

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane MIRA – Bejaïa



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique
Option : Réseaux Electriques

Mémoire de Fin d'Etude

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique

Thème

**Coordination STATCOM/AVR pour la stabilité de la tension
d'un réseau électrique hybride autonome Diesel-Eolien**

Réalisé par :

M^r. YOUNI Douadi

M^r. ABDELLI Nabil

Encadré par :

M^r. M. Boutebel

Soutenu le :/...../.....

ANNEE UNIVERSITAIRE 2017-2018



Remerciement

Avant tout nous tenons à remercier nos familles qui nous ont toujours encouragés et soutenus durant toutes nos études.

Nous adressons notre reconnaissance à Mr M. Boutebel d'avoir acceptée de nous guidé dans ce travail. Nous tenons à les remercier sincèrement pour leur disponibilité, leur gentillesse, et leur patience. Grâce à lui ce mémoire a pu être mené et réalisé dans d'excellentes conditions.

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.

Notre sincère gratitude va vers tous ceux qui ont participés de près ou de loin à ce travail.



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus difficile de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et ma soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis.

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

Mes très chères sœurs Assia, Amina, Aïda et Yasmine ainsi que ma copine Dahbia.

Toute la famille YOUBI sans exception.

Tous mes ami(e)s et toute la promotion 2017/2018, Electrotechnique.

Mr. YOUBI



Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

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

*A mon cher frère Hamza, et mes deux chères
sœurs Souhila et Kaïssa ;*

*A la mémoire de mon cher grand père ainsi
que mon ami Rabeï « victime du crash d'avion
militaire à Boufarik »*

*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.*

ABDELLI Nabíl

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.

E_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_{m_0} : 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_{L_0} : 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.é.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'axe 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'_{D_0} : 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_{com} : La puissance réactive de compensation.

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 rotorique de la machine synchrone.

Abréviations

AC: Alternating Current.

AVR: Automatic Voltage Regulator.

CIGRE: Conseil International des Grands Réseaux Electriques.

DG : générateur diesel.

DC: Direct Current.

FACTS: Flexible ac Transmission Systems.

GAS: Générateur asynchrone.

GAS AP: Générateur asynchrone à aimant permanent.

GS: Générateur synchrone.

HVDC: High Voltage Direct Current

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

PSS: Power System Stabilizer.

SEH: Système D'énergie Hybride.

STATCOM: Static Synchronous Compensator.

UCTE: Union for the Coordination of Transmission of Electricity.

WECS: Wind Energy Conversion System.

WTG: Wind Turbine Generator.

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Réseau électrique a deux nœuds6

Figure I.2 : Générateur diesel 14

Figure I.3 : Principaux composants d'un système de conversion d'énergie éolienne (WECS) haute puissance a vitesse variable 15

Figure I.4 : Système hybride éolien-diesel 17

Chapitre II

Figure II.1 : Schéma de base considéré pour la modélisation 19

Figure II.2 : Configuration du générateur diesel 20

Figure II.3 : Type de conduit d'une turbine éolienne 21

Figure II.4 : Modèle sans amortisseur de générateur synchrone dans le repère dq 25

Figure II.5 : Système d'excitation IEEE type-I 26

Figure II.6 : Schéma équivalent de générateur asynchrone en régime permanent 27

Figure II.7 : Circuit équivalent approximatif de générateur asynchrone a aimant permanent... 29

Figure II.8 : Structure bloc de contrôle de la tension dans le système hybride Diesel-Eolien... 30

Chapitre III

Figure III.1 : Schéma unifilaire de réseau hybride Eolien-Diesel avec compensateur STATCOM 33

Figure III.2 : (a) Topologie STATCOM, (b) STATCOM connecté à une ligne transmission... 34

Figure III.3 : Schéma de principe de STATCOM 35

Figure III.4 : Schéma équivalent du STATCOM 35

Figure III.5 : Diagramme du système construit avec des fonctions du transfert 36

Figure III.6 : Un système d'alimentation hybride éolien-diesel autonome, équipé d'un excitateur et d'un AVR	37
Figure III.7 : Représentation schématique d'un régulateur de tension automatique (AVR)	38
Figure III.8 : Schéma en fonctions de transfert pour le contrôle de la puissance réactive d'un réseau hybride diesel-éolienne	39
Figure III.9 : Schéma unifilaire de réseau hybride Eolien-Diesel en employant le GAS / GAS AP AVEC compensateur STATCOM	41
 Chapitre IV	
Figure IV.1 : Schéma bloc du système diesel-éolien sans compensation de puissance réactive	44
Figure IV.2 : déviation de la tension au jeu de barre pour différentes variation de la charge réactive	45
Figure IV.3 : La réponse en puissance réactive du générateur synchrone du diesel en réponse aux différentes variations de la charge	45
Figure IV.4 : Schéma bloc du système d'excitation IEEE type 1, avec contrôleur PI	46
Figure IV.5 : déviation de la tension au jeu de barre sans et avec le contrôleur PI	47
Figure IV.6 : la réponse en puissance réactive du générateur synchrone du diesel en réponse avec et sans contrôleur PI	47
Figure IV.7 : Schéma bloc du système Diesel-Eolienne avec le compensateur STATCOM.....	49
Figure IV.8 : La déviation de tension au jeu de barre en réponse à une variation de la puissance réactive de la charge (avec compensation par STATCOM)	48
Figure IV.9 : L'évolution de la puissance réactive du Diesel et de compensateur STATCOM en réponse à la variation de la charge	50
Figure IV.10 : L'évolution de la puissance réactive dans l'éolienne en réponse à la variation de la charge	50
Figure IV.11 : Réponses dynamiques du système éolien-diesel pour une augmentation par paliers de 1% de la puissance réactive en charge	53

Figure IV.12 : Type de variation aléatoire par paliers de la puissance réactive de la charge et la puissance de vent d'entrée	54
Figure IV.13 : Réponses dynamiques du système éolien-diesel pour un changement d'étape aléatoire $\Delta Q_L = \Delta P_{TW}$	56
Figure IV.14 : Type de variation aléatoire par paliers de la puissance réactive de la charge et la puissance de l'éolienne	56
Figure IV.15 : Réponses dynamiques du système éolien-diesel pour un changement d'étape aléatoire $\Delta P_{TW} = 0$	58

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I: Tableau de l'effondrement de la tension à travers le monde.....8

Chapitre IV

Tableau II : Infos par paliers pour les réponses transitoires, avec le STATCOM.....51

Tableau III : Infos par paliers pour les réponses transitoires avec GAS et GAS AP. Pour $\Delta Q_L = 0.01 pu, \Delta P_{IW} = cst$ 59

Tableau IV : Infos par étape pour les réponses transitoires avec GAS et GAS AP. Pour $\Delta Q_L = variable, \Delta P_{IW} = variable$ 60

Annexes

Tableau A.1 : Paramètres du système Diesel-Eolienne sans compensateur de puissance réactive.....64

Tableau A.2: Données de STATCOM.....65

Tableau A.3: Paramètres du système considéré pour la comparaison des GAS et GAS AP...66

Table des matières

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

Chapitre I

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

I.1 Introduction.	3
I.2 Stabilité de la tension.	3
I.2.1 Définition.	3
I.2.1.1 Stabilité de la tension de perturbation élevée.	4
I.2.1.2 Stabilité de la tension de perturbation faible.	4
I.2.1.3 La stabilité de la tension à court terme.	4
I.2.1.4 stabilité de la tension à long terme.	4
I.2.2 Causes d'instabilité de tension.	5
I.2.2.1 Manque local d'énergie réactive.	6
I.2.2.2 Charge appelée trop importante.	7
I.2.3 Effondrement de tension dans le monde.	7
I.2.4 Analyse la stabilité de la tension.	9
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.	10
I.2.5.1 Compensation traditionnelle.	10
I.2.5.1.1 Compensation synchrones.	10
I.2.5.1.2 Batteries de condensateurs.	10
I.2.5.1.3 Les inductances.	11
I.2.5.1.4 Les PSS (Power Système Stabiliser).	11
I.2.5.2 Les compensateurs FACTS.	11
I.3 Systèmes hybride autonomes Diesel-Eolien.	12
I.3.1 Introduction.	12

I.3.2	Présentation de système hybride autonome Diesel-Eolien.	12
I.3.2.1	Modes de fonctionnement des réseaux hybrides autonome Diesel-Eolien. ...	13
I.3.3	Principaux élément d'un réseau électrique hybride autonome Diesel-Eolien.	13
I.3.3.1	Générateur diesel.	13
I.3.3.2	L'éolienne.	14
I.3.3.2.1	Classification des technologies éoliennes.	13
I.3.3.3	Les charge.	17
I.3.4	Principe de fonctionnement d'un système hybride éolien diesel.	17
I.3.5	Problème rencontrés.	18
I.4	Conclusion.	18

Chapitre II

Modélisation mathématique du système électrique hybride autonome Diesel-Eolien

II.1	Introduction.	19
II.2	Modalisation mathématique du système.	19
II.2.1	modélisation des éléments de système.	24
II.2.1.1	Modèle du générateur diesel.	24
II.2.1.1.1	Modèle réduit de la génératrice synchrone.	24
II.2.1.1.2	Le régulateur de tension.	26
II.2.1.2	Modèle de générateur asynchrone.	27
II.2.1.2.1	Cas de générateur asynchrone a aimant permanent.	29
II.3	Représentation globale du système de gestion de l'énergie réactive.	30
II.4	Conclusion.	31

Chapitre III

Contrôleurs STATCOM et AVR

III.1	Introduction.	32
III.2	Contrôle de puissance réactive par le compensateur STATCOM.	32
III.2.1	Description de la méthode.	32

III.3 Contrôle de puissance réactive par le régulateur AVR.	36
III.3.1 Description de la méthode.	36
III.4 Etude comparative du système employant un générateur asynchrone a cage d'écureuil et le générateur asynchrone a aiment permanent dans le système de conversion d'énergie aérodynamique.	40
III.4.1 Avantage du générateur asynchrone a aiment permanent.	40
III.4.2 Déroulement de la comparaison.	41
III.5 Conclusion	

Chapitre IV

Simulation des cas pratique

IV.1 Introduction.	44
IV.2 Simulation du système sans compensation.	44
IV.2.1 Résultats de simulation.	45
IV.2.2 Interprétation des résultats de simulation.	46
IV.3 Simulation du système sans compensation et avec le contrôleur PI.	46
IV.3.1 Résultats de simulation.	47
IV.3.2 Interprétation des résultats de simulation.	48
IV.4 Simulation du système avec le compensateur STATCOM.	48
IV.4.1 Résultats de simulation.	47
IV.4.2 Interprétation des résultats de simulation.	48
IV.5 Simulation de système hybride autonome diesel employant un GAS/GAS AP.	51
IV.5.1 Résultats de simulation.	52
IV.5.1.1 Premier cas $\Delta Q_L = 0.01 pu, \Delta P_{IW} = cst.$	52
IV.5.1.2 Deuxième cas $\Delta Q_L = \Delta P_{IW}.$	54
IV.5.1.3 Troisième cas $\Delta P_{IW} = 0.$	56
IV.5.2 Interprétation des résultats de simulation.	59
IV.6 Conclusion.	61
Conclusion générale.	62
Références bibliographiques.	64
Annexe.	68

Introduction générale

Un réseau électrique interconnecté fournit de l'électricité aux consommateurs. L'utilisation optimale de cette puissance disponible est un sujet d'étude d'aujourd'hui. En raison des contraintes liées à l'organisation d'une transmission supplémentaire, en raison des contraintes liées à l'aménagement de lignes de transport supplémentaires, à la croissance rapide de la charge et à des raisons environnementales, l'écart entre la demande et l'offre s'accroît.

Les sources d'énergie renouvelable et les sources d'énergie alternatives ont été largement introduites dans les systèmes électriques afin de réduire cet écart croissant entre la demande et l'offre. Les générateurs diesel sont la principale source d'énergie dans les régions éloignées. Ces sources d'énergie renouvelable en parallèle avec les groupes électrogènes diesel ont profité aux zones où l'approvisionnement du réseau n'est pas disponible. Ces systèmes sont appelés systèmes hybrides autonome. Ce mémoire examine et vérifie la meilleure performance des contrôleurs proposés dans un système hybride éolien-diesel autonome (IWDHP).

Dans un système hybride éolien-diesel autonome, le moteur diesel associé à un SG agit comme un réseau isolé. Les systèmes de conversion d'énergie éolienne (WECS) avec un générateur à induction (GAS) sont en parallèle pour répondre à la demande de charge de la zone isolée.

En raison de l'inadéquation entre la puissance réactive produite et la puissance réactive consommée, des fluctuations de tension se produiront aux bornes des génératrices dans le système diesel éolien autonome, cela entraîne une réduction de la stabilité et de la qualité de l'alimentation électrique. Dans un système autonome, la charge et le GAS nécessitent tous deux une puissance réactive. Dans des conditions variables, le décalage entre la puissance réactive produite et la puissance réactive consommée peut causer un surplus de puissance réactive qui peut entraîner des pointes de tension élevée dans le système. Cela pourrait endommager l'équipement connecté sur le réseau.

Pour éliminer le décalage entre la production et la consommation de puissance réactive, une source variable de puissance réactive comme le compensateur statique (STATCOM) et un régulateur automatique de tension (AVR) est nécessaire.

La structure du régulateur de tension de STATCOM et AVR est le régulateur intégré proportionnel (PI) avec une seule entrée. Le STATCOM utilise un convertisseur de source de tension (VSC) qui génère en interne une puissance réactive inductive/capacitive selon les

besoins. Un STATCOM de taille relativement petite est nécessaire lorsque GAS est utilisé avec WECS, pour fournir une puissance réactive variable dans un système hybride éolien-diesel autonome.

Alors 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

L'instabilité de tension et l'effondrement de tension ont été responsables de plusieurs pannes majeures à travers le monde: New York 1970, France 1978 et 1987, Noether Belgaum 1982, Tokyo 1987 et les pannes de réseau majeures de 2003 en Amérique du Nord et en Europe. La récursivité et la gravité de ces effondrements ont suscité d'importantes recherches sur le domaine de l'instabilité de la tension et de l'effondrement de la tension [1].

Le rôle d'un système hybride (éolien –photovoltaïque – diesel) de production d'électricité sans interruption dans les régions isolées n'est pas seulement d'apporter “ une puissance énergétique ”, mais un outil de développement social et économique des zones rurales. Le nombre de kilowattheures produit peut paraître insignifiant devant la capacité de production énergétique du pays, seulement ces quelques dizaines ou centaines de kilowattheures peuvent ranimer tout l'espoir d'un village ou d'une communauté [2].

Le raccordement des éoliennes au réseau électrique s'accompagne de plusieurs perturbations au niveau du point de raccordement qui sont dues principalement aux défauts suivants: les creux et les chutes de tension, le Flicker, et les harmoniques.

I.2 Stabilité de la tension

I.2.1 Définition [3]

La stabilité de tension est définie comme la capacité d'un système d'alimentation à maintenir des tensions constantes sur tous les bus du système après avoir été soumis à une perturbation à partir d'une condition de fonctionnement initiale donnée. Cela dépend de la capacité à maintenir / rétablir l'équilibre entre la demande de charge et l'alimentation de charge du système électrique. L'instabilité qui peut en résulter apparaît sous la forme d'une chute progressive ou d'une augmentation des tensions de certains bus. Un résultat possible de l'instabilité de tension est la perte de charge dans une zone, ou le déclenchement des lignes de transmission et les autres éléments par leur protection conduisant à des pannes qui à leur tour peuvent conduire à la perte de synchronisme de certains générateurs.

IEEE et CIGRE ont classé la stabilité de la tension en quatre catégories: stabilité de la tension de perturbation élevée, stabilité de la tension de perturbation faible, stabilité de la tension à court terme et stabilité de la tension à long terme.

I.2.1.1 Stabilité de la tension de perturbation élevée

Fais référence à la capacité du système à maintenir des tensions constantes à la suite de perturbations importantes telles que des défaillances du système, une perte de production ou des contingences de circuit. Cette capacité est déterminée par les caractéristiques du système et de la charge, ainsi que par les interactions des contrôles et des protections continues et discrètes.

I.2.1.2 Stabilité de la tension de perturbation faible

Se réfèrent à la capacité du système à maintenir des tensions stables lorsqu'elles sont soumises à de petites perturbations telles que des changements progressifs de la charge du système. Cette forme de stabilité est influencée par les caractéristiques des charges, des commandes continues et des commandes discrètes à un instant donné.

I.2.1.3 La stabilité de la tension à court terme

Implique la dynamique des composants de charge à action rapide tels que les moteurs à induction, les charges à commande électronique et les convertisseurs HVDC. La période d'étude d'intérêt est de l'ordre de plusieurs secondes, et l'analyse nécessite la résolution d'équations différentielles du système appropriées.

I.2.1.4 Stabilité de la tension à long terme

Implique des équipements d'action plus lente tels que les charges thermostatiques et limiteurs de courant de générateur. La période d'étude peut s'étendre sur plusieurs minutes, et des simulations à long terme sont nécessaires pour l'analyse de la performance dynamique du système. L'instabilité est due à la perte de l'équilibre à long terme, le point de fonctionnement de l'état stationnaire post-perturbation étant une instabilité faible, ou un manque d'attraction vers l'équilibre post-perturbation stable.

Définition IEEE et CIGRE [4]

Des définitions pratiques ont été données par les groupes de travail IEEE et CIGRE.

L'instabilité de tension résulte de la tentative dynamique de la charge de rétablir la consommation d'énergie au-delà de la capacité du système de transport et de production combinée.

Suivons cette définition descriptive mot par mot:

- *Tension* : comme déjà indiqué, le phénomène se manifeste par des chutes de tension importantes et incontrôlables sur un certain nombre de bus de réseau. Ainsi, la «tension» du terme a été universellement acceptée pour sa description.
- *Instabilité* : après avoir franchi la limite de puissance maximale livrable, le mécanisme de restauration de la puissance de charge devient instable, réduisant au lieu d'augmenter la puissance consommée. Ce mécanisme est le cœur de l'instabilité de la tension.
- *Dynamique* : tout problème de stabilité implique une dynamique. Ceux-ci peuvent être modélisés soit avec des équations différentielles (dynamiques continues), soit avec des équations différentielles (dynamiques discrètes).
- *Les charges*: sont la force motrice de l'instabilité de la tension, et pour cette raison ce phénomène a également été appelé instabilité de la charge. Notez, cependant, que les charges ne sont pas les seuls joueurs dans ce jeu.
- *Les systèmes de transmission* : ont une capacité limitée pour le transfert de puissance, comme cela est bien connu de la théorie des circuits. Cette limite (affectée également par le système de génération) marque le début de l'instabilité de la tension.
- *Production* : les générateurs ne sont pas des sources de tension idéales. Leur modélisation précise (y compris les contrôleurs) est importante pour évaluer correctement la stabilité de la tension.

1.2.2 Causes d'instabilité de tension

Les principales causes de l'instabilité de la tension sont une augmentation des charges électriques, et une énorme quantité de puissance réactive ainsi qu'un transport de puissance réel sur de longues lignes de transmission. Les instabilités de tension se produisent généralement dans les zones / bus faibles des réseaux électriques, en raison desquels la plupart du temps le système subit un effondrement de tension [5].

Une situation de panne provoquant une instabilité de tension se produit lorsque la dynamique de charge tente de rétablir la consommation d'énergie au-delà de la capacité du réseau de transmission et de la génération connectée

Un autre facteur contribuant à l'instabilité de la tension est la chute de tension qui se produit lorsque la puissance active et réactive passe à travers les réactances inductives d'un réseau de transmission, ceci limite les capacités du réseau de transmission, en termes de transfert de puissance et de support de tension, qui sont en outre limitées lorsque certains des générateurs atteignent leur limite de champ, ou de courant d'induit, de surcharge temporelle. Il convient de

noter que, dans presque tous les incidents d'instabilité de tension, un ou plusieurs générateurs cruciaux fonctionnaient avec une capacité réactive limitée [6].

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 la tension se produit généralement sur les systèmes d'alimentation qui sont lourdement chargés, en panne et / ou qui présentent une insuffisance de puissance réactive. L'effondrement de la tension est associé aux demandes de puissance réactive des charges qui ne sont pas satisfaites en raison des limitations sur la production et la transmission de la puissance réactive. Les limites sur la production de puissance réactive comprennent les limites de puissance réactive du générateur et de FACTS et la puissance réactive produite par les condensateurs [7]. La limite de production de la puissance réactive des générateur et due principalement aux contraintes thermiques exercées sur le bobinage rotorique et statorique.

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.

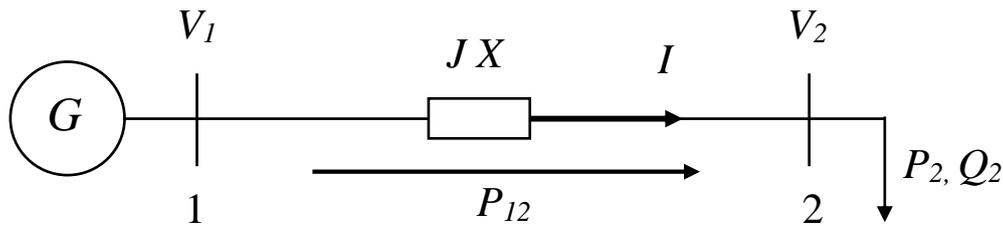


Fig.I.1 : Réseau électrique a deux nœuds.

$$\bar{S}_2 = P_2 + jQ_2 \quad (\text{I.1})$$

$$\bar{S}_2 = V_2 \left[\frac{V_1 + \cos \delta + jV_1 \sin \delta - V_2}{jX} \right]^*$$

$$\bar{S}_2 = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta + j \left[\frac{V_1 V_2 \cos \delta - V_2^2}{X} \right]$$

$$P_2 = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta = P_{max} \sin \delta \quad (I.2)$$

$$Q_2 = \frac{V_1 V_2 \cos \delta - V_2^2}{X} \quad (I.3)$$

De même pour le nœud 1

$$P_1 = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta = P_{max} \sin \delta \quad (I.4)$$

$$Q_1 = \frac{V_1 V_2 \cos \delta - V_2^2}{X} \quad (I.5)$$

Pour la puissance active au bus 2, l'équation (I.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 (I.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).

