , pu	0.15
T'_{d0} , s	5.0

GAS	
P_{GAS} , pu KW	0.6
Q_{GAS} , pu KVAR	0.189
P_{in} , pu KW	0.75
η_{GAS} , %	80
$r_1 = r_2$, pu	0.19
$x_1 = X_2$, pu	0.56
S, %	-4.1
La charge	
P_L , pu kW	1.0
Q_L , pu kVAR	0.75
Facteur de puissance	0.8
Données de puissance réactive	
$Q_{SVC} = Q_L + Q_{GAS} - Q_{GS}$, pu kVAR	0.739
Q_C , pu kVAR	0.85
α , radians	2.443985

<i>Système d'excitation IEEE Type-I</i>	
K_A	40
T_A, s	0.05
K_F	0.5
T_F, s	0.715
K_E	1.0
S_F, s	0.0
T_E, s	0.55
Contantes	
K_1	0.15
K_2	0.793232
K_3	6.22143
K_4	-7.258895
K_5	0.126043
K_V	0.6667
T_V	0.000106 s

Tableau A.2 : Données du compensateur SVC [32].

<i>Données du SVC</i>	
T_{α} , s	0.005 s
T_d , s	0.001667 s
Contantes	
K_6	5.152869
K_7	-3.8347
K_I	22500
K_P	550

Tableau A.3: Données de STATCOM [33].

<i>Données du STATCOM</i>	
T_{α} , s	0.2 ms
T_d , s	1.67 ms
Contantes	
K_6	5.152869
K_7	-3.8347
K_I	5000
K_P	31

Tableau A.4: Paramètres du système considéré pour la comparaison des GAS et GAS AP [34].

<i>Capacité de production Eolienne (kW)</i>	<i>Eolienne</i>	<i>Diesel</i>	<i>Total</i>
<i>Puissance (kW)</i>	1500	1500	3000
<i>Charge (kW)</i>	1500	1000	2500
<i>Puissance apparente de base (kVA)</i>	2500 kVA		
<i>Tension de base (V)</i>	400 V		
<i>Paramètres du système</i>	GS	GAS	GAS AP
P_{PD} , pu KW	0.4	-	-
Q_{PD} , pu KVAR	0.2	-	-
E_q , pu	1.1136	-	-
δ , °	21.05	-	-
E'_q , pu	0.9603	-	-
V, pu	1.0	-	-
X_d , pu	1.0	-	-

X'_d , pu	0.15	-	-
T'_{d0} , s	5.0	-	-
P_{PE} , pu KW	-	0.6	0.6
Q_{PE} , pu KVAR	-	-0.2906	0
η_{GAS} , %	-	90	90
$r_1 = r_2$, pu	-	0.19	0.19
$x_1 = X_2$, pu	-	0.56	0.56
S, %	-	4.0	4.0
<i>Système d'excitation IEEE Type-I</i>			
K_A	40		
T_A , s	0.05		
K_F	0.5		
T_F , s	0.715		
K_E	1.0		
S_F , s	0.0		
T_E , s	0.55		
Données du compensateur STATCOM.			

T_{α} , s	0.25 ms	
T_d , s	1.67 ms	
K_6	5.152869	
K_7	-3.8347	
K_I	5000	
K_P	31	
Contantes	GAS	GAS AP
K_1	0.15	0.15
K_2	0.793277	0.793277
K_3	6.22178	6.22178
K_4	-7.8249	-7.8249
K_5	0.1016	-0.666
K_6	0.09747	3.36
K_7	3.8347	-2.5
K_V	0.6667	0.6667
T_V	7.34e-4	7.34e-4
K_I	7090.9	47.3

K_p	44.64	7120.4
-------	-------	--------