REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Electrique
Spécialité : Réseaux Electriques

Connexion d'une ferme d'éolienne à une réseau HVDC

Présenté par :

M^{lle} : BENTAYA Fatma Zohra

M^{lle}: ZITOUNI Zahia

Proposé et Dirigé par :

Mr : HENINI Noureddine

Promotion 2019

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont tout premièrement, à dieu le tout puissant de m'avoir donné courage et patience durant la réalisation de ce travail.

je voudrais exprimer ma gratitude et mes sincères remerciements à tous mes professeurs distingués pour leur soutien constant et les conseils qu'ils nous ont donnés au cours de nos études.

Après cela, je voudrais remercier mon encadreur Mr Hanini Noureddine pour sa coopération et son soutien, qui ont été grandement appréciés.

De la même manière, je remercie également tous les membres du jury.

Je voudrais aussi remercier en particulier les camarades de classe.

Je remercie également ceux qui ont contribué directement ou indirectement à nous aider à accomplir ce travail.

Merci à tous!

ملخص

إن HVDCوخصوصا HVDC-VSCتسمح بتحكم سريع ودقيق في التواتر وتدفق الطاقة حيت تعد تكنولوجيا موثوق بها واقتصادية وباستطاعتها تدعيم الشبكات ذات التوتر المتناوبCA .تكنولوجياHVDC-VSC تستطيع ربط أكبر مزارع الطاقة الهوائية البحرية بالشبكات الموجودة على اليابسة .

أكبر محطات الطاقة الهوائية المربوطة بالشبكة الكهربائية تستطيع أن تساهم في استغلال شبكات النقل CA وعلى سبيل المثال المثال التحكم في التوترات واستقرار الشبكة .إن قدرة التكنولوجيا HVDC-VSC بإعطاء تحكم في الطاقة فعال وتفاعلي مستقل يمكن استعماله لتدعيم شبكة النقل الكهربائيCA وذلك يترجم في عديد المزايا التقنية والإقتصادية لمشغلي الشبكات الكهربائية .

إن كبر حجم محطات الطاقة الهوائية وما تسببه من ضجيج وحجب للرؤية وكذلك نظرا لإرتفاع سرعة الرياح يجعل تطبيقات الطاقة الهوائية في البحر أكثر نجاعة منه في البر,إلا أن وضع المزارع البحرية له عدة تحديات مربوطة بالبناء والتجهيز ونقل الطاقة . وهذه الأخيرة تتطلب جهد كبير من أجل مزارع الطاقة الهوائية البحرية فعالة خاصة في ظل المسافة الطويلة بينها وبين اليابسة.

الحل الذي يمكنه أن يؤدي لتجاوز هذا المشكل هو إستعمال أنظمة نقل تعتمد على تكنولوجيا VSC ,فالمزايا الرئيسية لهذه الأنظمة مربوطة أساسا بالصناعات والتكلفة .الهدف من هذه المذكرة هو نمذجة وتحليل يعتمد اساسا على مقوم غير متحكم فيه السلوك الديناميكي لنظام النقلHVDC-VSCمربوط بمحطة طاقة هوائية.

كلمات مفتاحية: محول(HVDC-VSC) , المزارع الهوائية.

Résumé

La technologie HVDC, plus particulièrement sa version HVDC-VSC, autorise un réglage rapide et précis des tensions et flux de puissance. Fiable et économique, elle peut renforcer la flexibilité des réseaux en courant alternatif (CA) existants. HVDC-VSC est aussi « sur le pont » pour raccorder les grands parcs éoliens marins aux réseaux CA à terre.

Les grands parcs éoliens reliés au réseau électrique, peuvent potentiellement apporter une contribution significative à l'exploitation des réseaux de transport CA, avec, par exemple, la régulation de la fréquence ou la stabilisation du réseau. L'aptitude de la technologie HVDC-VSC, à fournir un contrôle de puissance active et réactive indépendant peut être utilisée pour soutenir le réseau de transport CA, se traduisant par des avantages techniques et économiques

non négligeables pour les opérateurs des réseaux.

Essentiellement, en raison de l'augmentation de la taille de l'installation éolienne, le bruit, pollution visuelle et aussi grâce à des valeurs élevées de la vitesse du vent, les applications éoliennes en mer sont de plus en plus gagnantes de terrain. Mais le placement des fermes éoliennes en mer se lève beaucoup de défis liés à la construction, l'installation et la transmission d'énergie. Cette dernière exige un grand effort pour rendre les fermes éoliennes en mer fiable, surtout pour les longues distances entre elles et la cote.