I.2.2.2 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 [8,9]. 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

Presque tous les grands réseaux électriques du monde ont connu des pannes majeures à un moment donné de l'histoire. Chaque fois qu'il y a une panne d'électricité, les affaires, l'industrie, le transport et la communication sont négativement affectés, et finalement la panne entraîne des conséquences sociales, économiques et même politiques importantes [10].

Le tableau I montre les indicateurs correspondant aux trois premiers indices mentionnés pour les 14 événements importants inclus dans l'analyse. Ces chiffres proviennent principalement des rapports d'enquête finaux publiés après chaque panne d'électricité [11].

Tableau I : tableau de l'effondrement de la tension dans le monde [11].

<i>Coupure électrique</i>	<i>Personnes sans service (N)</i>	<i>Charge perdue (MW)</i>	<i>Durée</i>
<i>Turquie 31 mars 2015</i>	70.000.000	32.200	Plus de 7 h
<i>Inde 31 juillet 2012</i>	670.000.000	48.000	2-8 h
<i>Arizona et Basse-Californie 8 septembre 2011</i>	8.100.000	7.835	6-12 h
<i>Brésil 4 février 2011</i>	40.000.000	8.884	Plus de 3 h
<i>Floride 26 février 2008</i>	3.000.000	3.650	1-3 h
<i>Colombie 26 avril 2007</i>	41.160.000	6.644	4.5 h
<i>UCTE 4 novembre 2006</i>	45.000.000	14.500	Moins de 2 h
<i>Pakistan 24 septembre 2006</i>	160.000.000	11.160	5-6 h
<i>Athènes 12 juillet 2004</i>	5.000.000	4.500	Jusqu'à 5 h
<i>Italie 28 septembre 2003</i>	57.000.000	24.000	5-9 h
<i>Danemark et Suède 23 septembre 2003</i>	4.000.000	6.550	5 h
<i>Londres 28 août 2003</i>	410.000	724	0.62 h
<i>Amérique du Nord 14 août 2003</i>	50.000.000	61.800	16-72 h aux États-Unis et jusqu'à 192 h au Canada
<i>Iran 31 mars 2003</i>	22.000.000	7.063	8h

D'après le tableau I, la panne d'électricité qui a affecté le plus grand nombre de personnes a eu lieu en Inde (2012), suivi par l'événement au Pakistan, puis de l'incident en Turquie. Deux de ces pannes ont eu lieu au cours des cinq dernières années et l'événement en Inde a touché

plus de 9% de la population mondiale en 2012. La panne d'électricité en Amérique du Nord (2003) est toujours la plus longue et la plus lourde, suivie des incidents en Inde et en Turquie, tandis que la panne de Londres (2003) reste l'événement le moins sérieux. La durée moyenne des pannes était d'environ cinq heures, à l'exclusion du long temps de restauration observé pour l'événement de l'Amérique du Nord.

I.2.4 Analyse la stabilité de la 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.

I.2.4.1 Analyse dynamique [12]

La simulation du domaine temporel avec des modèles appropriés pour les dispositifs clarifie ce phénomène plus précisément. Il montre les événements temporels et leur chronologie conduisant le système aux phases finales de l'effondrement de la tension. Le programme informatique résout les équations différentielles-algébriques décrivant le système d'alimentation. Il possède les caractéristiques de la modélisation des dynamiques importantes qui influent sur l'instabilité de la tension, telles que les modèles de charge dynamique, les limiteurs de système d'excitation et divers autres contrôleurs du système.

L'analyse dynamique est utile pour l'étude détaillée de situations d'effondrement de tension spécifiques et pour la coordination de la protection et de l'action dépendant du temps des contrôles. Ces dernières années, les capacités des programmes de simulation à moyen terme et à long terme ont été grandement améliorées. Une simulation dynamique complète prenant en compte les modèles de stabilité transitoire à ces fins semble prendre beaucoup de temps. Les nouveaux programmes utilisent généralement des techniques de simulation dynamique rapides, qui ont un bon compromis entre vitesse et précision.

I.2.4.2 Analyse statique [12]

De nombreux aspects des problèmes de stabilité de tension peuvent être analysés efficacement en utilisant des méthodes statiques. Ces méthodes examinent la viabilité du point d'équilibre représenté par une condition de fonctionnement spécifiée du système d'alimentation. Les approches statiques telles que l'analyse de sensibilité, l'analyse modale et les méthodes P-

V et Q-V pour l'évaluation de la stabilité de la tension utilisent une condition du système ou un instantané pour évaluer la stabilité de la tension. Ils résolvent généralement les équations de flux de puissance du réseau avec des incréments de charge spécifiques jusqu'à ce que le point d'effondrement de la tension soit atteint. Ces techniques permettent l'examen d'un large éventail de conditions du système et peuvent fournir beaucoup de perspicacité dans la nature de ce phénomène par le calcul des facteurs contributifs.

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

I.2.5.1.1 Compensation synchrones

Les compensateurs synchrones sont des moteurs synchrones tournant à vide, dont l'excitation est réglée pour fournir ou absorber la puissance réactive qui permet, par son transit en un point du réseau, d'ajuster la tension de ce point.

Avec les performances dynamiques qu'exige un haut niveau de sûreté du réseau, les compensateurs synchrones sont des moyens d'actions privilégiés. Très employés en France dans les années 1950 et 1960, les compensateurs ont été délaissés ensuite au profit des condensateurs qui sont devenus plus compétitifs par suite des progrès techniques.

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 charge. 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 fonction de base d'un stabilisateur de système d'alimentation est d'étendre les limites de stabilité en modulant l'excitation du générateur pour fournir un amortissement aux oscillations des rotors de machines synchrones l'un par rapport à l'autre. Ces oscillations préoccupantes surviennent typiquement dans la gamme de fréquence d'environ 0,2 à 2,5 Hz, et un amortissement insuffisant de ces oscillations peut limiter la capacité à transmettre de l'énergie. [13]

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 [14]

FACTS est l'acronyme de Flexible AC Transmission System (systèmes de transmission à courant alternatif) et fait référence à un groupe de ressources utilisé pour surmonter certaines limites de la capacité de transmission statique et dynamique des réseaux électriques.

L'IEEE définit FACTS comme «des systèmes de transmission de courant alternatif intégrant des contrôleurs statiques de puissance et d'autres contrôleurs statiques pour améliorer

la contrôlabilité et la capacité de transfert de puissance.» L'objectif principal de ces systèmes est de fournir au réseau une puissance réactive inductive ou capacitive. Qui est adapté à ses exigences particulières, tout en améliorant la qualité de la transmission et l'efficacité du système de transmission de puissance.

I.3 Systèmes hybride autonomes Diesel-Eolien

I.3.1 Introduction

En raison des coûts très élevés de l'installation et de l'entretien des lignes de transmission, les îles et les petits villages situés à l'écart des réseaux principaux ont souvent leur propre système d'alimentation électrique. Ces systèmes autonomes - qui n'ont pas besoin d'être raccordés à un réseau pour être opérationnels - d'alimentation à distance sont typiquement alimentés par des générateurs diesel conventionnels car ils ont une grande fiabilité, un faible coût et sont facilement déplorables. Cependant, au cours des dernières années, il y a eu une tendance vers les installations renouvelables pour des raisons économiques et environnementales [30].

Alors que le coût des sources d'énergie renouvelables diminue et que le prix du carburant diesel augmente et que l'offre diminue, les systèmes hybrides sont déjà une option attrayante car une seule génératrice peut consommer plus de dix fois son coût en carburant en une seule année [30].

Les configurations hybrides typiques sont le Diesel- Eolien, le PV-diesel, le Eolien-PV-diesel et si le terrain le permet; l'inclusion de l'hydroélectricité. Mais, seule l'énergie éolienne sera considérée dans ce mémoire, car elle est considérée comme la technologie la plus prometteuse [30].

I.3.2 Présentation de système hybride autonome Diesel-Eolien

Un système hybride éolien-diesel est un système autonome de production d'électricité utilisant une ou des éoliennes avec un ou plusieurs générateurs diesel pour obtenir une contribution maximale de la ressource intermittente à la puissance totale produite, tout en fournissant une énergie électrique continue de haute qualité [31].

L'objectif principal de ces systèmes est de réduire la consommation de carburant et de réduire ainsi les coûts d'exploitation du système et les impacts environnementaux. Ces économies de consommation de carburant sont maximales avec les systèmes éolien-diesel à

forte pénétration du vent, dans lesquels les générateurs diesel peuvent être arrêtés en cas de forte disponibilité du vent [32].

Un système est considéré comme un système à forte pénétration lorsque la quantité de vent produite à tout moment par rapport à la quantité totale d'énergie produite est supérieure à 100%. Si le système est conçu de telle sorte que les moteurs diesel doivent fonctionner à plein temps, l'hybride éolien-diesel est classé comme une pénétration de vent faible ou moyenne selon le rapport puissance de sortie éolienne / charge électrique primaire [32]

I.3.2.1 Modes de fonctionnement des réseaux hybrides autonomes Diesel-Eolien

Le système hybride autonome diesel-éolien, a trois modes de fonctionnement :

- *Eolien-Diesel* : Si l'énergie éolienne est inférieure à la demande de charge, le générateur synchrone est entraîné par le diesel et convertit la puissance de l'arbre diesel mécanique en énergie électrique pour compenser le manque d'approvisionnement [31].
- *Eolien seulement* : si le moteur diesel a été arrêté, c'est-à-dire si la demande de charge peut être entièrement satisfaite par l'éolienne, le générateur est désaccouplé du moteur diesel au moyen d'un embrayage et fonctionne comme un déphaseur synchrone [31].
- *Diesel seulement* : Dans ce cas, la puissance maximale du générateur de turbine éolienne (WTG) est toujours nettement inférieure à la charge du système, les générateurs diesel n'arrêtent jamais le fonctionnement et fournissent la puissance active et réactive demandée par la charge, c'est le mode de la centrale diesel classique [32].

I.3.3 Principaux éléments d'un réseau électrique hybride autonome Diesel-Eolien

I.3.3.1 Générateur diesel [33]

Le générateur diesel (DG) est l'un des plus anciennes sources d'énergie développée il y a environ 100 ans. Il devient populaire de nos jours en raison de son faible coût d'installation et de sa grande fiabilité. Mais le principal inconvénient de la DG est le coût élevé du carburant et les émissions qui causent la dégradation de l'environnement. Le générateur diesel est un système à plusieurs composants, mais pour l'analyse de fiabilité, seuls certains principaux composants sont considérés comme :

- ✓ Pompe à carburant
- ✓ Radiateur de refroidissement

- ✓ Alternateur
- ✓ Régulateur de tension automatique (AVR)

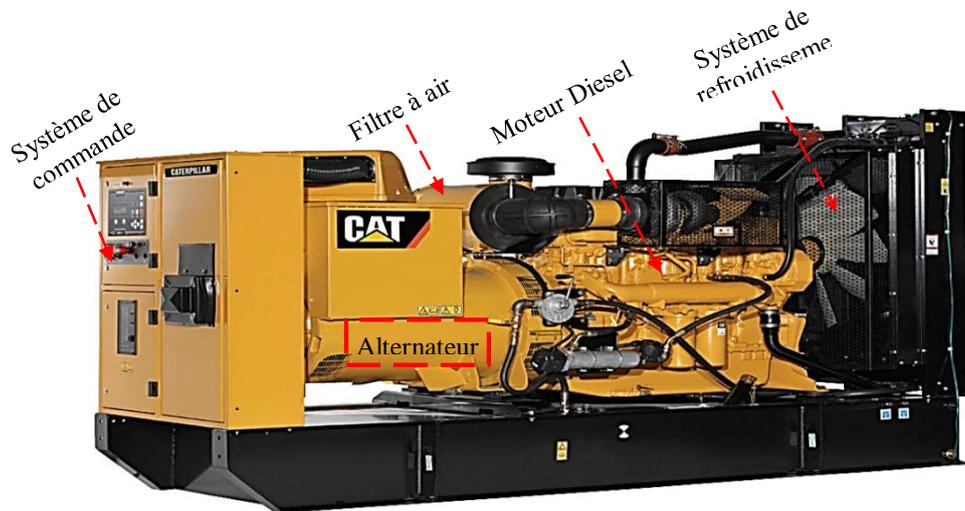


Fig.I.2 : Générateur diesel

L'alternateur est le composant intégral du générateur qui est responsable de la génération de puissance électrique de l'entrée mécanique fournie par le moteur. Une fusion des parties fixe et mobile est logée dans le boîtier de l'alternateur. Un mouvement relatif entre le champ magnétique et électrique est produit, qui à son tour génère de l'électricité.

I.3.3.2 L'éolienne [33]

La popularité de l'énergie éolienne comme source de micro réseau augmente de jour en jour. L'énergie éolienne devient de plus en plus à la mode en raison de la construction sophistiquée d'éoliennes modernes qui sont moins sujettes aux pannes ainsi que du faible coût d'exploitation des éoliennes. Bien que les coûts d'installation et de maintenance des éoliennes soient élevés, ils gagnent encore en popularité en raison de leur coût d'exploitation presque négligeable.

L'éolienne est un système complexe composé de plusieurs mécanismes comme le montre la Fig.I.3. Les différents composants majeurs de l'éolienne sont les suivants :

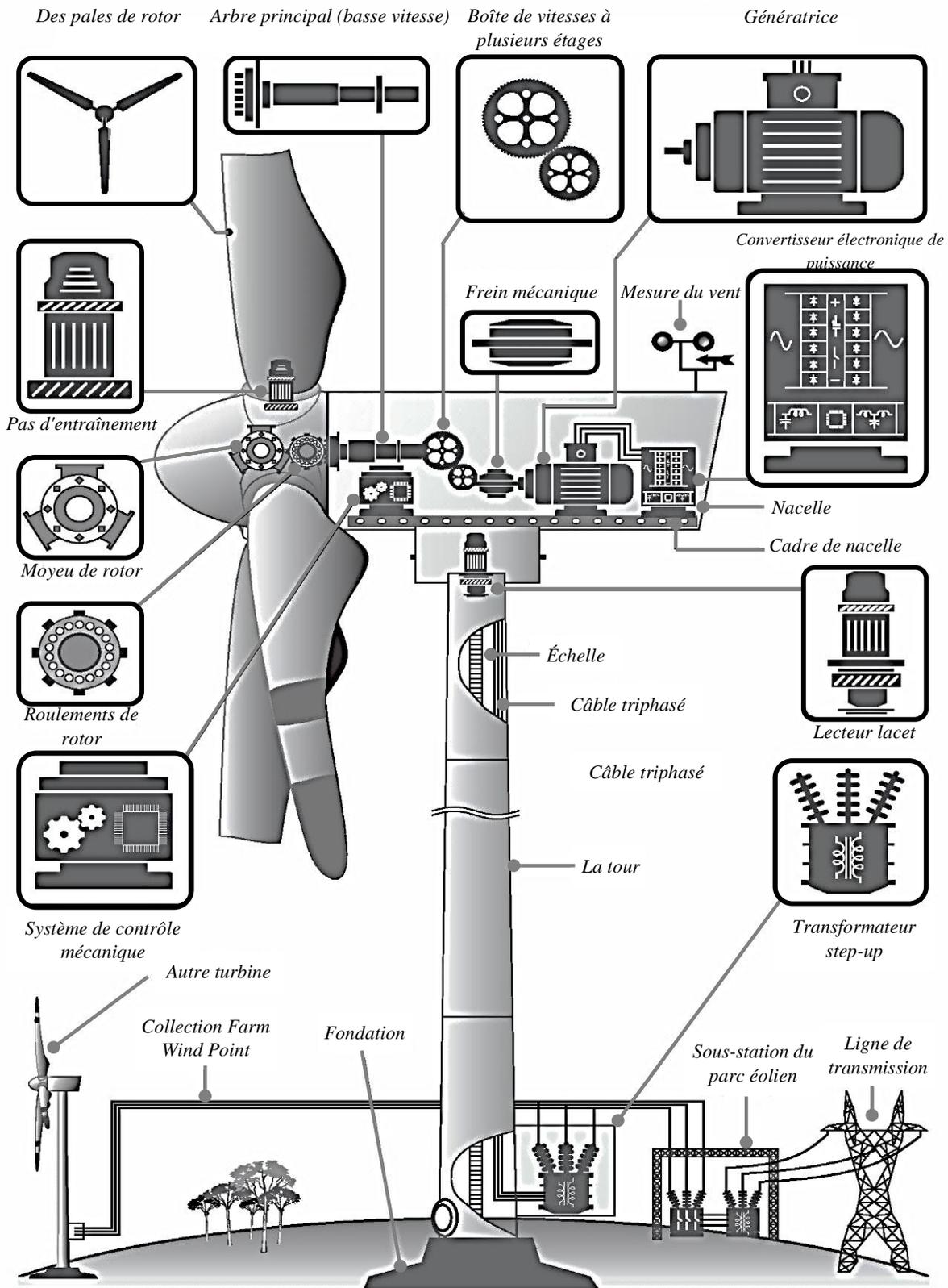


Fig.I.3: Principaux composants d'un Système de conversion d'énergie éolienne (WECS) haute puissance à vitesse variable [34].

- ✓ Générateur
- ✓ Boîte de vitesses
- ✓ Convertisseur
- ✓ Frein mécanique
- ✓ Contrôle à calage variable (pas)
- ✓ Embardée (système d'orientation)

Les éoliennes possèdent généralement un générateur de courant alternatif qui transforme l'énergie mécanique des éoliennes en énergie électrique. La boîte de vitesse facilite le générateur en faisant face aux vitesses de vent plus que la gamme tolérable de la vitesse du vent. Le courant continu est converti en AC en utilisant un convertisseur. Le convertisseur effectue également une compensation de puissance réactive. Le système d'orientation de la turbine ajuste constamment le rotor dans la trajectoire du vent. Le frein est utilisé pour bloquer le rotor en cas de catastrophe. Compte tenu de la sécurité du système, l'éolienne est complètement fermée jusqu'à ce que la partie endommagée du frein soit réparée. Le pas est utilisé pour réguler la sortie de la turbine.

I.3.3.2.1 Classification des technologies de l'énergie éolienne [34]

Dans l'industrie actuelle de l'énergie éolienne, les principales technologies éolienne sont classées selon divers critères / facteurs. Les facteurs de classification les plus importants sont basés sur les éléments suivants :

- ✓ Puissance électrique de sortie éolienne (puissance faible, moyenne et élevée)
- ✓ Régulation de puissance aérodynamique dans des conditions de vitesse de vent élevée
- ✓ alignement de l'arbre du générateur de vent par rapport au sol (axe vertical et horizontal)
- ✓ type d'application pour alimenter la puissance de sortie électrique de la turbine (autonome et connectée au réseau)
- ✓ vitesse de fonctionnement du générateur de vent par rapport aux vitesses variables (vitesse fixe et variable)
- ✓ emplacement pour montage des éoliennes (onshore et offshore)
- ✓ type de couplage mécanique entre la turbine et l'arbre du générateur
- ✓ les vitesses du vent (faible, moyenne et haute) affectant l'éolien

I.3.3.3 les charges [16]

Les charges électriques rendent utile la puissance électrique. Il existe des 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. Elles 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 courant pendant les changements dans le fonctionnement du système.

I.3.4 Principe de fonctionnement d'un système hybride éolien diesel [35]:

La Fig.I.4 montre la structure générale d'un système hybride éolien diesel. Le vent construit l'élément dominateur. Si la vitesse du vent est suffisante, l'éolien alimentera seule la charge primaire. Le surplus de puissance est envoyé vers la charge secondaire. Cependant la régulation de la fréquence est assurée par cette même charge secondaire dans le cas de ce mode de fonctionnement. Durant ce fonctionnement, le moteur diesel se déconnecte automatiquement de la génératrice synchrone par un embrayage.

Le générateur synchrone fonctionne ainsi comme un condensateur synchrone en fournissant de la puissance réactive dans l'objectif de maintenir la tension d'alimentation constante. Dans le cas où la vitesse du vent est moins forte, l'éolienne produisant peu de

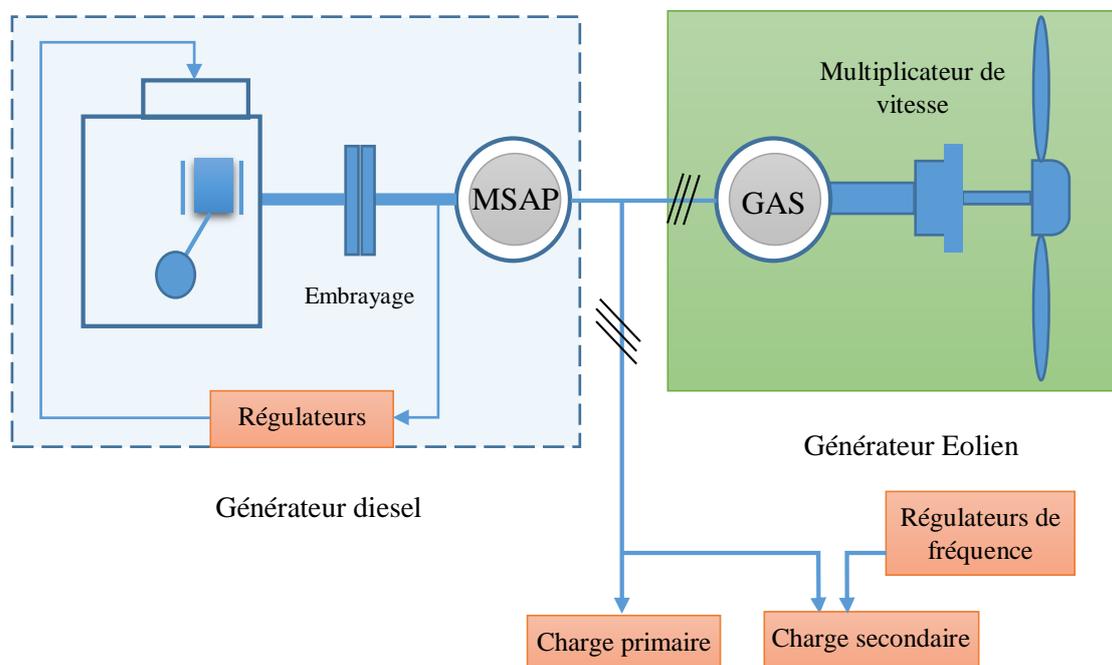


Fig.I.4 Système hybride éolien diesel [35]

puissance, cette dernière est incapable d'alimenter totalement la charge, alors le générateur diesel interviendra en fournissant la puissance requise. Si la vitesse du vent est très faible, le GD alimente seul toute la charge. Dans ce cas, le GD assure seul la régulation de la tension et la fréquence.

I.3.4 Problèmes rencontrés dans le fonctionnement dans réseau électrique hybride autonome Diesel-Eolien [32]

Le mode éolien-diesel peut être considéré comme une installation diesel et l'éolienne comme une charge négative. C'est le mode de nombreux systèmes éoliens-diesel à faible/moyenne pénétration déjà mis en œuvre dans les communautés nordiques du Yukon, Nunavut et en l'Alaska. Dans ce cas, la puissance éolienne (WTG) est souvent approximativement la même que la charge de consommation et, en plus le GS, le WTG fournissent également la puissance active. De nouveaux problèmes apparaissent dans ce mode comme pour déterminer la réserve de filature du diesel (l'énergie éolienne peut disparaître à tout moment en raison de la ressource éolienne imprévisible et la charge actuelle peut surcharger le générateur diesel en cours de production).

Pendant les intervalles de temps où l'excès d'énergie éolienne par rapport à la charge est considérable, le moteur diesel doit être maintenu en veille afin qu'il puisse réagir rapidement à une réduction de la vitesse du vent (réduire le temps de démarrage et donc le réchauffement du moteur). C'est une source importante de surconsommation car le moteur pourrait tourner pendant des heures sans fournir d'énergie utile !

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
électrique hybride autonome Diesel-Eolien*



II.1 Introduction

Dans ce chapitre, Un système électrique hybride autonome Diesel-Eolien est envisagé pour la modélisation mathématique, dans le but d'établir des équations qui permettront d'analyser la stabilité de tension du système, où un groupe électrogène diesel agit en tant que réseau local pour le système de conversion d'énergie éolienne connecté à celui-ci.

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 [15, 18,19].

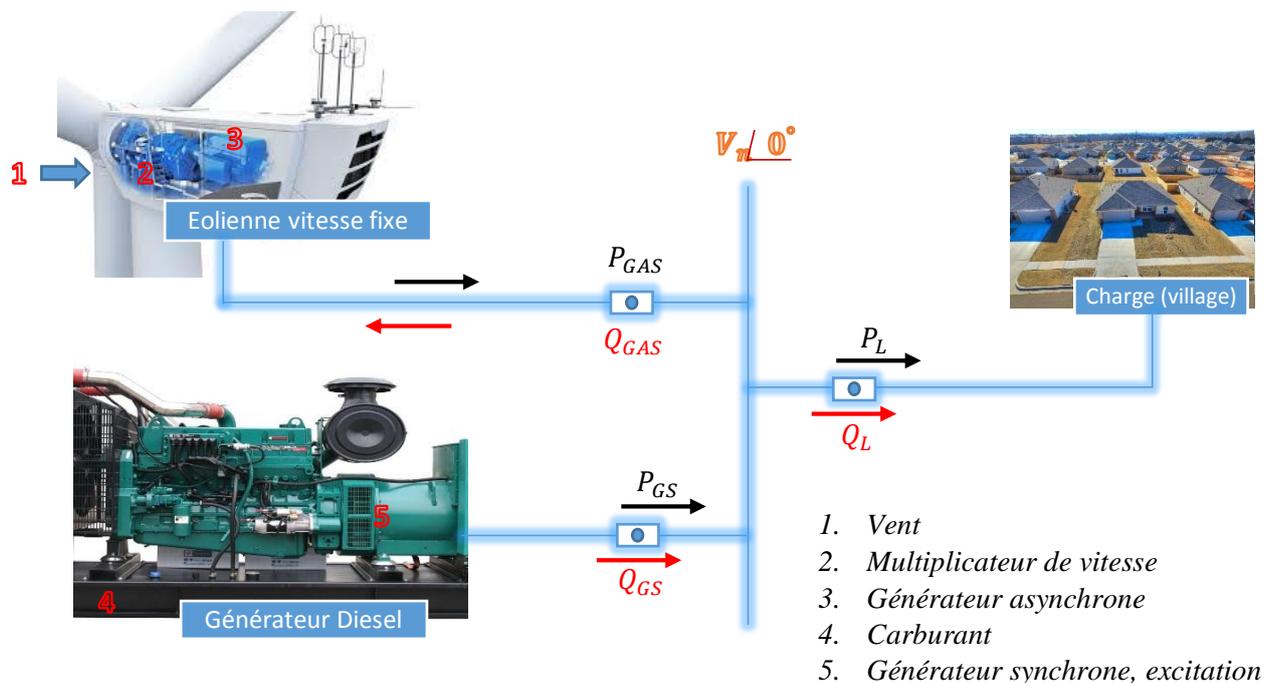


Fig.II.1 : Schéma de base considéré pour la modélisation [15]

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

- **Première source** : *Générateur diesel* [16]

Dans le cas des installations à sources d'énergie renouvelables autonomes, il est nécessaire de recourir au stockage ou d'ajouter un ou plusieurs groupes électrogènes diesels. Dans un SEH, le générateur classique est généralement le moteur diesel

directement couplé au générateur synchrone (Fig.II.2). La fréquence du courant alternatif à la sortie est maintenue par un gouverneur de vitesse (régulateur de vitesse) sur le moteur diesel

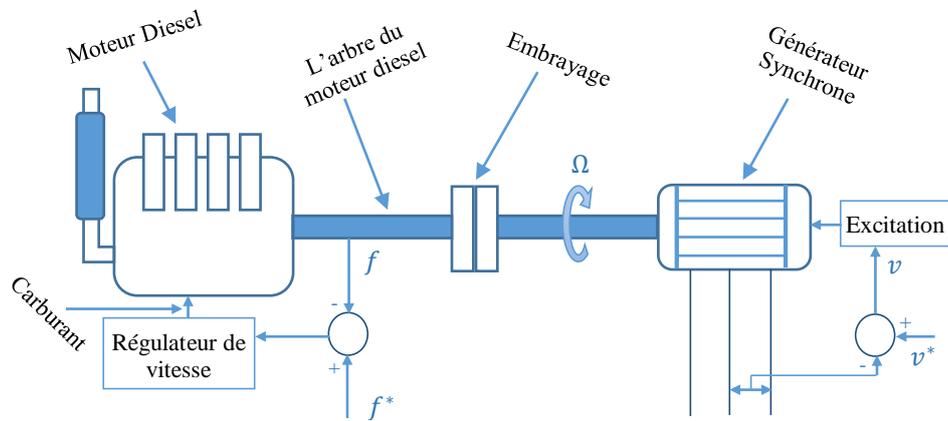


Fig.II.2 : Configuration du générateur diesel [16]

Le gouverneur fonctionne en ajustant le flux de carburant au diesel, pour garder la vitesse du moteur et la vitesse du générateur constante. La fréquence du réseau est directement liée à la vitesse de rotation du générateur et elle est donc maintenue au niveau désiré.

- **Deuxième source : L'éolienne** [17]

Elle est dotée d'une génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur, mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne.

La puissance réactive est générée lorsque la forme d'onde de courant n'est pas en phase avec la forme d'onde de tension en raison de composants inductifs ou capacitifs. La puissance réactive est nécessaire pour produire les champs magnétiques et électriques dans les condensateurs et les inductances.

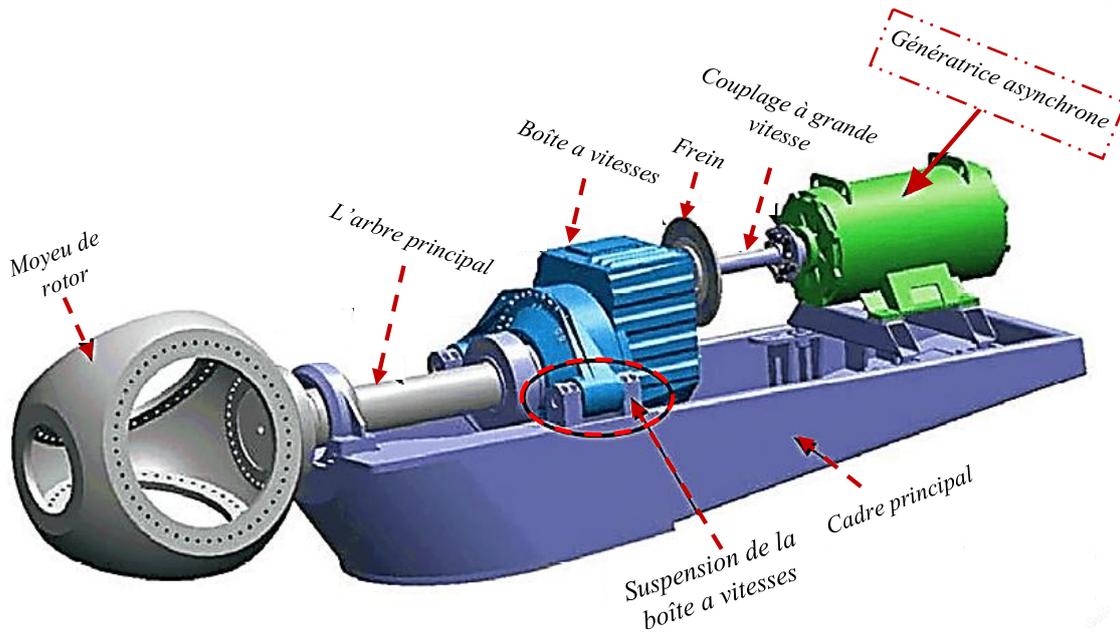


Fig.II.3 : Type de conduit d'une turbine éolienne

Les lignes de transmission de puissance ont des propriétés à la fois capacitives et inductives. Il existe deux variables principales qui peuvent être directement contrôlées pour améliorer les performances du système d'alimentation : la tension, et l'impédance. [17]

L'augmentation de la tension de ligne est la méthode la plus courante pour augmenter la limite de puissance dans des conditions de charge élevée. [17]

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 et donnée par :

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

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.3) on aura (II.4) :

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

A partir de (II.4), la variation d'énergie magnétique de générateur asynchrone est donnée dans (II.5) et l'expression dynamique de la variation de puissance réactive de générateur asynchrone est donnée dans (II.8).

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

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

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

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

L'expression (II.3) met en relation la puissance réactive de la charge avec la tension V de jeu de barre, ou n_q est le coefficient empirique de la composition de la charge [18] :

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

Q_{LN} : représente la puissance réactive absorbée par la charge sous une tension nominale V_N de jeu de barre. Elle s'écrit [18] : $Q_{LN} = Q_{L0} \left(\frac{V}{V_0}\right)^{n_q}$ ou Q_{L0} et V_0 sont des conditions initiales.

On donne alors la variation de puissance réactive de la charge par l'expression suivante :

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

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

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

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

On divise les deux membres de cette expression par la puissance réactive de base, on obtiendra une équation exprimée en pu et qui donnée dans l'expression (II.13) [15].

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

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

$$\text{Avec} \quad H_R = \frac{2E_{m0}}{V_0 Q_{ref}} \quad \text{et} \quad D_V = \frac{n_q Q_{L0}}{Q_{ref} V_0} \quad (\text{II.14})$$

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 [18].

Et on a :

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

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

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

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

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 [18] :

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

En petite perturbation, l'équation (II.19) peut s'écrire comme suit :

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

$\Delta E'_q$: La variation de la force électromotrice interne, qui est proportionnelle à la variation du flux de champ de l'axe direct en régime transitoire.

Prenant la transformation de Laplace des deux côtés, nous obtenons :

$$\Leftrightarrow \Delta Q_{GS} = K_{GS1} \Delta E'_q + K_{GS2} \Delta V \quad (\text{II.21})$$

Avec

$$\circ \quad K_{GS1} = \frac{V_0 \cos(\delta_{GS0})}{X'_d} \quad (\text{II.22})$$

$$\circ \quad K_{GS2} = \frac{E'_q \cos(\delta_{GS0}) - 2V_0}{X'_d} \quad (\text{II.23})$$

II.2.2.1.1 Modèle réduit de la génératrice synchrone

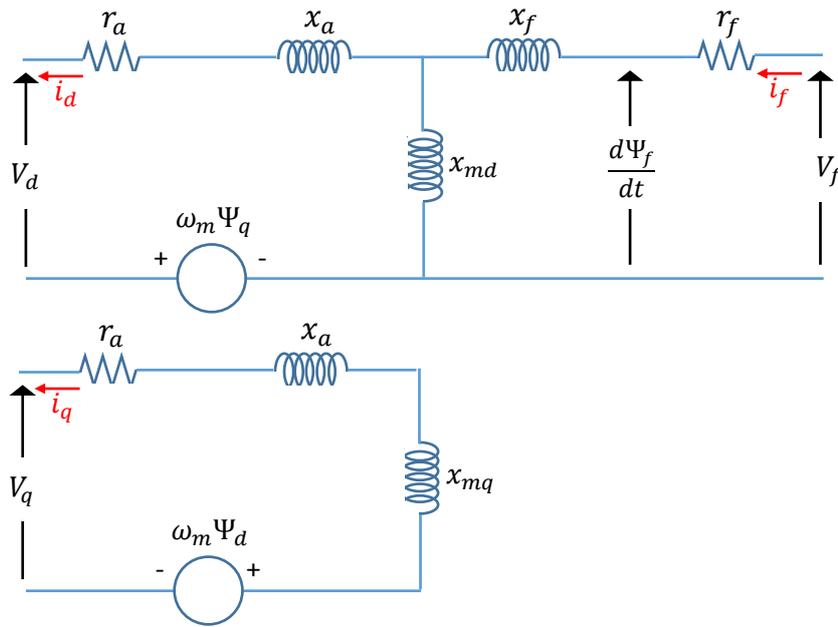


Fig. II.4 : Modèle sans amortisseur de générateur synchrone dans le repère dq [15].

- **Equation de couplage de flux :** [19]

L'équation de liaison de flux de la machine synchrone à rotor rond pour de petites perturbations est :

$$\frac{d}{dt} \Delta E'_q = \frac{1}{T'_{d0}} (\Delta E_{fd} - \Delta E_q) \quad (\text{II.24})$$

Où

- $\Delta E'_q$: La variation de la force électromotrice de l'induit interne, qui est proportionnelle à la variation du flux de champ de l'axe direct en régime permanent.
- $T'_{d0} = \frac{x_{ff}}{r_f}$: La constante de temps transitoire du circuit ouvert de l'axe direct.

En Equation (II.23), E_q est donnée par :

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

$$\Rightarrow \Delta E_q = K_{GS3} \Delta E'_q + K_{GS4} \Delta V \quad (\text{II.25})$$

Où

- x_d et x'_d sont la réactance à axe direct du générateur synchrone dans des conditions d'état stable et transitoire, respectivement.

En remplace (II.24) dans (II.23) et en écrivant le tout sous forme de fonction de transfert, on obtient le lien entre la tension de champ ΔE_{fd} , la tension de jeu de barre V et la tension derrière la réactance synchrone exprimé dans l'équation suivant [15] :

$$\Delta E'_q(s) = \frac{1}{1+sT_G} \left(K_{GS3} \Delta E_{fd}(s) + K_{GS4} \Delta V(s) \right) \tag{II.26}$$

Où

- $T_G = X'_d T'_{d0} / X_d$
- $K_{GS3} = X'_d / X_d$
- $K_{GS4} = (X_d - X'_d) \cos \delta / X_d$

En couplant l'expression (II.26), (II.23) et (II.22) on obtient un modèle d'ordre 1 de génératrice synchrone [15].

II.2.2.1.2 le régulateur de tension

La tension du champ est assurée par le régulateur de tension Fig. II.5. Le modèle linéaire IEEE type-I de régulateur de tension est généralement utilisée dans des études transitoires des réseaux électriques, est considéré ici.

En petites variations, la tension de référence est nulle ($\Delta V_{ref} = 0$) et la saturation de l'excitatrice n'influence pas beaucoup sur le comportement du régulateur [15]

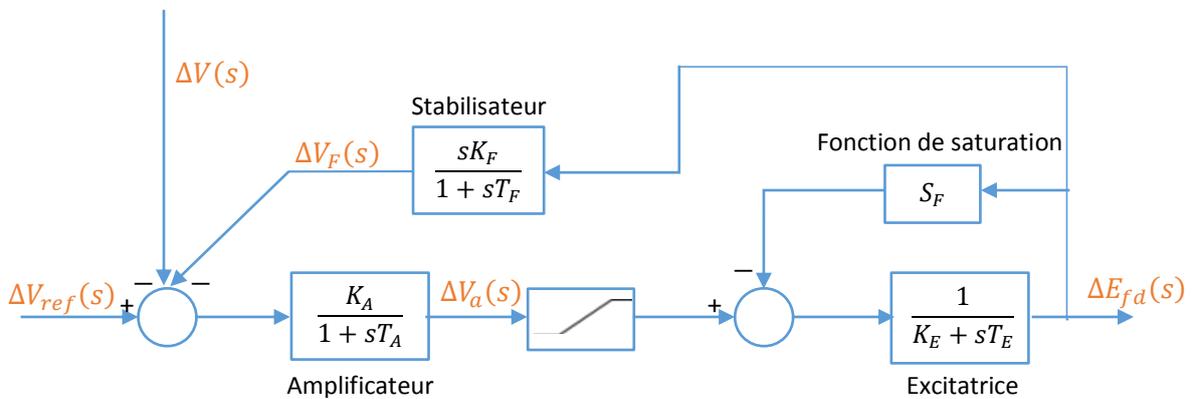


Fig. II.5 : Système d'excitation IEEE type-I

- **Equations du système d'excitation IEEE Type-1 [21] :**

Le système d'excitation IEEE type-1, comme indiqué sur la Fig. II.4, est pris en compte pour le générateur synchrone du système hybride. A partir du diagramme, les équations de fonction de transfert qui négligent la fonction de saturation (SF) peuvent être écrites comme suite :

$$\Delta E_{fd}(s) = \frac{1}{K_E + sT_E} \Delta V_a(s) \quad (\text{II.27})$$

$$\Delta V_a(s) = \frac{K_A}{1 + sT_A} \left(-\Delta V(s) - \Delta V_f(s) + \Delta V_{ref}(s) \right) \quad (\text{II.28})$$

$$\Delta V_f(s) = \frac{sK_F}{1 + sT_F} \Delta E_{fd}(s) \quad (\text{II.29})$$

II.2.2.2 Modèle de générateur asynchrone [15]

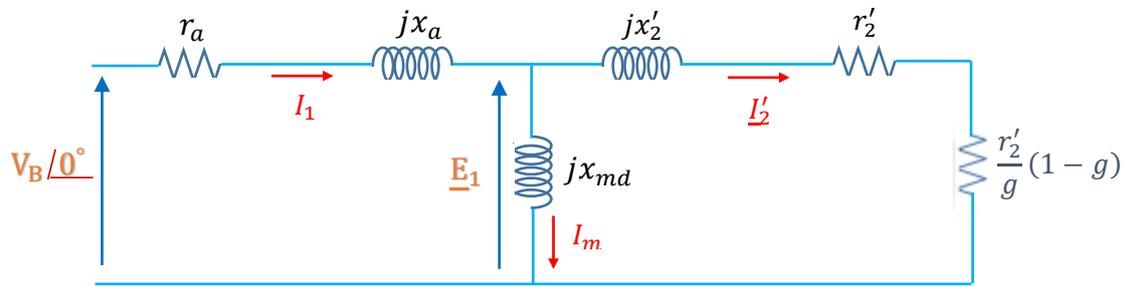


Fig. II.6 : Schéma équivalent du générateur asynchrone en régime permanent [15].

L'impédance équivalent de générateur asynchrone est donnée sous cette forme :

$$\bar{Z}_E = Z_{réel} + jZ_{imag} \quad (\text{II.30})$$

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

$$Z_{réel} = r_1 - \frac{(r'_2/g)x_m^2}{(r'_2/g)^2 + (x'_2 + x_m)^2} \quad (\text{II.31})$$

$$Z_{imag} = r_1 - \frac{(r'_2/g)^2 x_m + x'_2 x_m (x'_2 + x_m)}{(r'_2/g)^2 + (x'_2 + x_m)^2} \quad (\text{II.32})$$

On note que pour l'opération de générateur, le glissement g et $Z_{réel}$ sont négatifs et Z_{imag} reste négatif, ce que montre que la génératrice absorbe de la puissance réactive [15].

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

$$\bar{I}_1 = \frac{V}{\bar{Z}_E} = I_{1réel} + jI_{1imag} \quad (\text{II.33})$$

$$\Rightarrow P_{GAS} = VI_{1réel} \quad \text{Et} \quad Q_{GAS} = VI_{1imag} \quad (\text{II.34})$$

En développant (II.30) avec les impédances $Z_{réel}$ et Z_{imag} , on obtient (II.31), La puissance réelle provient de la puissance mécanique. On écrit alors (II.32) où :

- P_j : Représentent les pertes joules
- P_{mec} : représente les pertes rotationnelles

En analyse petits signaux, ces pertes sont quasi constantes et on obtient la (II.33).

$$Q_{GAS} = \frac{Z_{imag}}{Z_{réel}} P_{GAS} \quad (\text{II.35})$$

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

$$Q_{GAS} = \frac{Z_{imag}}{Z_{réel}} (P_{R_m} - P_j - P_{mec}) \quad (\text{II.36})$$

$$\Rightarrow \Delta Q_{GAS} = K_{GAS1} \Delta P_{R_m} + K_{GAS2} \Delta V \quad (\text{II.37})$$

Avec :

$$\circ K_{GAS1} = K_5 = \frac{X_1}{R_m - (R_1^2 + X_1^2)/2R_1} \quad (\text{II.38})$$

$$\circ K_{GAS2} = K_6 = \frac{2V_0}{(R_1^2 + X_1^2)} \left[X_1 - \frac{X_1}{R_1 - (R_1^2 + X_1^2)/2R_1} \right] \quad (\text{II.39})$$

Et :

- $R_m = \frac{r_2'}{g} (1 - g)$
- $R_1 = R_m - (r_1 + r_2')$
- $X_1 = x_1 + x_2'$

II.2.2.2.1 Cas de générateur asynchrone a aimant permanent

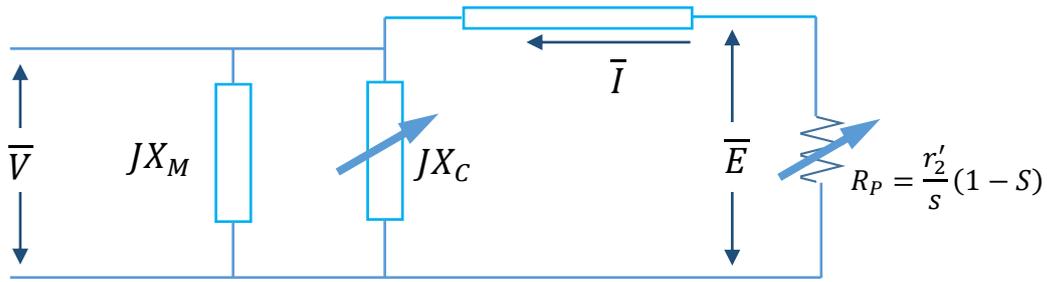


Fig. II.7 : Circuit équivalent approximatif de générateur asynchrone a aimant permanent [15].