La solution qui peut résoudre le problème ci-dessus est l'utilisation d'un système de Transmission basé sur la technologie VSC (Voltage Source Converter).

Les principaux avantages de ces systèmes de transmission sont en relation avec les pertes de transmission ainsi que les coûts. L'objectif de cette thèse, est de modéliser et analyser le comportement dynamique du système de transmission HVDC-VSC basé sur un redresseur non commandé relié à une ferme éolienne en mer.

Mots clés : Convertisseur (HVDC-VSC), Fermes aérobiques

Abstract

The ability of HVDC-VSC technology to provide independent active and reactive power control can be used to support the AC transport network resulting in significant technical and economic benefits for network operators Essentially, due to the increase in the size of the wind power plant, noise, and visual pollution and also due to high wind speed values, offshore winds are gaining more and more compared to onshore ones. But the placement of wind farms at the sea is done with many challenges related to the construction, installation and transmission of energy. The latter requires a great effort to make the offshore wind farms reliable, especially for long distances between them and the coast.

The solution that can solve the above problem is the use of a transmission system based on VSC (Voltage Source Converter) technology. The main advantages of these transmissions systems are related to transmission losses as well as costs. The objective of the is thesis is to model and analyze the dynamic behavior of the HVDC-VSC transmission system based on an uncontrolled rectifier connected to an offshore wind farm.

Key words : (HVDC-VSC) converter , Aerobic farms

Table de Matières

I.1- Introduction générale 1

CHAPITRE I : Généralité sur L'énergie renouvelable et Les liaisons HVDC-VSC

I.1-Introduction 3

l.2.Energie solaire 3

I. 2.1.Energie solaire photovoltaïque 3

I.2.2 -Energie solaire thermique 4

l.3 Biomasse 4

I.4 Géothermie 5

l. 5 Hydraulique 6

l. 1.5 Avantage et inconvénient de l'énergie renouvelable 6

I.1.5.1 Avantage 6

I.1.5.2 Inconvénient 6

I.6 L'éolien 7

I.6.1-Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne 9

I.6.1.1- Avantages 9

I.6.1.2- Inconvénients 10

I.7- Le Système de transmission HVDC-VSC pour la connexion des sources d'énergie éolienne 10

I.8- Aperçu historique sur les systèmes HVDC 11

I.9- Description du système HVDC-VSC 12

I.10- Un Système HVDC basé sur un redresseur non contrôlé et un onduleur VSC pour le raccordement des parcs éoliens en mer 13

I.11- Comparaison de HVDC classique et HVDC-VSC 14

I.12- Avantages de la liaison HVDC-VSC 16

I.13- La transmission courant alternatif haute tension (HVAC) 16

I.14- L'application du système HVDC-VSC pour le raccordement éolien 17

I.15- Technologie HVDC-VSC pour le Parc éolien en mer BorWin 1 17

I.16- Conclusion 18

CHAPITRE II: Fonctionnement et commande d'un parc éolien en mer relié à une liaison HVDC- (Diodes-VSC)

II.1-Introduction…… **19**
II.2- Système HVDC-(Diodes-VSC) pour le raccordement éolien …… **20**
II.2.1- Parc éolien…… **20**
II.2.2- Convertisseurs de la liaison HVDC …… **20**
II.2.3- Transformateurs …… **20**
II.2.4- Filtres et condensateurs shunt …… **21**
II.2.5- Câbles à courant continu …… **21**
II.3- Énergie éolienne…… **22**
II.3.1- Distribution de vent …… **23**
II.4- Description générale du système à étudier…… **23**
II.4.1- Fonctionnement de la turbine éolienne …… **24**
II.4.2- Modélisation du parc éolien offshore …… **25**
II.4.3- La liaison HVDC-(Diodes-VSC) …… **27**
II.4.3.1- Le redresseur non contrôlé à deux ponts…… **27**
II.4.3.2- Câble sous-marin…… **29**
II.4.3.3- L'onduleur HVDC –VS…… **29**
II.4.4- Le réseau terrestre CA …… **33**
II.5- Commande du système étudié …… **33**
II.5.1- Contrôle de la génératrice et contrôle de la tension continue du double Convertisseur **34**
II.5.2- Contrôle de la tension alternative et de la fréquence du réseau offshore CA…… **37**
II.5.3 -Contrôle de l'onduleur terrestre VSC …… **41**
II.5.4.1- Contrôle des courants de l'onduleur terrestre VSC …… **41**
II.5.4.2- Contrôle de tension CC de la liaison HVDC …… **42**
II.5.4.3- Contrôle de la puissance réactive …… **43**
II.6- Conclusion …… **44**