Le schéma de circuit équivalent approximatif du générateur asynchrone à aimant permanent est donné dans la Fig. II.7.

Pour de petite perturbation, la puissance réactive absorbée par le générateur asynchrone à aimant permanent (GAS AP) $\Delta Q_{GAS AP}$ en fonction de la tension de jeu de barre terminale et des paramètres du générateur, la puissance mécanique peut s'écrire comme suit :

$$\Delta Q_{GAS AP} = K_{GAS AP1} \Delta V \quad (II.40)$$

Avec :

$$K_{GAS AP1} = \frac{-2X_{eq}V_0}{R_Y^2 + X_{eq}^2} + \frac{V^2}{X_C} \left\{ \frac{3aV_0^2 + 2bV_0 + c}{(X_C^3)} - \frac{2}{V_0} \right\} \quad (II.41)$$

$$R_Y = R_P + R_{eq} \quad (II.42)$$

$$X_C = (3aV_0^2 + 2bV_0 + c + d)^{1/3} \quad (II.43)$$

$$R_P = \frac{r'_2}{g} (1 - g) \quad (II.44)$$

De la 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 :

$$K_{GAS AP2} = \frac{-2 - 2X_{eq} R_Y V_0}{(R_Y^2 + X_{eq}^2) \{2R_Y (P_{Rm} - P_{fer})\}} \quad (II.45)$$

$$K_{GAS AP2} = K_{C1} + \frac{V_0^2}{X_C} \left\{ \frac{3aV_0^2 + 2bV_0 + c}{3X_C^3} - \frac{2}{V_0} \right\} \quad (II.46)$$

$$\text{Où : } K_{C1} = \frac{-2X_{eq}V_0}{R\dot{Y}^2 + X_{eq}^2} \quad (\text{II.47})$$

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 dynamique et algébrique développées dans la précédente peuvent être implémentée dans le logiciel de simulation MATLAB/SIMULINK suivant le schéma de Fig. II.8.

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

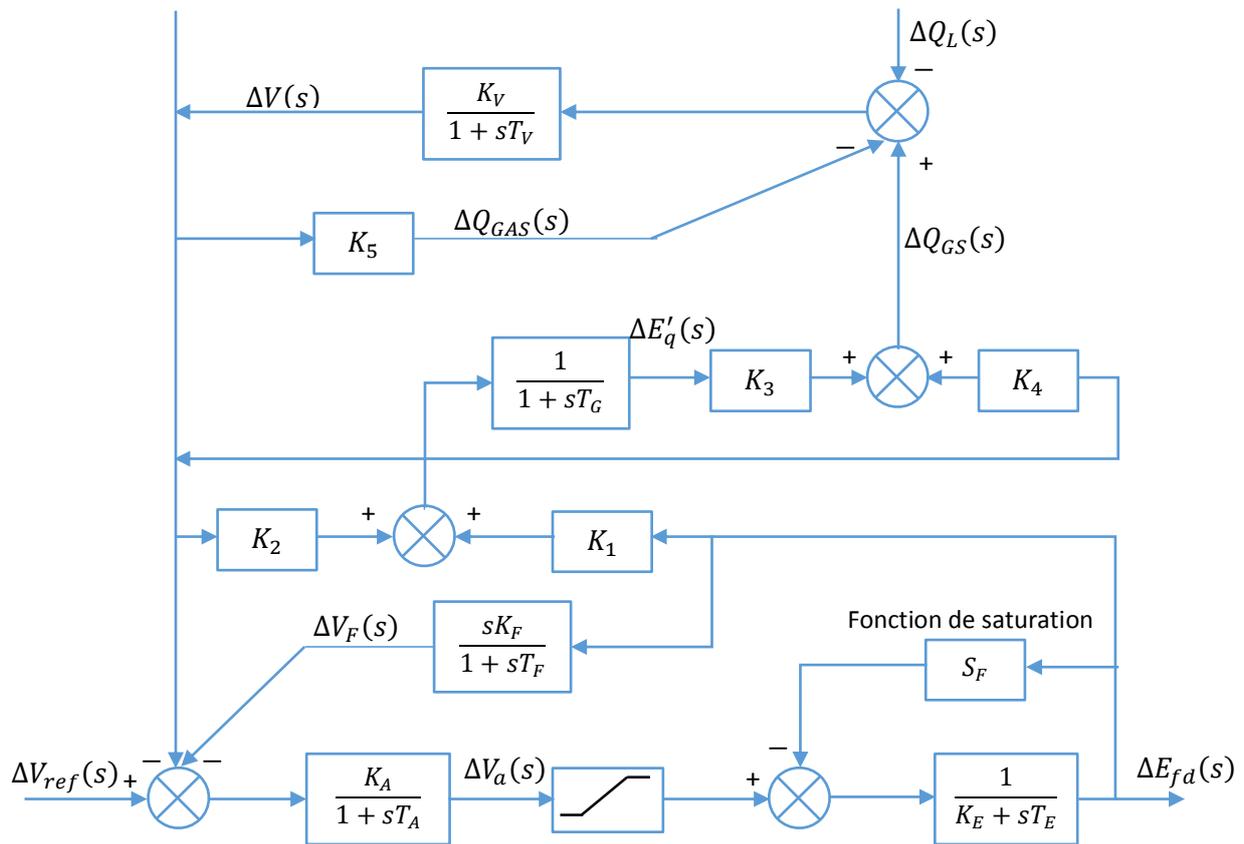


Fig. II.8 : Structure bloc de contrôle de la tension dans le système hybride Diesel-Eolien [15].

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

Contrôleurs STATCOM et AVR



III.1 Introduction

Dans un réseau électrique hybride autonome Diesel-Eolien 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.

De nombreux articles ont apparu dans la littérature, suggérant différentes méthodes utilisant la banque de condensateurs fixes pour fournir la puissance réactive dans des conditions d'équilibre. Comme la demande de puissance réactive du générateur d'induction varie, les condensateurs fixes sont incapables de fournir une quantité suffisante de soutien de la puissance réactive au système d'alimentation isolé sous différentes conditions de puissance et de charge d'entrée [22].

Divers méthodes sont disponibles montrant la nouvelle ère de FACTS (Flexible A.C. Transmission System) qui donne la réponse rapide et continue pour le changement de la puissance réactive et la tension [22].

III.2 Contrôle de puissance réactive par le compensateur STATCOM

III.2.1 Description de la méthode

STATCOM est normalement un VSC (Voltage Source Converter), qui convertit une tension continue de son côté d'entrée en tensions alternatives triphasées à la fréquence fondamentale de Phase angle et de magnitude contrôlée. Le principe de base du fonctionnement continu de STATCOM, est en connectant le condensateur VSC au courant continu pour générer une source de tension alternative derrière la réactance de fuite du transformateur. Il s'agit d'un périphérique d'alimentation personnalisé basé sur un shunt VSC connecté au réseau. En passant un courant contrôlable, il peut améliorer la qualité du courant de charge. Cependant, un STATCOM peut également améliorer la baisse de tension en injectant du courant au point de connexion avec le réseau [23].

L'onduleur de source de tension de commande à courant STATCOM, injecte du courant dans le réseau de manière à ce que leur angle de phase avec la tension source ait la valeur désirée et que le courant source soit exempt d'harmonique. Le courant injecté annulera la partie

harmonique et la partie réactive de la charge et du courant dans le générateur d'induction, améliorant ainsi la qualité de l'alimentation et le facteur de puissance. Pour manipuler ces objectifs, les tensions du réseau sont détectées et synchronisées pour que l'onduleur génère du courant [23]

La Fig. III.1 montre le schéma de système hybride Diesel-éolienne avec le compensateur STATCOM.

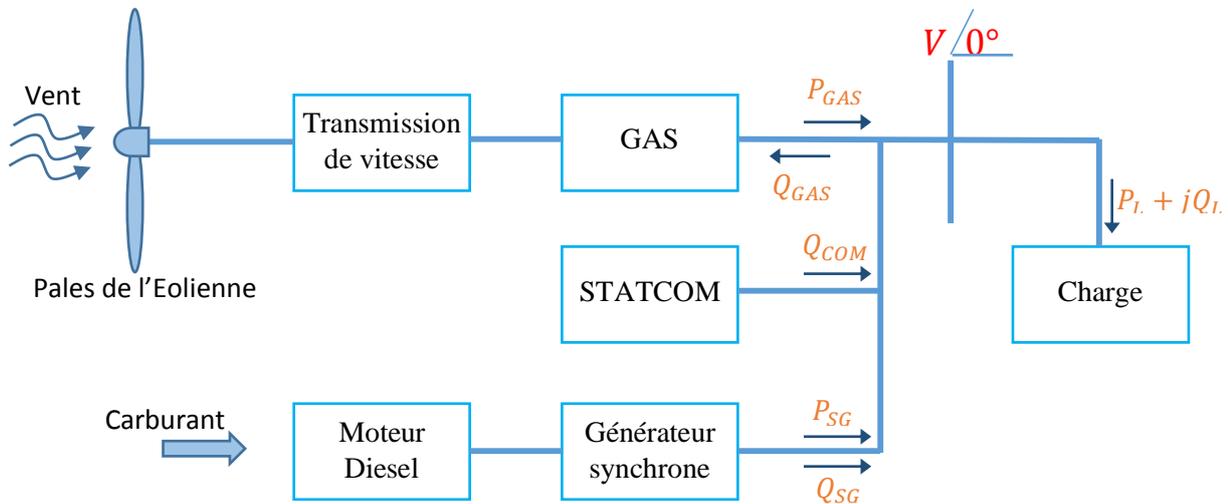


Fig. III.1 : Schéma unifilaire de réseau hybride Eolien-Diesel avec compensateur STATCOM

La puissance réactive requise pour le fonctionnement du générateur d'induction et de la charge est fournie par un générateur synchrone et STATCOM, l'équation d'équilibre de puissance réactive du système dans le régime permanent et [24, 25]:

$$\sum Q_{Source} - \sum Q_{Charge} = 0 \quad (III.1)$$

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

En raison de perturbation de la puissance réactive de charge ΔQ_L , la tension du système peut changer, ce qui entraîne un changement incrémentiel de la puissance réactive des autres composants.

Le surplus de puissance réactive nette est $Q_{GS} + Q_{com} - Q_L - Q_{GAS}$ et il va changer la tension du système qui régira par l'équation de fonction de transfert suivante :

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

Pour la modélisation d'écoulement de puissance dans le STATCOM, la génération de puissance réactive au jeu de barre AC est sou la forme [26] :

La topologie STATCOM, et le schéma de principe de STATCOM connecté à une ligne de transmission est montré dans la Fig. III.2. (a) et Fig. III.2. (b).

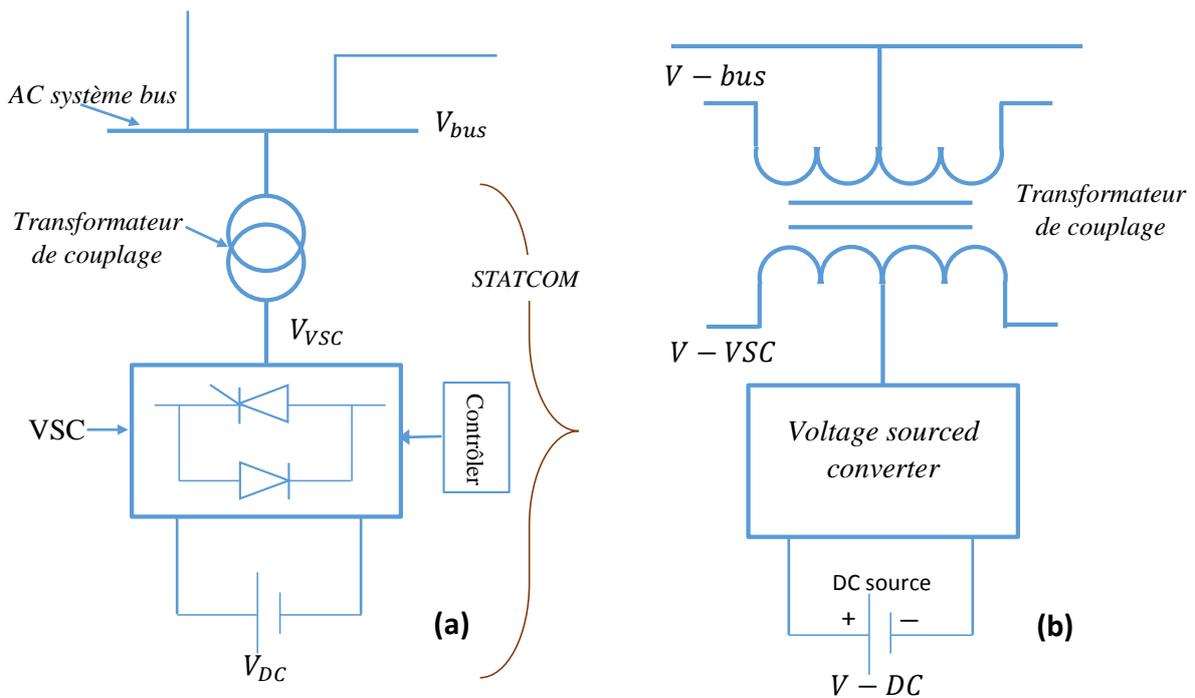


Fig. III.2 : (a) Topologie STATCOM [27], (b) STATCOM connecté à une ligne de transmission. [28]

$$Q_{com} = kV_{dc}^2 B + kV_{dc}VB \cos(\alpha - \delta) + kV_{dc}VG \sin(\alpha - \delta) \quad (III.4)$$

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

$$Q_{com} = kV_{dc}^2 B - kV_{dc}VB \cos(\alpha) \quad (III.5)$$

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

$$Q_{com} = f(V, \alpha) \quad (III.6)$$

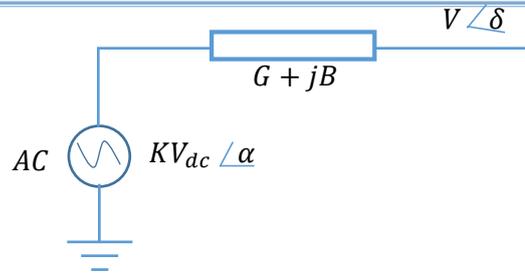


Fig. III.3 : Schéma de principe de STATCOM

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

$$\Delta Q_{com} = \frac{\partial Q}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial Q}{\partial V} \Delta V \tag{III.5}$$

$$\Delta Q_{com} = K_6 \Delta \alpha + K_7 \Delta V \tag{III.6}$$

Ou :

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

$$K_6 = kV_{dc}VB \sin(\alpha) \tag{III.7}$$

$$K_7 = -kV_{dc}B \cos(\alpha) \tag{III.8}$$

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

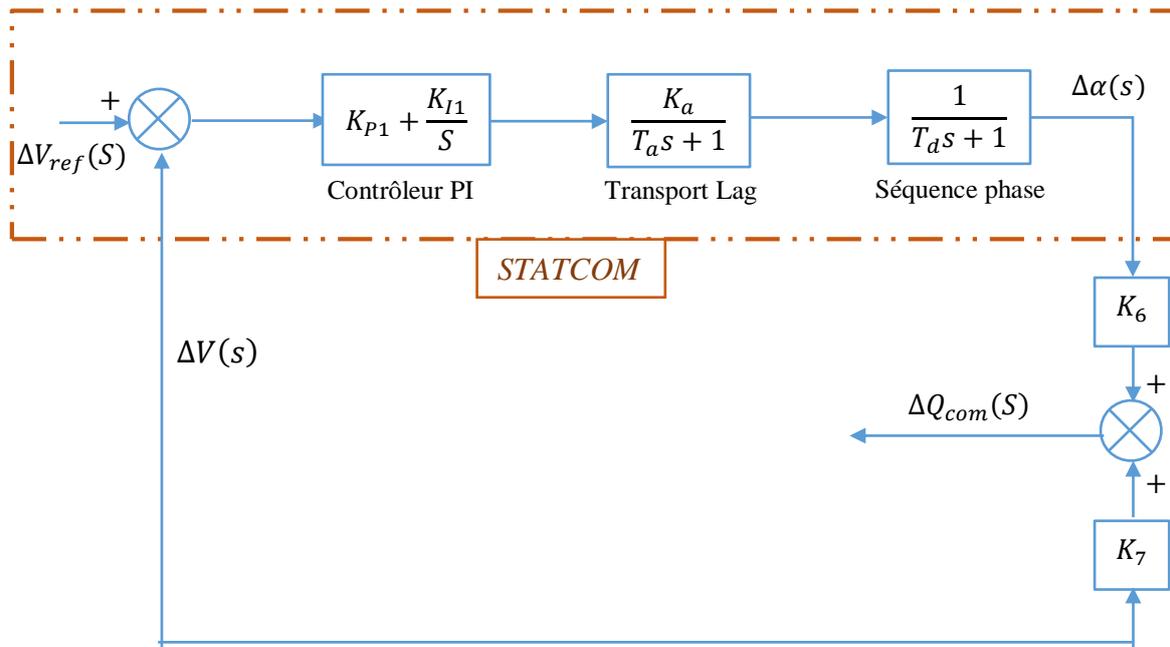


Fig. III.4 : Schéma équivalent du STATCOM, et la puissance réactive de compensation ΔQ_{com}

Les équations dynamiques et algébriques développées précédemment peuvent être implémentée dans le logiciel de simulation MATLAB/SIMULINK suivant le schéma de la Fig. III.4. Les paramètres de tableau 3 dans l'annexe, seront considérés pour la simulation avec STATCOM.

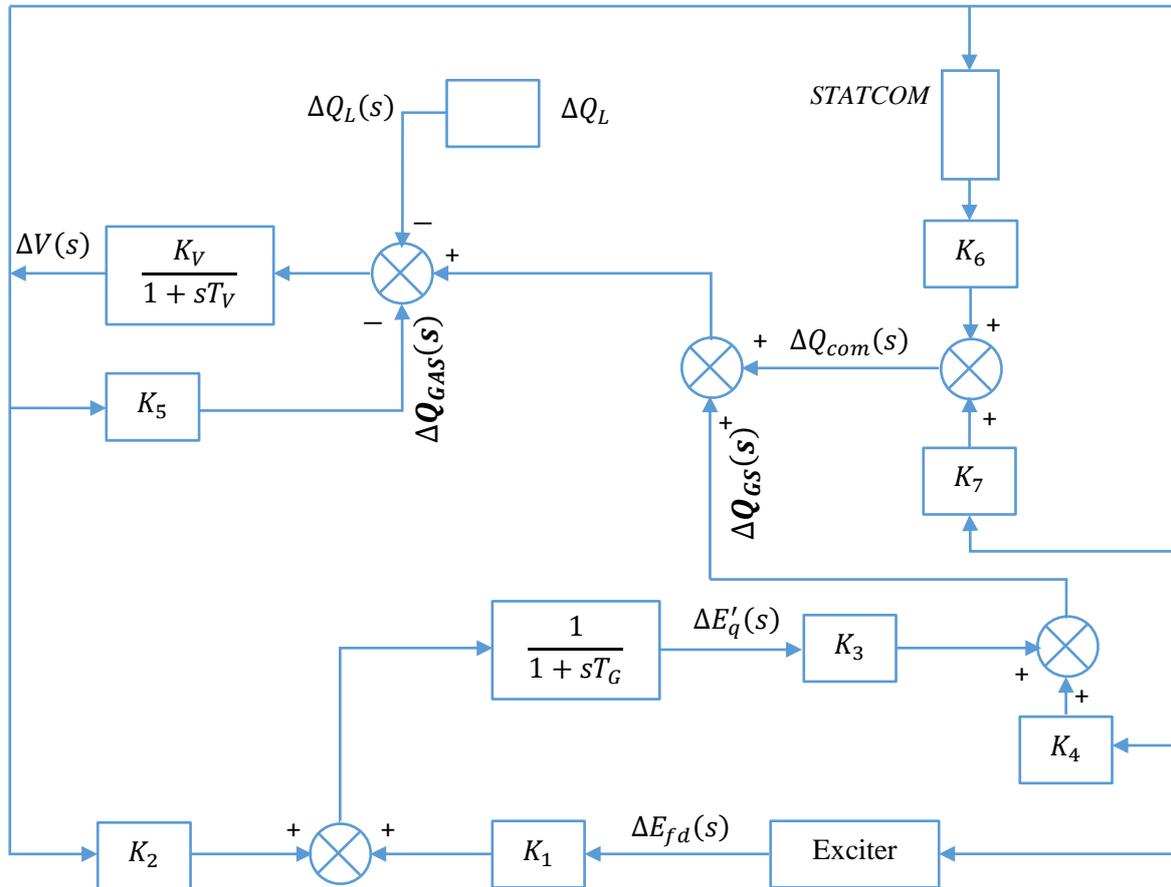


Fig. III.5 : Diagramme du système construit avec des fonctions du transfert.

III.3 Contrôle de puissance réactive par le régulateur AVR

III.3.1 Description de la méthode [29, 15]

Le régulateur de tension automatique (AVR) est un système local important pour les générateurs synchrones, pour maintenir une valeur de tension nominale constante et contrôler la puissance réactive fournie ou reçue par le système électrique [29].

La Fig. III.6 montre la configuration de base du système d'alimentation hybride éolien-diesel, le générateur synchrone (GS) équipé d'un exciteur et d'un AVR est considéré comme l'ensemble de générateur diesel (DG).

Le rôle principal des AVR est de répondre rapidement aux perturbations de tension survenant dans le système. Ce contrôle est local par nature, car il ne concerne que les bus générateurs. De plus, la puissance réactive requise sera produite par les générateurs électriquement proches de la perturbation, Les conséquences de ceci sont [4]:

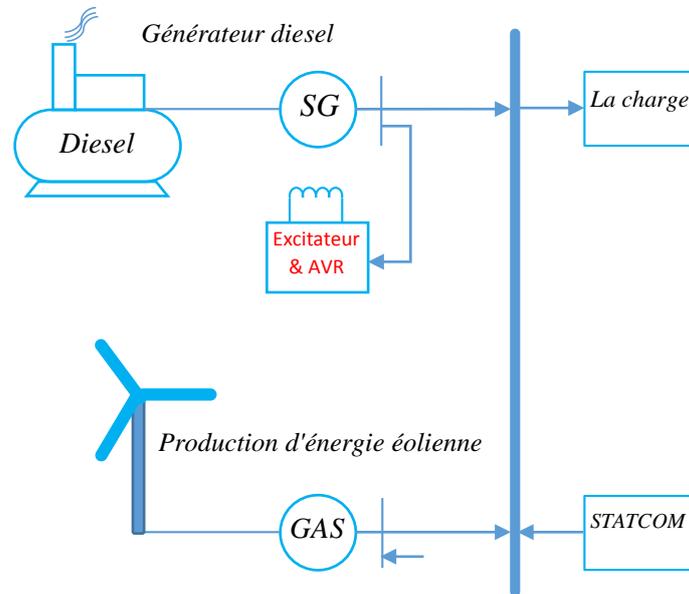


Fig. III.6 : Un système d'alimentation hybride éolien-diesel autonome, équipé d'un excitateur et d'un AVR [21]

- La tension aux bus non générateurs du système peut devenir inacceptable
- les réserves réactives peuvent être inégalement réparties sur les générateurs après la perturbation.

Cette situation doit être corrigée en ajustant les valeurs de tension V_0 des générateurs.

Une description schématique d'un régulateur automatique de tension (AVR) typique, ou système de contrôle d'excitation, est illustrée à la Fig. III.7 où des lignes en pointillés sont utilisées pour des blocs qui ne sont pas nécessairement présents et des lignes en pointillés numérotées.

La tension aux bornes du générateur V est mesurée à travers un transformateur de potentiel (PT), puis rectifiée et filtrée de façon à produire un signal continu proportionnel à la valeur RMS de cette tension alternative, Le signal de courant continu intégré peut être proportionnelle à :

$$V_C = |\bar{V} \pm (R_C + jX_C)\bar{I}| \quad (\text{III.9})$$

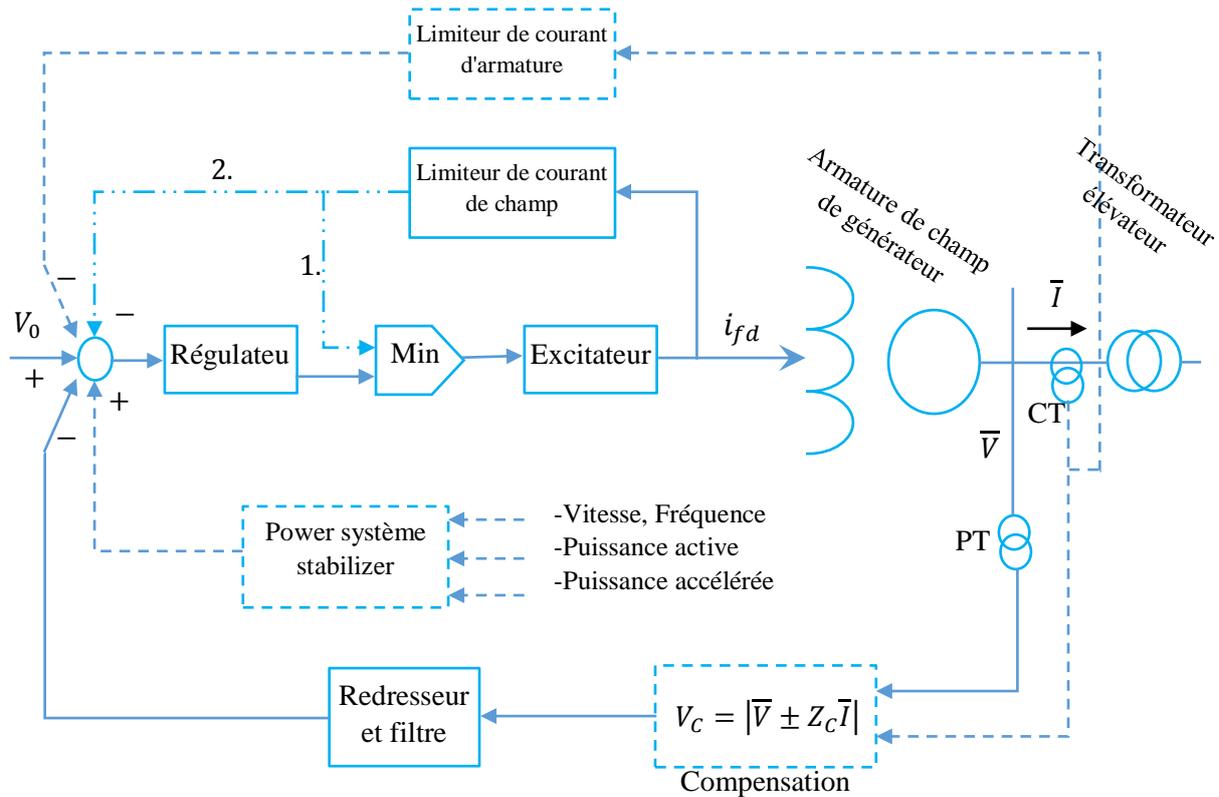


Fig. III.7 Représentation schématique d'un régulateur de tension automatique (AVR) [4].

Où

- R_C est une résistance de compensation
- X_C est une réactance de compensation
- I est le courant sortant du générateur et mesuré à travers un transformateur de courant (CT).

Comme représenté sur la Fig. III.7, le signal V_C est comparé à la référence V_0 et la différence est traitée par le régulateur dont le rôle est essentiellement d'augmenter la tension d'excitation du générateur en réponse à une diminution de V_C ou une augmentation de V_0 , et inversement. Le régulateur amplifie le signal d'erreur $V_0 - V_C$ et l'amène à la forme appropriée pour le contrôle de l'excitateur (par exemple le déclenchement des thyristors, etc.)

Le régulateur est généralement équipé de circuits de compensation destinés à répondre aux spécifications de performance dynamique et de précision, en particulier contre une trop grande constante de temps d'excitation. Cette compensation utilise le courant de champ de générateur i_{fd} ou le courant de champ d'excitation.

L'équation linéarisée d'AVR pour la petite perturbation est donnée ci-dessous [21]:

$$\Delta V_a' = K_{PAVR}(s)(\Delta V_{ref} - \Delta V - \Delta V_f) \quad (\text{III.10})$$

$$K_{PAVR}(s) = K_{P2} + \frac{K_{L2}}{s} \quad (\text{III.11})$$

La Fig. III.8 représente le schéma en fonction de transfert pour le contrôle de la puissance réactive d'un réseau hybride diesel-éolienne. On utilise les paramètres de Tableau A.2 représentés dans l'annexe, pour la simulation de ce système.

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

III.4.1 Avantages du générateur asynchrone a 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 de 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.9

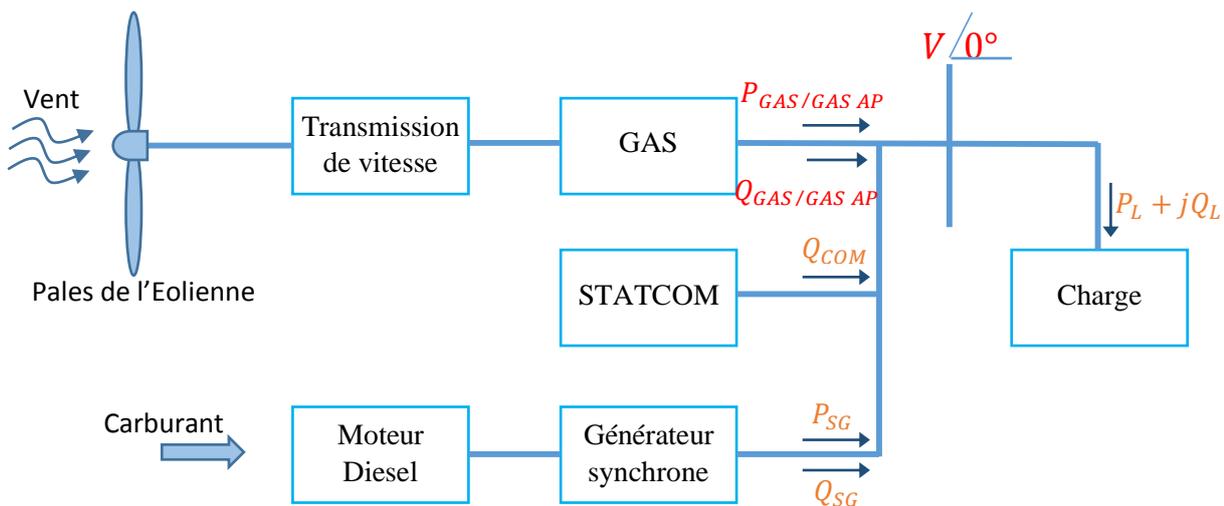


Fig. III.9 : Schéma unifilaire de réseau hybride Eolien-Diesel en employant le GAS / GAS AP AVEC compensateur STATCOM.

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

$$P_{GAS AP/GAS} + P_{GS} = P_L \quad (III.9)$$

$$Q_{GAS AP/GAS} + Q_{GS} + Q_{COM} = Q_L \quad (III.10)$$

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 :

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

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

$$\Delta V(s) = \frac{K_V}{1+sT_V} \left(\Delta Q_{GS}(s) + \Delta Q_{com}(s) + \Delta Q_{GAS AP/GAS}(s) - \Delta Q_L(s) \right) \quad (III.11)$$

A travers les équations dynamiques et algébriques développées précédemment, un modèle gestion de puissance réactive du système peut être développée, et le schéma fonctionnel du système construit en fonction de transfert est montré dans Fig. III.5

On utilise les paramètres du Tableau A.3, représenté dans l'annexe, pour la simulation du système de la Fig. III.5

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 STATCOM, suivi par une description de la méthode.

La modélisation mathématique du système avec STATCOM est donnée 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 régulateur de tension automatique (AVR), suivi par une description de la méthode.

La modélisation mathématique du système avec AVR est élaborée, avec une représentation schématique d'un régulateur de tension automatique, 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 des cas pratiques



IV.1 Introduction

La modélisation mathématique du système hybride autonome Diesel-Eolien sans compensation et avec la rajout de différents compensation, nous a permis de construire des modèles globales de gestion de puissance réactive.

Dans le présent chapitre, la simulation de ces modèles sera effectuée dans l'environnement SIMULINK/MATLAB en utilisant les différentes données du système. L'acquisition des principales variables, sera utilisée pour l'analyse de la stabilité transitoire de la tension du système considéré pour les différents cas.

IV.2 Simulation du système sans compensation

Le système de la fig.IV.1 a été simulé en employant les paramètres du tableau A.1 dans l'annexe. Dans un premier temps. La tension de jeux de barre principale a été analysée sans compensateur ($Q_{comp} = 0$)

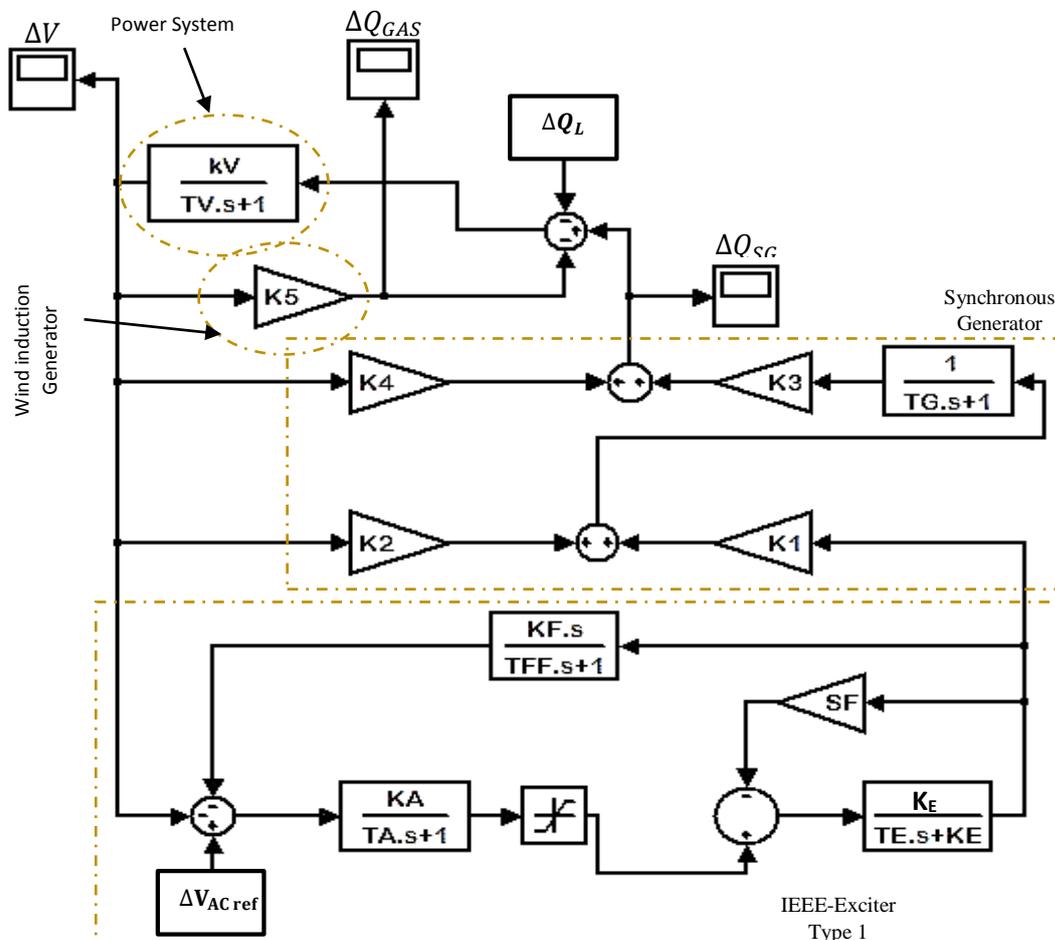


Fig.IV.1 : Schéma bloc du système Diesel-Eolienne sans compensation de puissance réactive

IV.2.1 : Résultats de simulation

La fig. Fig.IV.2 montre les résultats obtenus en termes de déviation de tension ΔV , au jeu de barre principale, avec différentes valeurs de variation de la puissance réactive de la charge $\Delta Q_L = 1\%$, $\Delta Q_L = 2\%$, $\Delta Q_L = 3\%$.

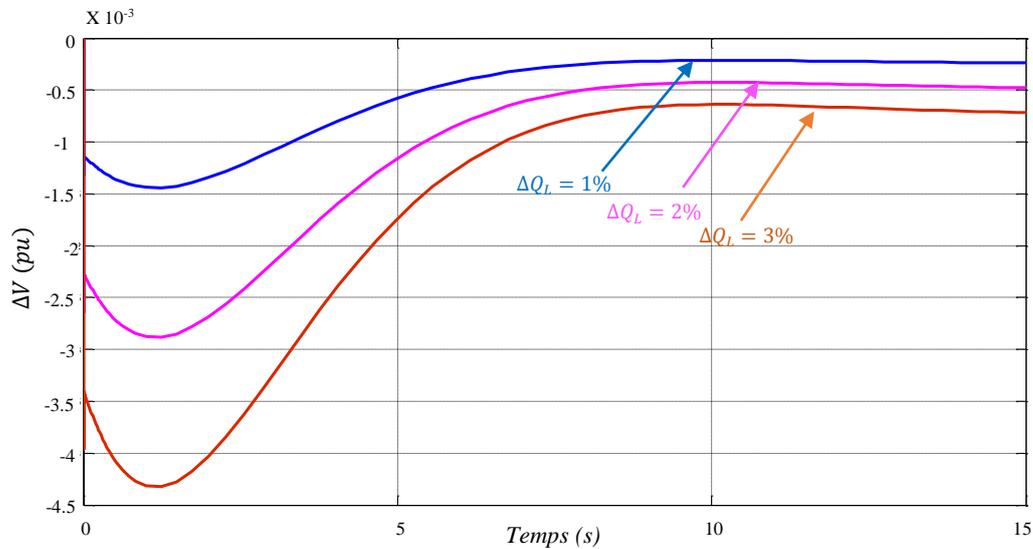


Fig.IV.2 : déviation de la tension au jeu de barre pour différentes variation de la charge réactive

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

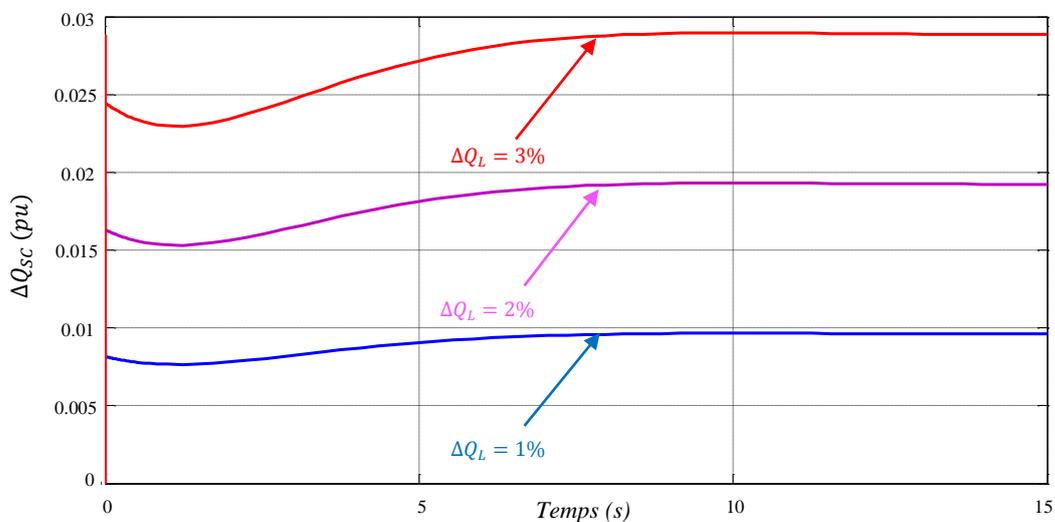


Fig.IV.3 : la réponse en puissance réactive de générateur synchrone du Diesel en réponse aux différentes variations de la charge.

IV.2.2 : Interprétation des résultats de simulation

On observe à chaque fois des transitoire 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 13s - mais elle ne s'annule pas -, 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 13s, toutefois on remarque que le manque n'est pas complètement fourni pour des grandes variations au niveau de la charge, ce qui laisse une déviation de tension qui persiste.

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

IV.3 Simulation du système sans compensation et avec le contrôleur PI

Le système de la fig.IV.1 a été simulé en employant toujours les paramètres du tableau A.1 dans l'annexe. Mais cette fois-ci on a ajouté un régulateur PI dans le système d'excitation, La tension de jeux de barre principale a été analysée sans compensateur ($Q_{comp} = 0$).

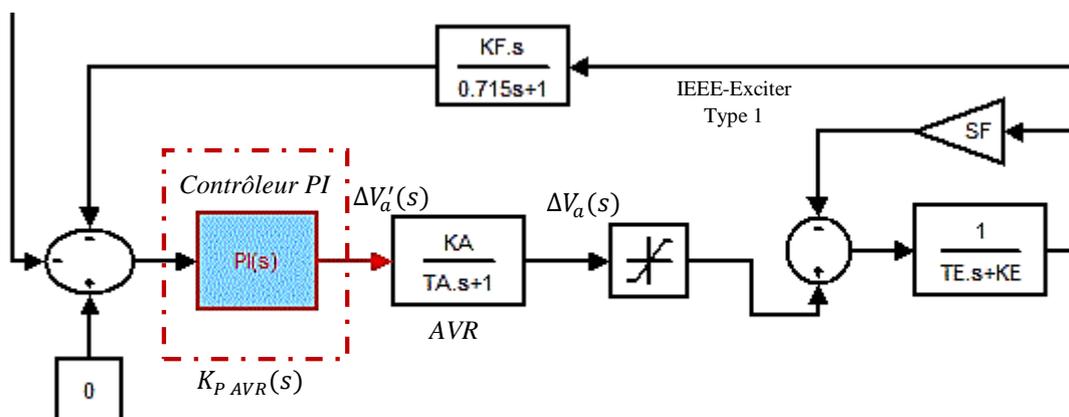


Fig.IV.4 : Schéma bloc du système d'excitation IEEE type 1, avec contrôleur PI.

IV.3.1 : Résultats de simulation

La fig. Fig.IV.5 montre les résultats obtenus en termes de déviation de tension ΔV , au jeu de barre principale, sans et avec le contrôleur PI. La valeur de variation de la puissance réactive de la charge $\Delta Q_L = 1\%$.

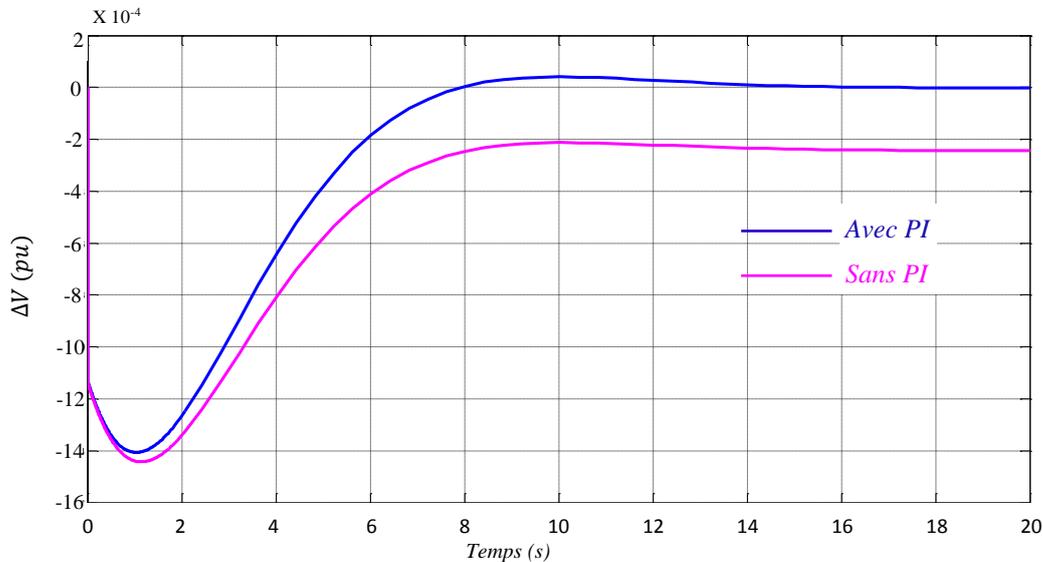


Fig.IV.5 : déviation de la tension au jeu de barre sans et avec le contrôleur PI

La figure Fig.IV.6 montre les réponses en puissance réactive de générateur synchrone du Diesel, avec et sans contrôleur PI. La valeur de variation de la puissance réactive de la charge $\Delta Q_L = 1\%$.

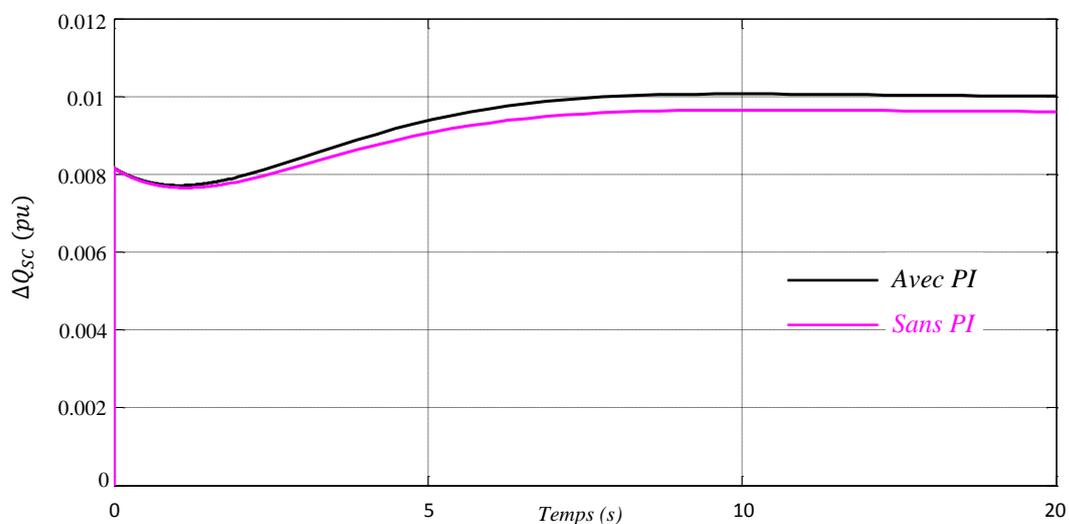


Fig.IV.6 : la réponse en puissance réactive de générateur synchrone du Diesel en réponse avec et sans contrôleur PI

IV.3.2 : Interprétation des résultats de simulation

On observe à chaque fois des transitoire durant approximativement 20s, dans la Fig.IV.5 l'amplitude de déviation de la tension est moins forte lorsqu'on ajoute le contrôleur PI. Avec l'insertion de contrôleur proportionnel intégral (PI) dans le système d'excitation IEEE type 1, la variation de la tension dans le jeu de barre principal elle s'annule complètement après 14s, mais sans le contrôleur proportionnel intégral (PI) la tension tente à s'annuler mais sans y arriver.

Les résultats de la Fig.IV.6 montrent l'évolution de la puissance réactive de générateur synchrone de diesel sans et avec l'insertion de contrôleur proportionnel intégral (PI) dans le système d'excitation IEEE type 1.

Le générateur synchrone tente de satisfaire le manque en puissance réactive grâce à l'action de régulateur de tension avec le contrôleur proportionnel intégral (PI).Le manque en puissance réactive est fourni après 14s, cependant on remarque que le l'insuffisance n'est pas entièrement fournit sans le contrôleur proportionnel intégral.

IV.4 Simulation du système avec le compensateur STATCOM

Le système de la Fig.IV.7 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 de déviation de la tension au jeu de barre principale, ainsi que l'évolution de la puissance réactive des différents composants de système.

IV.4.1 : Résultats de simulation

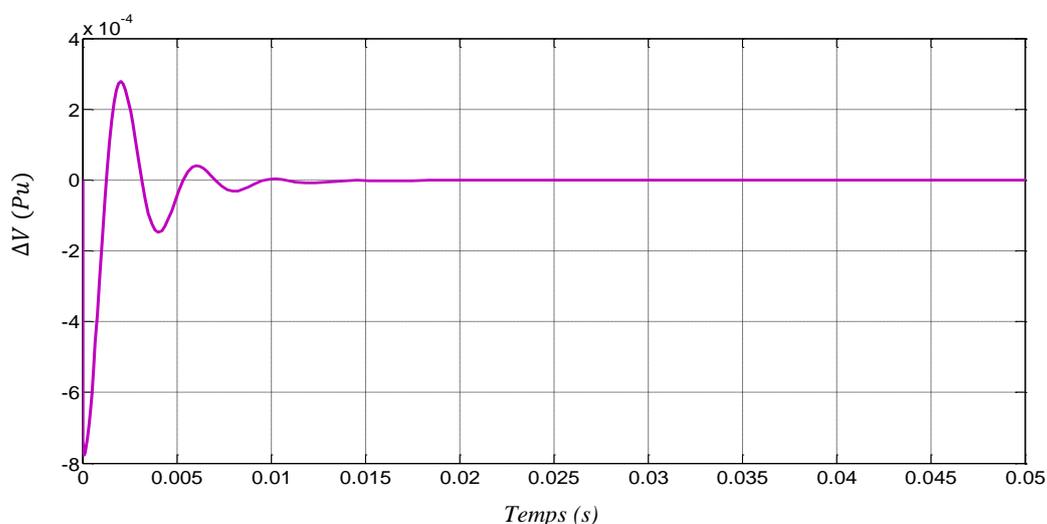


Fig.IV.8 : La déviation de tension au jeu de barre en réponse à une variation de la puissance réactive de la charge (avec compensation par STATCOM)

La Fig.IV.8 montre la déviation de tension au jeu de barre, en réponse à une variation de la puissance réactive de la charge, avec compensation par STATCOM.

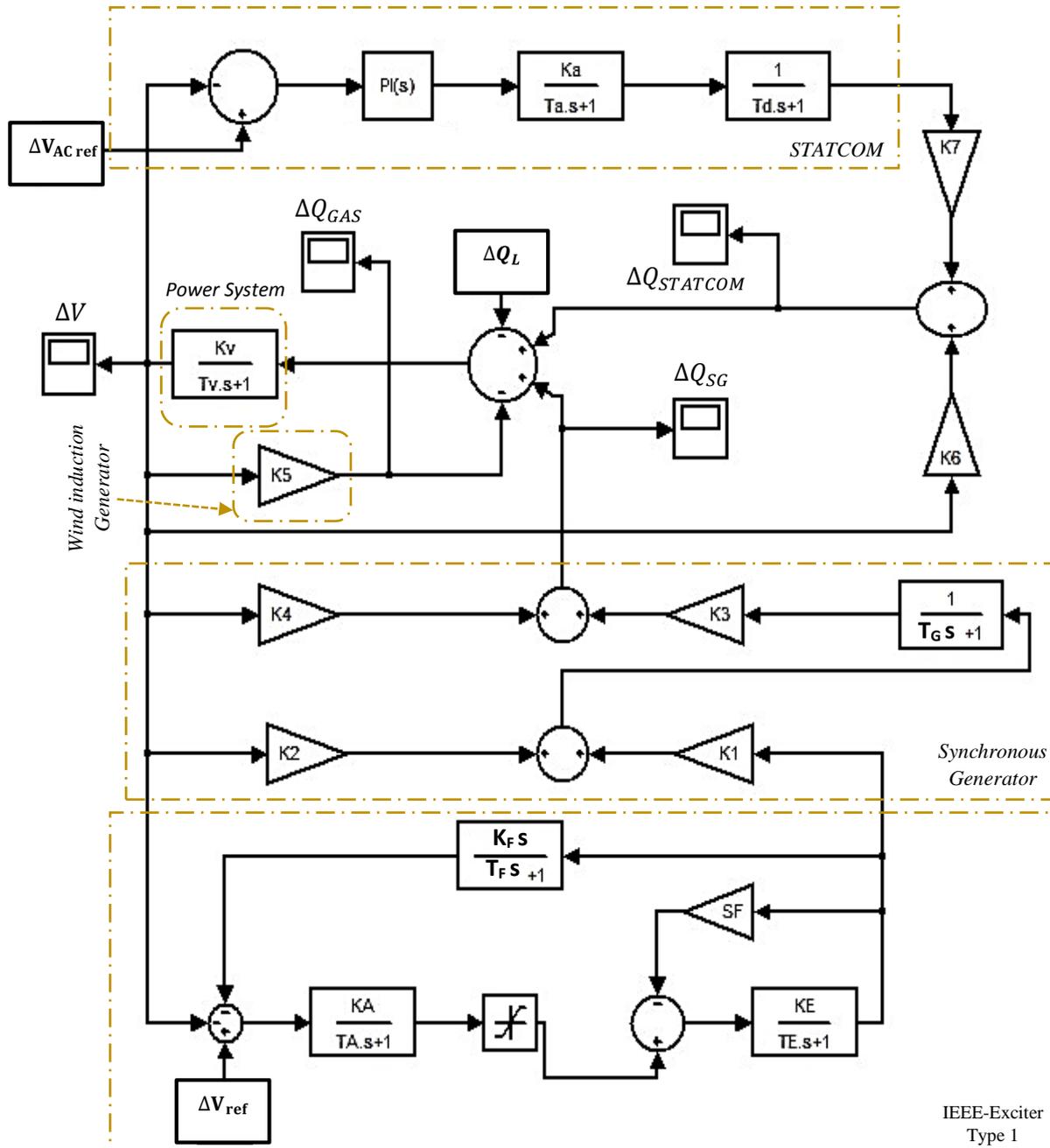


Fig.IV.7 : Schéma bloc du système Diesel-Eolienne avec le compensateur STATCOM

Les Fig.IV.9 et Fig.IV.10 montrent respectivement l'évolution des puissances réactive du diesel, compensateur STATCOM et de l'éolienne en réponse à la variation de la charge.

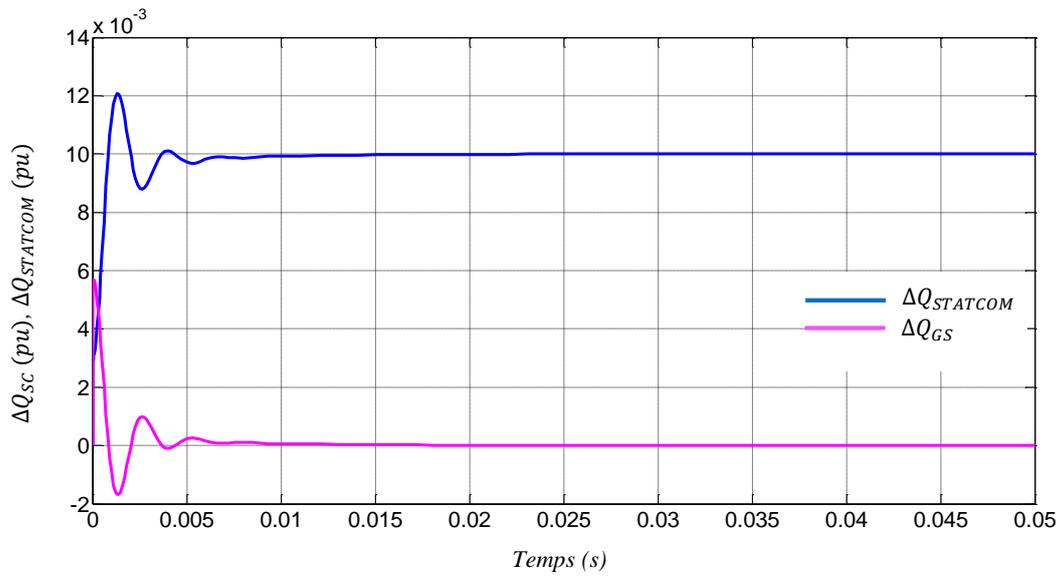


Fig.IV.9 : L'évolution de la puissance réactive du Diesel et de compensateur STATCOM en réponse à la variation de la charge.

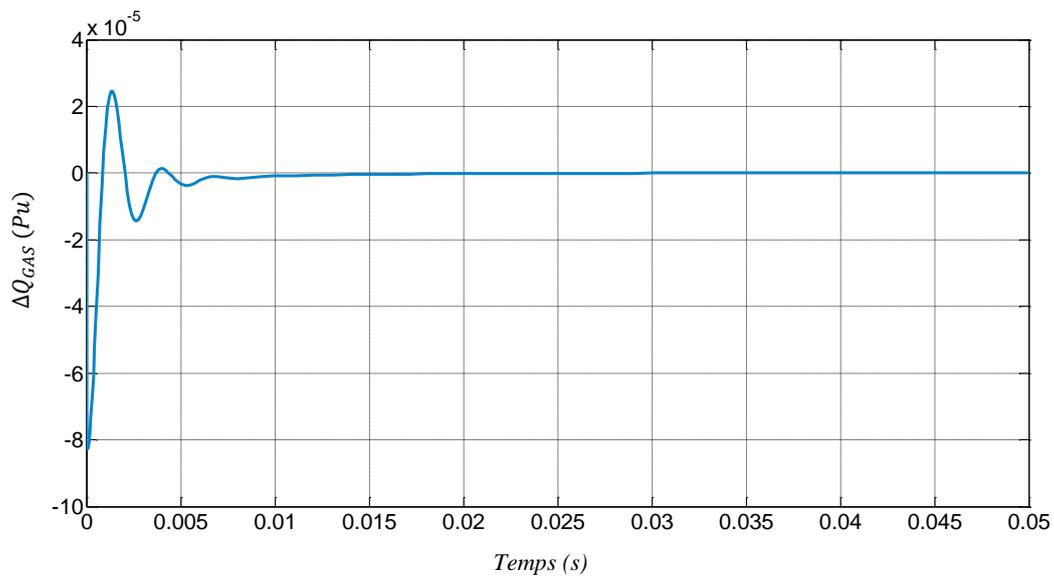


Fig.IV.10 : L'évolution de la puissance réactive dans l'éolienne en réponse à la variation de la charge.

IV.4.2 : Interprétation des résultats de simulation

Dans la Fig. IV.8 qui représente la déviation de la tension au jeu de barre principale durant 0.05s, l'atténuation des transitoires est nettement meilleur en comparaison avec les précédentes expériences, l'état d'équilibre est atteint en seulement 0.0062s, tandis que la déviation en amplitude maximale est de seulement 0.000228 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.

Tableau II : Infos par paliers pour les réponses transitoires, avec le STATCOM.

	ΔV	ΔQ_{GS}	$\Delta Q_{STATCOM}$	ΔQ_{GAS}
Temps de réponse (s)	4.9286e-11	2.1407e-007	7.2901e-04	4.9286e-11
Temps de stabilisation (s)	0.0062	0.0062	0.0059	0.0062
Dépassement min	-7.7394e-04	-0.0017	0.0088	-8.2656e-005
Dépassement max	2.2895e-04	9.9693e-04	0.0121	2.4452e-005
La crête (pic)	7.7394e-04	0.0057	0.0121	8.2656e-005
Temps de la crête (s)	7.4900e-05	7.4900e-005	0.0013	7.4900e-005

La Fig. IV.9 et Fig. IV.10 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 [24].

IV.5 simulation de système hybride autonome diesel employant un GAS/GAS AP

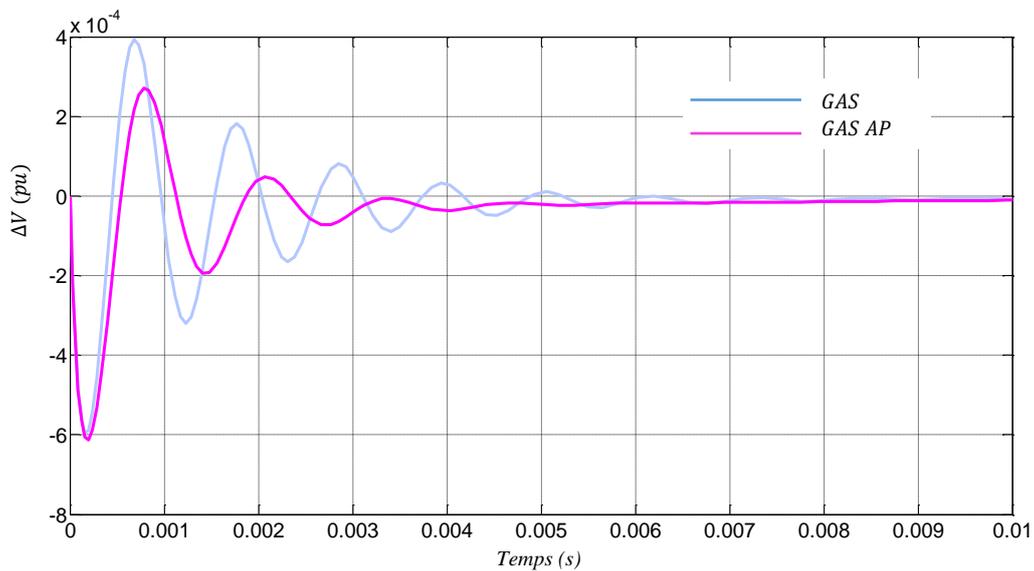
Les résultats de simulation discutés dans cette section sont basés sur les données typiques du système éolien-diesel avec deux différents types de générateurs éoliens : générateur

asynchrone à cage d'écureuil (GAS), et le générateur asynchrone à aimant permanent (GAS AP). En utilisant les données du tableau A.4 dans l'annexe.

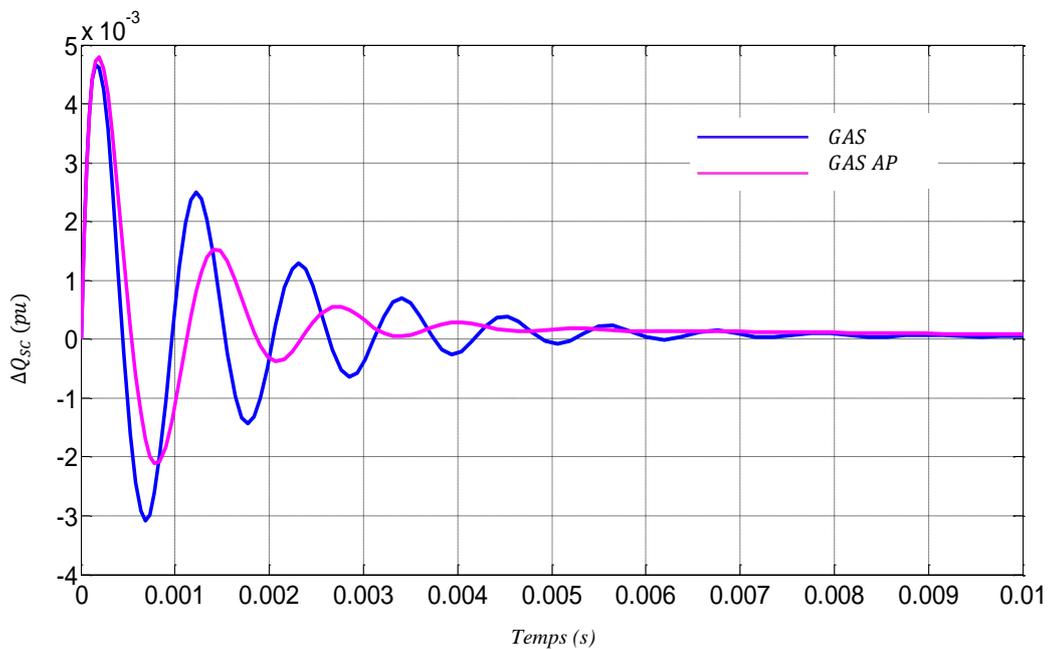
IV.5.1 Résultats de simulation

IV.5.1.1 Premier cas $\Delta Q_L = 0.01 \text{ pu}$, $\Delta P_{IW} = \text{cst}$:

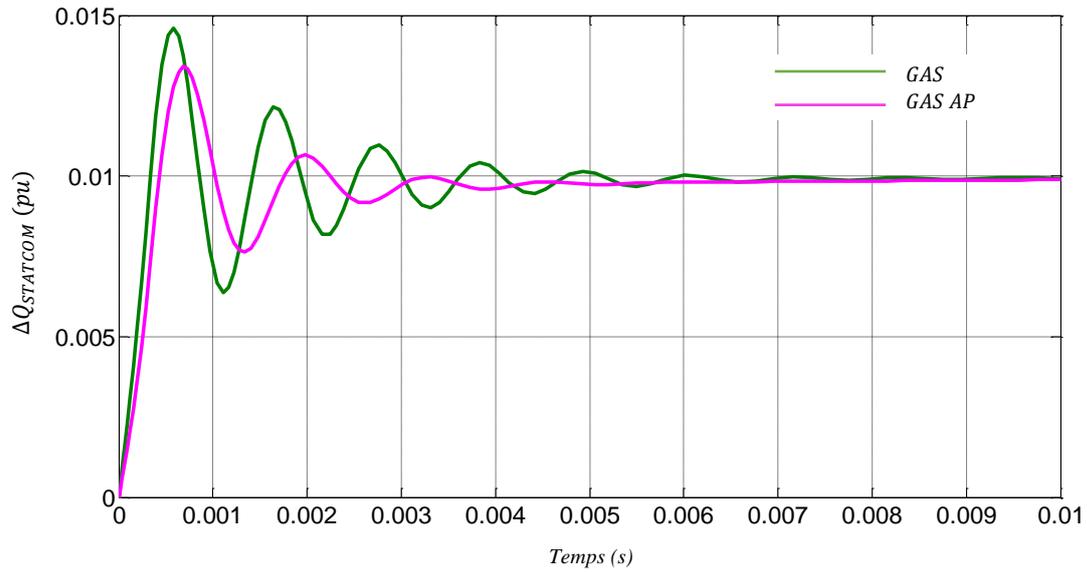
La Fig.IV.11, représente des Réponses dynamiques du système éolien-diesel pour une augmentation par paliers de 1% de la puissance réactive en charge, les signaux sont analysés durant 0.01 s $\Delta Q_L=0.01 \text{ pu}$.



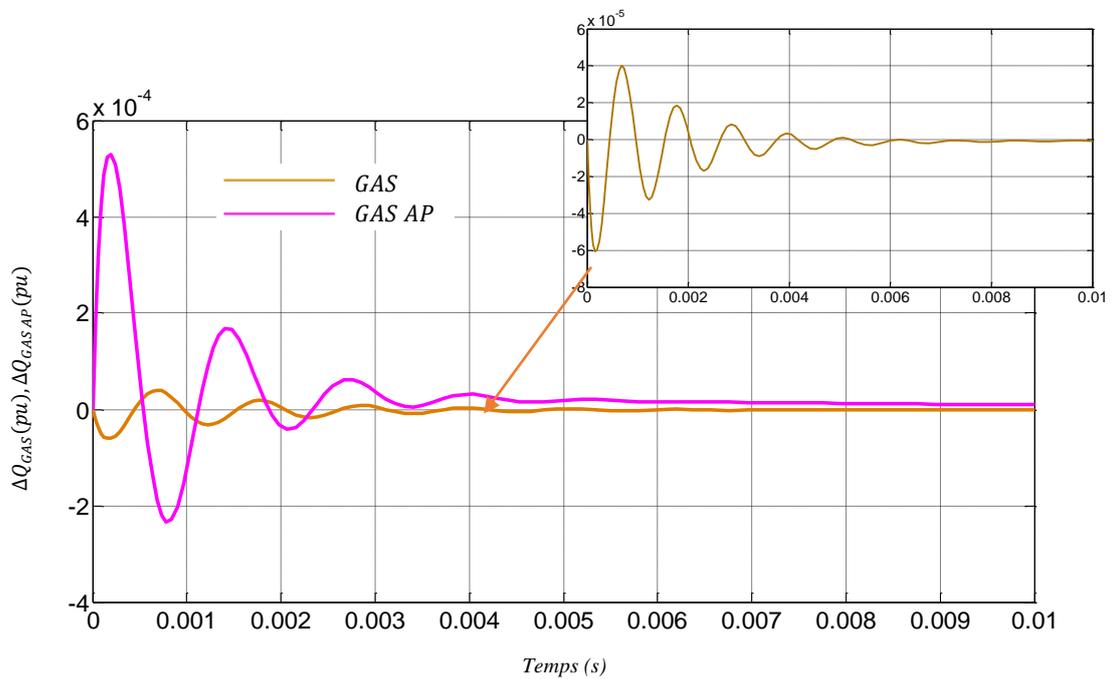
(a) : déviation de la tension au jeu de barre principal



(b) : Evolution de la puissance réactive dans le générateur synchrone du diesel



(c) : Evolution de la puissance réactive dans le compensateur STATCOM.



(d) : Evolution de la puissance réactive dans le GAS et GAS AP.

Fig.IV.11 : Réponses dynamiques du système éolien-diesel pour une augmentation par paliers de 1% de la puissance réactive en charge.

IV.5.1.2 Deuxième cas $\Delta Q_L = \Delta P_{IW}$:

La Fig.IV.13, représente des Réponses dynamiques du système éolien-diesel pour une variation aléatoire par paliers de la puissance réactive de la charge et de la puissance du vent d'entrée comme le montre la Fig.12, 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 1.2 s.

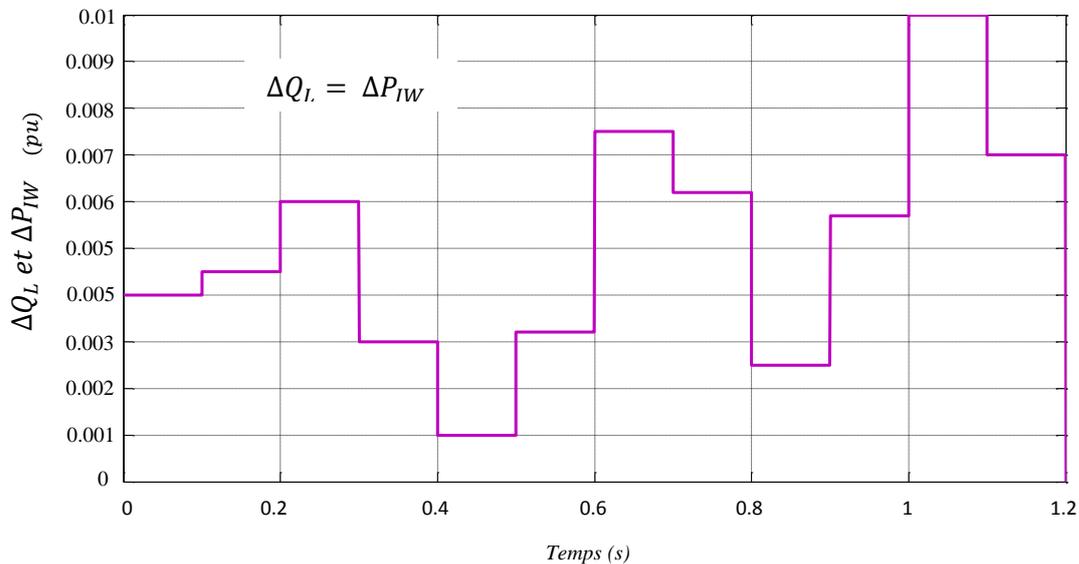
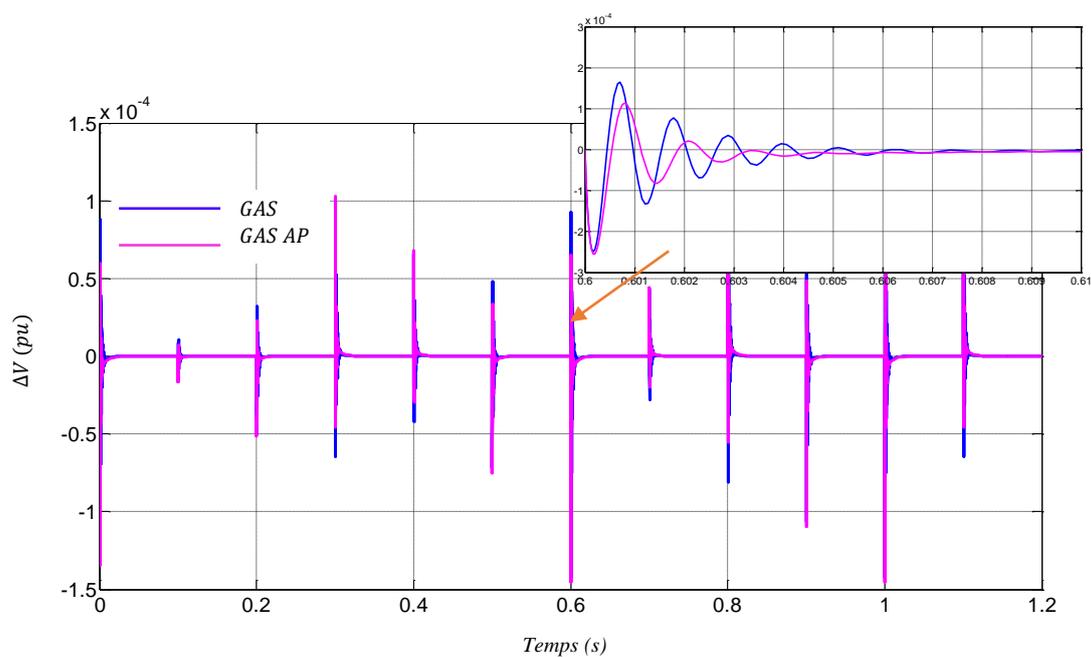
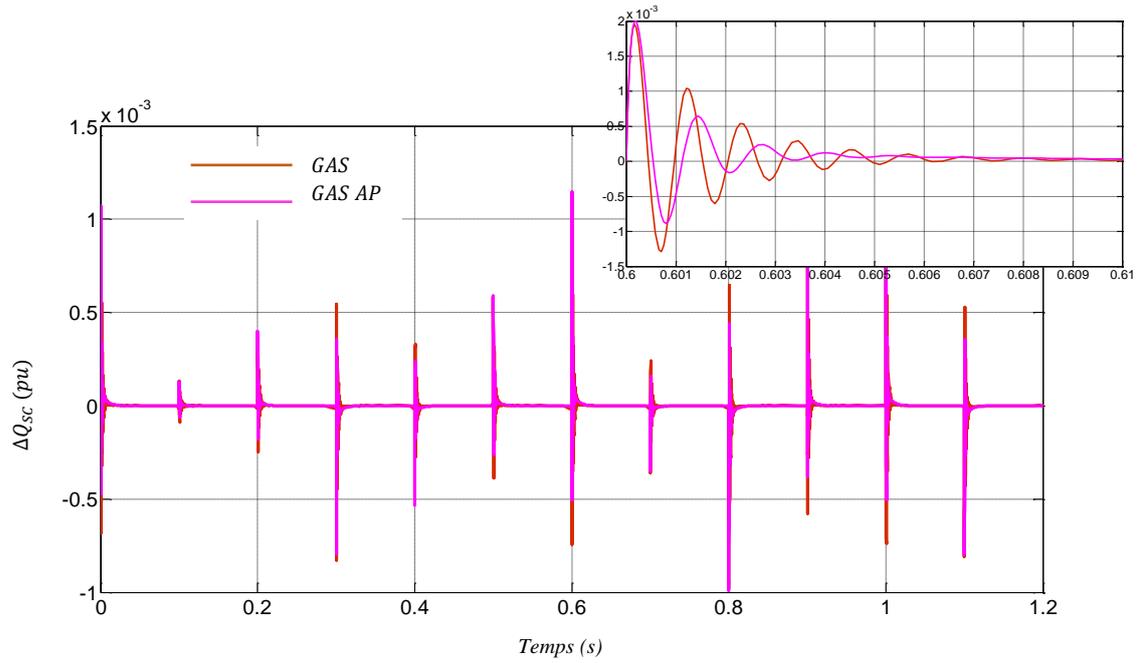


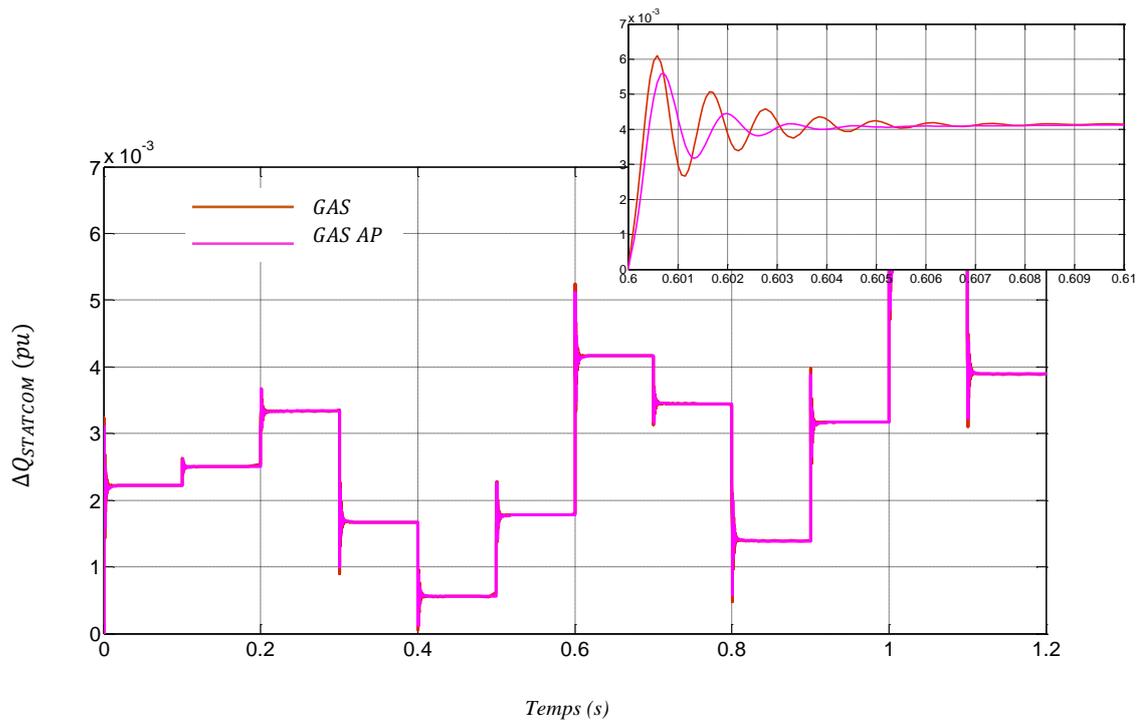
Fig.12 : Type de variation aléatoire par paliers de la puissance réactive de la charge et la puissance de vent d'entrée.



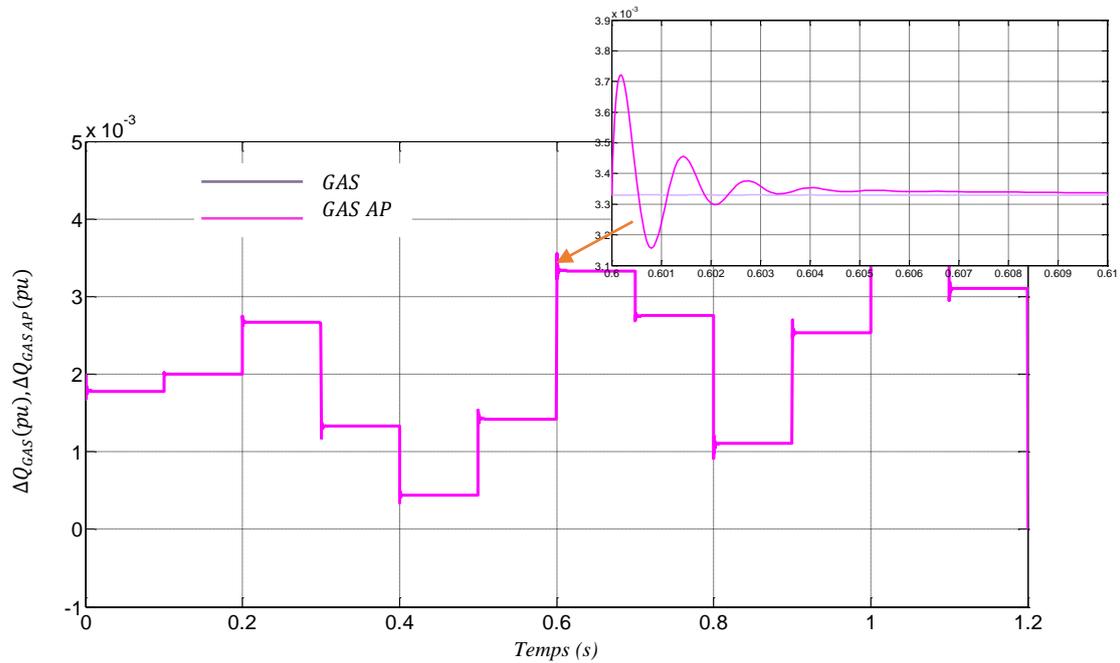
(a) : déviation de la tension au jeu de barre principal



(b) : Evolution de la puissance réactive dans le générateur synchrone du diesel



(c) : Evolution de la puissance réactive dans le compensateur STATCOM.



(d) : Evolution de la puissance réactive dans le GAS et GAS AP.

Fig.IV.13 : Réponses dynamiques du système éolien-diesel pour un changement d'étape aléatoire dans la puissance réactive de la charge plus un changement d'étape aléatoire dans l'énergie éolienne d'entrée $\Delta Q_L = \Delta P_{IW}$

IV.5.1.3 troisième cas :

La Fig.IV.15, représente des Réponses dynamiques du système éolien-diesel pour une variation aléatoire par paliers de la puissance réactive de la charge et de la puissance du vent d'entrée comme le montre la Fig.14. Les signaux sont analysés durant 1.2 s.

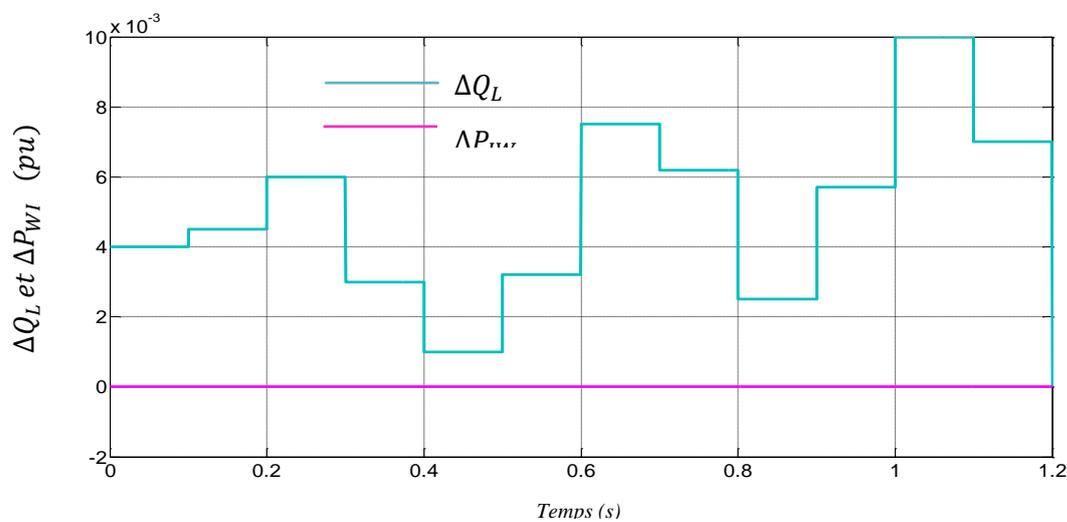
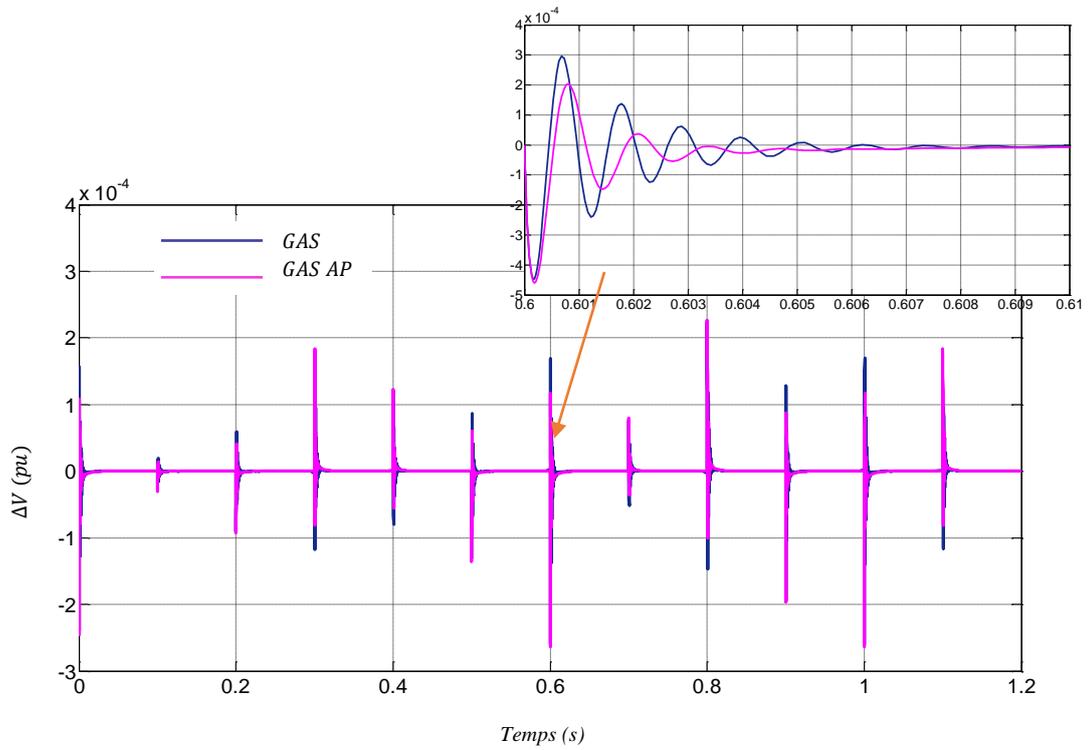
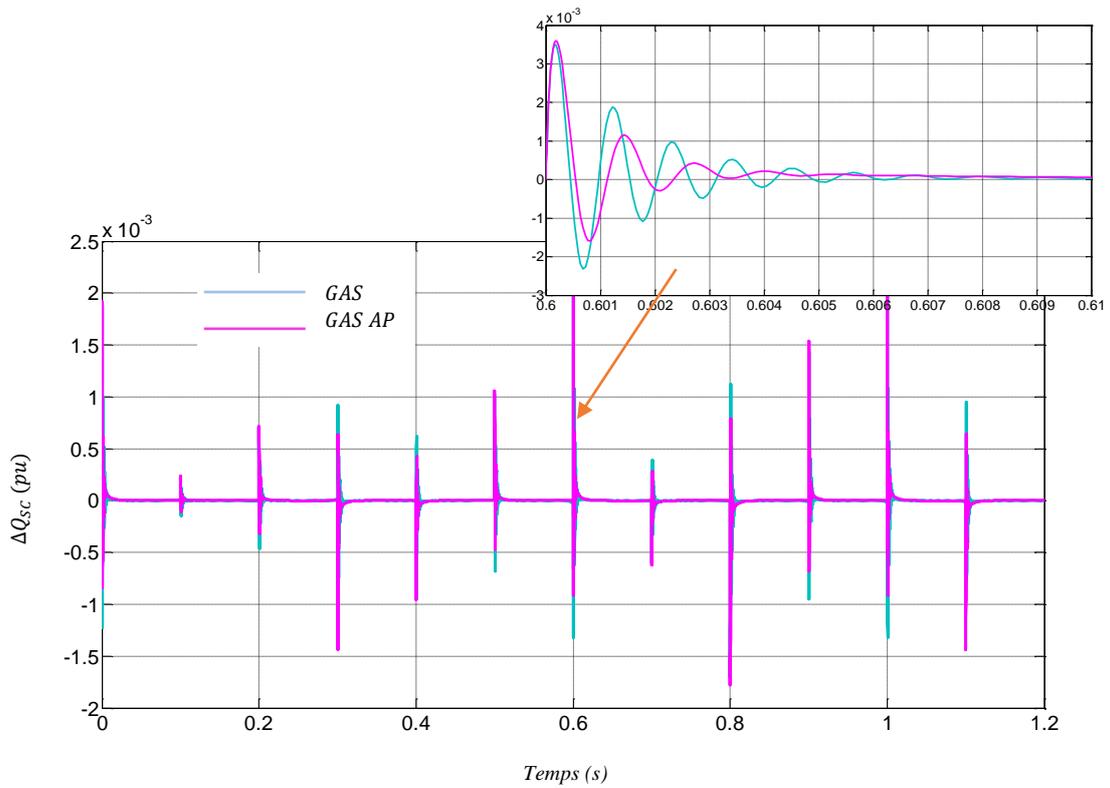


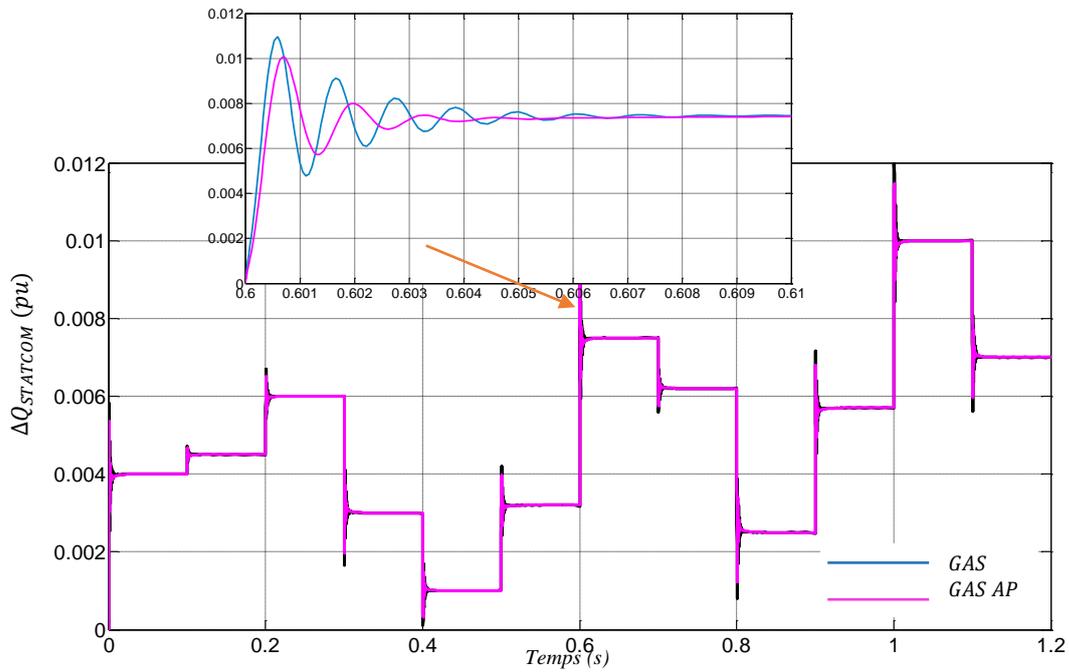
Fig.14 : Type de variation aléatoire par paliers de la puissance réactive de la charge et la puissance de l'éolienne.



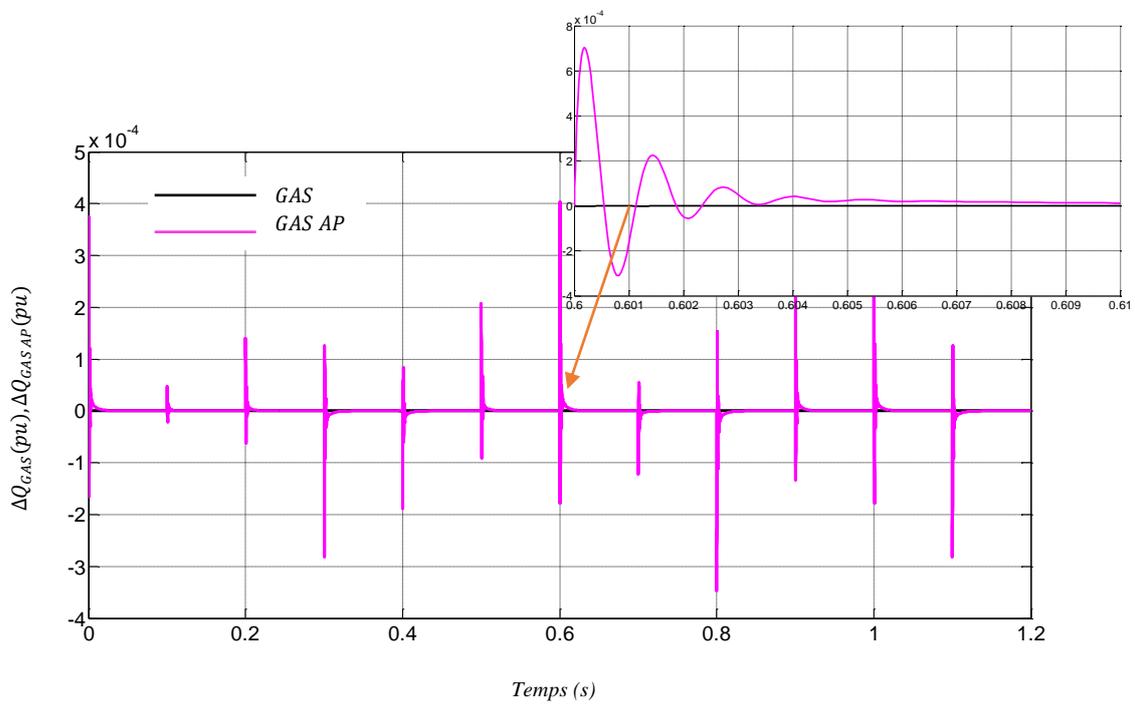
(a) : déviation de la tension au jeu de barre principal



(b) : Evolution de la puissance réactive dans le générateur synchrone du diesel



(c) : Evolution de la puissance réactive dans le compensateur STATCOM.



(d) : Evolution de la puissance réactive dans le GAS et GAS AP.

Fig.IV.15 : Réponses dynamiques du système éolien-diesel pour un changement d'étape aléatoire dans la puissance réactive de la charge plus un changement d'étape aléatoire dans l'énergie éolienne d'entrée $\Delta P_{IW} = 0$

IV.5.3 interprétation des résultats

Dans la Fig. IV.12.a, 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.

Tableau III : Infos par paliers pour les réponses transitoires avec GAS et GAS AP. pour $\Delta Q_L = 0.01 \text{ pu}$, $\Delta P_{TW} = \text{cst}$.

	ΔV		ΔQ_{GS}		$\Delta Q_{STATCOM}$		ΔQ_{GAS}	
	GAS	GAS AP	GAS	GAS AP	GAS	GAS AP	GAS	GAS AP
T. de stabilisation	0.0066	0.0054	0.0066	0.0054	0.0055	0.0041	0.0066	0.0054
Dépassement max	3.928 ^{e-4}	2.696 ^{e-4}	0.0047	0.0048	0.0146	0.0134	3.991 ^{e-5}	5.299 ^{e-4}
La crête (pic)	5.967 ^{e-4}	6.125 ^{e-4}	0.0047	0.0048	0.0146	0.0134	6.0625 ^{e-5}	5.299 ^{e-4}
Temps de la crête (s)	1.704 ^{e-4}	1.860 ^{e-4}	1.704 ^{e-4}	1.860 ^{e-4}	5.759 ^{e-4}	6.921 ^{e-4}	1.704 ^{e-4}	1.86 ^{e-4}

Le dépassement maximal est plus grand dans le cas de GAS, il est près de $3.928 \cdot 10^{-4}$ pu tandis que pour le cas d'utilisation de GAS AP, il est de $2.696 \cdot 10^{-4}$ pu.

L'état d'équilibre dans le cas de GAS AP est atteint après 0.0054s, tandis que pour le cas de GAS est atteint après 0.0066s, mais dans les deux cas l'équilibre est atteint après un temps suffisamment rapides, grâce à l'action du compensateur STATCOM. Une déviation de tension de $-3.6660 \cdot 10^{-4}$ pu persiste dans le régime permanent 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 $-8.1578 \cdot 10^{-9}$ 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.11.b, Fig. IV.11.c et Fig. IV.11.d

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 importante par rapport au GAS.

Dans le deuxième et troisièmes cas les Fig.13 et Fig.15 montrant l'écart de la tension du bus de système ΔV , les écarts de la production d'énergie réactive diesel ΔQ_{GS} , la production d'énergie réactive éolienne ΔQ_{GAS} et la production d'énergie réactive par STATCOM $\Delta Q_{STATCOM}$.

Tableau IV : Infos par étape pour les réponses transitoires avec GAS et GAS AP. Pour une variation aléatoire par paliers de la puissance réactive de la charge et la puissance de l'éolienne.

	ΔV		ΔQ_{GS}		$\Delta Q_{STATCOM}$		ΔQ_{GAS}	
	GAS	GAS AP						
T. de stabilisation	0.0066	0.0054	0.0066	0.0054	0.0055	0.0041	0.0066	0.0054
Dépassement max	$8.737 \cdot 10^{-5}$	$5.998 \cdot 10^{-5}$	0.001	0.001	0.0032	0.0030	0.0018	0.0020
La crête (pic)	$1.327 \cdot 10^{-4}$	$1.362 \cdot 10^{-4}$	0.001	0.001	0.0032	0.0030	0.0018	0.0019
Temps de la crête (s)	$1.703 \cdot 10^{-4}$	$1.858 \cdot 10^{-4}$	$1.703 \cdot 10^{-4}$	$1.858 \cdot 10^{-4}$	$5.756 \cdot 10^{-4}$	$6.920 \cdot 10^{-4}$	$6.862 \cdot 10^{-4}$	$1.858 \cdot 10^{-4}$

On constate que, bien que l'augmentation de la perturbation augmente le premier pic des variables du système, le temps de sédimentation reste à peu près le même.

On observe que l'écart de tension (première crête et oscillations ultérieures) se stabilise rapidement en ce qui concerne la production d'énergie éolienne par GAS AP que celui de GAS, ce qui est dû à l'action rapide du STATCOM.

Il est montré que le générateur diesel ne fournit la puissance réactive de charge requise que dans des conditions transitoires, comme montre la Fig.13.b et Fig.15.b. Le STATCOM fournit la puissance réactive de charge requise en régime permanent, comme illustré à la Fig.13.c et Fig.15.c.

Les résultats obtenus, sont similaires aux résultats, du travail plus détaillé dans l'article scientifique [36,37].

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, le dispositif FACTS STATCOM est considéré comme le compensateur 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.

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. Un exemple de système d'énergie éolienne hybride diesel a été considéré pour des performances dynamiques stables avec le dispositif FACTS: STATCOM. Il a été démontré que STATCOM est un meilleur choix pour amortir les oscillations transitoires dues à des perturbations. Le système atteint l'état d'équilibre en très peu de temps avec STATCOM et il absorbera ou produira de la puissance réactive selon les exigences du système. Certaines des réponses transitoires ont également été démontrées pour des conditions de gain optimales. Les résultats prouvent que la tension du bus de charge du système étudié peut être stabilisée avec succès en utilisant le contrôle PI avec une erreur de stabilité nulle et un très petit dépassement

maximum et un temps de stabilisation très faible contre les variations de puissance éolienne d'entrée et/ou de puissance réactive de charge.

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, car le GAS AP nécessite moins de puissance réactive à la tension nominale.

Références bibliographiques

- [1]. Mariana Kamel, Abdel Rahman Karrer, Ahmed Eltom, "Development and Application of a New Voltage Stability Index for On-Line Monitoring and Shedding," *IEEE Trans. Power Systèmes*, vol. 33, pp.1231-1241, July. 2017.
- [2]. Djohra Saheb, "Système hybride de production d'électricité," *Éditions universitaires européennes*, May 2014, pp.1-236.
- [3]. Venkataramana Ajjarapu, "Computational Techniques for Voltage Stability Assessment and Control," Springer, pp. 1-250, December 2006.
- [4]. Thierry van Cutsem, Costas Vournas, "Voltage Stability of Electric Power Systems," Springer, 1 edition, pp. 1-378, October 2007.
- [5]. K. Chakraborty, A. Chakrabarti, "Soft Computing Techniques in Voltage Security Analysis," Springer, pp. 1-221, November 2016.
- [6]. J. Hossain, H. R. Pota, "Robust Control for Grid Voltage Stability: High Penetration of Renewable Energy," Springer, pp. 1-311, July 2014.
- [7]. A. Kazemi, and B. Badrzadeh, "Modeling and Simulation of SVC and TCSC to Study their Limits on Maximum Load ability Point," *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 26, pp. 619-626, Apr. 2004.
- [8]. 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.
- [9]. ZZ T.G. Over bye 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.
- [10]. R. Yan, N. A. Masood, T. K. Saha, F. Bai, H. GU, "The Anatomy of the 2016 South Australia Blackout: A Catastrophic Event in a High Renewable Network," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol., pp. 1-14, mars 2018
- [11]. O. P. Veloza and F. Santamaria, "Analysis of major blackouts from 2003 to 2015: classification of incidents and review of main causes," *The Electricity Journal*, vol. 29, no. 7, pp. 42-49, 2016.

- [12]. M. Hasani and M. Parniani, "Method of Combined Static and Dynamic Analysis of Voltage Collapse in Voltage Stability Assessment," IEEE Conferences, pp. 1-6, 2005
- [13]. E. V. Larsen and D. A. Swann, "Applying power system stabilizers parts I–III," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-100, no. 6, pp. 3017–3046, Jun. 1981.
- [14]. Discover the World of FACTS Technology, Answers for energy, Siemens AG, 2010
- [15]. T. Andy Thuebou Tameghe, "modélisation et simulation d'un système de jumelage diesel –éolien alimentant une charge locale," Maitrise en Ingénierie, Université de Québec en Abitibi-Témiscamingue, Aout 2012
- [16]. Baghdâdi fazia, "modélisation et simulation des performances d'une installation hybride de conversion d'énergie renouvelable," mémoire de magister, université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, soutenu le 26/09/2011.
- [17]. N. M. Tabatabaei, A. J. Aghbolaghi, N. Bizon, F. Blaabjerg, "reactive power control in ac power systems," Springer International Publishing AG 2017.
- [18]. R. C. Bansal, "Modelling and automatic reactive power control of isolated wind-diesel hybrid power systems using ANN," Energy Conversion and Management, no. 49, pp. 357–364, 2008.
- [19]. RC Bansal, T.S Bhatti ,D.P Kothari, "Automatic reactive power control of isolated wind-diesel hybrid power systems for variable wind speed/ sleep," electric power components and systems, no. 32, pp. 901-902, 2004.
- [20]. T. W. Mon, and M. M. Aung, "Simulation of synchronous machine in stability study for power system," international journal of electrical and electronics engineering 1:1 2008.
- [21]. S. Vachirasricirikul, I. Ngamroo, S. Kaitwanidvilai, "Coordinated SVC and AVR for robust voltage control in a hybrid wind-diesel system," energy conversion and management no. 51, pp. 2383-2392, 2010.
- [22]. P. Sharma, N. K. Saxena, T.S Bhatti, "Study of autonomous hybrid power system using SVC and STATCOM," Third international conference on power systems, INDIA, pp. 27-29, December 2009.

- [23]. N. Rana, S. Aggarwal, “Reactive power compensation using STATCOM,” National conference on Advancements in Alternate energy Resources for rural Applications, 2015.
- [24]. Nitin Saxena, “Autonomous hybrid power system using STATCOM,” MIT International Journal of electrical and instrumentation engineering vol. 1, no. 1, pp. 49-53, Jan 2011.
- [25]. P. Sharma, N. K. Saxena, K. S. S. Ramakrishna, and T. S. Bhatti, “Reactive Power Compensation of isolated wind-diesel hybrid power systems with STATCOM and SVC,” International Journal on Electrical Engineering an Informatics, vol. 2, no. 3, 2010.
- [26]. A. Canezars, M. Pozzi, S. Corsi, and E. Uzunovic, “STATCOM Modelling for voltage and angle stability studies,” Electrical power and energy systems, vol. 25, pp. 1-20, 2003.
- [27]. K. Malarvizhi, K. Baskaran, “ Reactive power compensation and stability analysis of fixed speed wind generators using STATCOM integrated with energy storage devices,” International Journal of sustainable energy, pp. 367-375, 2011.
- [28]. A. Chakraborty, S. K. Musunuri, A. K. Sravastava, and A. K. Kondabathini, “Integrating STATCOM and battery energy storage system for power system transient stability: A review and application,” Hindawi Publishing Corporation advances in power electronics, Article ID 676010, pp. 1-12, 2012
- [29]. Federico Milano, “Advances in power modelling, control and stability analysis,” the institution of engineering and technology, Edited by Federico Milano, no. 211014, 2016.
- [30]. David Edwards, and Michael Negnevetsky, “Designing a wind-diesel hybrid remote area power supply (RAPS) system,” IEEE, ICSET 2008.
- [31]. Ray Hunter, and George Elliot, “Wind-diesel systems: A Guide to the Technology and its Implementation,” Cambridge University Press, 1994.
- [32]. H. Ibrahim, M. Dimitrova, Y. Dutil, D. Rousse, A. Ilinca, J. Perron, “Wind-Diesel hybrid system: energy storage system selection method,” The 12th International Conference on Energy Storage, GREA, 2012.

- [33]. Ramesh Bansal, “Handbook of Distributed Generation: Electric Power Technologies, Economics and Environmental Impacts,” Springer International Publishing, 2017.
- [34]. Venkata Yaramasu, Bin Wu, “Model Predictive Control of Wind Energy Conversion Systems,” Institute of Electrical and Electronics Engineers, 20 December 2016.
- [35]. Feddaoui Omar, “Contribution à l’Etude des Systèmes Hybrides de Génération : Application aux Energies Renouvelables,” Mémoire de Magister, Université de Souk-Ahras, 2013-2014.
- [36]. P. Sharma, W. Murkowski, B. Hoff, “Dynamic stability study of an isolated wind diesel hybrid power system with wind power generation using IG, PMIG and PMSG: A comparison,” *Electrical Power and Energy Systems* vol. 53, pp. 857–866, 2013.
- [37]. I. K. Aidoo, P. Sharma, B. Hoff, “Optimal controllers designs for automatic reactive power control in an isolated wind-diesel hybrid power system,” *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 81, pp. 387–404, 2016.
- [38]. 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.

Annexes

Tableau A.1 : Paramètres du système Diesel-Eolienne sans compensateur de puissance réactive [38].

Charge du système/ puissance	
Puissance de l'éolienne (KW)	150
Puissance de diesel (KW)	150
Puissance de la charge (KW)	250
Puissance apparente de la base (KVA)	250
Générateur synchrone (GS)	
$P_{GS}, pu KW$	0.4
$Q_{GS}, pu KVAR$	0.2
E_q, pu	1.1136
$\delta, ^\circ$	21.05
E'_q, pu	0.9603
V, pu	1.0
X_d, pu	1.0
X'_d, pu	0.15
T'_{d0}	5.0
T_G	0.75
Générateur asynchrone (GAS)	
$P_{GAS}, pu KW$	0.6
$Q_{GAS}, pu KVAR$	0.189
$P_{in}, pu KW$	0.75
$\eta_{GAS}, \%$	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
Système d'excitation IEEE Type-1	
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
Constantes	
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, s	0.000106

Tableau A.2 : données de STATCOM [27].

Données du STATCOM	
T_α, s	0.0002
T_d, s	0.00167
Constantes	
K_6	5.152869
K_7	-3.8347
K_I	5000
K_P	31

Tableau A.3 : Paramètre du système considéré pour la comparaison des GAS et GAS AP [36].

Capacité de production éolienne (KW)	Eolienne	Diesel	Totale
Puissance (KW)	1500	1500	3000
Charge (KW)	1500	1000	2500
Puissance apparente de base (KVA)	2500		
Tension de base (V)	400		

Paramètre de système	GS	GAS	GAS AP
$P_{GS}, pu \text{ KW}$	0.4	/	/
$Q_{GS}, pu \text{ KVAR}$	0.2	/	/
E_q, pu	1.1136	/	/
$\delta, ^\circ$	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	/	/
$P_{GAS}, pu \text{ KW}$	/	0.6	0.6
$Q_{GAS}, pu \text{ KVAR}$	/	-0.2906	0
$\eta_{GAS}, \%$	/	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
Système d'excitation IEEE Type-1			
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

Donnée du compensateur STATCOM		
$T_{\omega, S}$	0.00025	
T_d, S	0.00167	
Constante de STATCOM	GAS	GAS AP
K_8	5.152869	3.36
K_9	-3.8347	-2.5
K_I	7090.9	7120.4
K_P	44.64	47.3

Constante	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	0.444	0.444
K_7	-0.09747	-0.8651
K_V	0.6667	0.6667
T_V	7.34e-4	7.34e-4