CHAPITRE III : Simulation et analyse de résultat

III .1- Introduction …… **45**
III.2.Simulation de système HVDC-VSC…… **45**
III.3 - Conclusion …… **49**
Conclusion générale …… **50**

Références bibliographiques

LISTES DES FIGURES

Figure I.1 solaire photo voltaïque…… **4**

Figure I.2 solaire thermique …… **4**

Figure I-3 la biomasse ……..…… **5**

Figure I-4 le géothermie ……...… **5**

Figure I-5 Énergie hydraulique …… **6**

FigureI.6 les éoliens …… **7**

FigureI.7 Croissance de la taille des conceptions d'éoliennes commerciales……..… **8**

FigureI.9 Production d'énergie éolienne dans l'UE, jusqu'en 2030 …… **9**

FigureI.10 Description de la transmission HVDC-VSC **9**

Figure I.11 Parc éolien en mer connecté au système HVDC de redresseur non contrôlé et onduleur VSC …… **13**

Figure 2.1 La configuration d'une ferme éolienne connectée à un système HVDC à base d'un redresseur non contrôlé et un onduleur VSC …… **14**

Figure 2.2 Distribution de probabilité de la vitesse du vent ……...… **21**

Figure 2.3 Parc éolien offshore (i = 1,2,3,4,5) relié au point PCCf……...…… **23**

Figure 2.4 Transmission HVDC-(Diodes - VSC). ……...… **24**

Figure 2.5 Composants de la turbine éolienne …… **25**

Figure 2.6 Configuration de la transmission HVDC …… **27**

Figure 2.7 Redresseur non contrôle, un condensateur, un banc de filtres et transformateur **28**

Figure 2.8 Modelé du câble sous-marin en « T » ……...… **29**

Figure 2.9 Disposition de base du circuit VSC ……...… **30**

Figure 2.10 Angle relative de tension et impédance ……...… **30**

Figure 2.11 Schema équivalent du circuit VSC……...… **31**

Figure 2.12 Représentation vectorielle du circuit VSC…… **32**

Figure 2.13 Onduleur terrestre VSC……...… **33**

Figure 2.14 Modelé de réseau terrestre CA…… **33**

Figure 2.15 Diagramme de bloc de contrôle du convertisseur de la génératrice GSAP…... **37**

Figure 2.16 Schéma fonctionnel de contrôle des courants…… **38**

Figure 2.17 Schéma de contrôle de la tension et de la fréquence du réseau offshore **40**

Figure 2.18 Diagramme de bloc du contrôle des courants du convertisseur VSC…… **42**

Figure 2.19 Diagramme de bloc de contrôle externe du convertisseur VSC…… **43**
Figure 3.1 Forme d'onde de la tension Vdc1 (redresseur) …… **45**
Figure 3.2 Forme d'onde de la tension Vdc2(onduleur) …… **45**
Figure 3.3 Forme d'onde de les courantVdc2 (onduleur) …….. **46**
Figure 3.4 Les Tensions (Vabc) et Les courants(Iabc) ……...… **47**
Figure 3.5 puissance active (P MW) et puissance réactive (Q Mvar) ……..… **47**

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Comparaison de HVDC classique et HVDC-VSC…… **15**
Tableau 3.1 Paramètres de système VSC-HVDC …… **51**

LISTE DES ABREVIATIONS

HVDC Haute tension à courant continu (Hight Voltage Direct Continu).

DC Courant Continu (Direct Courant).

HVAC Haute tension à courant alternatif.

VSC Convertisseur source de tension (Voltage Source Converter).

CSC Convertisseur source de Courant (Courant Source Converter).

IGBIT Transistor bipolaire a grille isolé (Insulated Gate Bipolar Transistors).

LCC Systeme Convertisseur a commutateur(Line Commutated Converters)

MTDC MultiTerminal Courant Continu

PWM Modulation de largeur

PCC Point couplage commun.

Introduction Générale

Les énergies renouvelables sont des sources importantes d'énergie dans le monde et en particulier le vent qui est devenu une source de production d'électricité.

Aujourd'hui, l'énergie éolienne est l'une des sources d'électricité les plus dynamiques et aussi l'un des marchés les plus dynamiques au monde. La réapparition du vent comme source importante d'énergie dans le monde devrait être classée comme l'un des développements considérables de ce siècle.

Les parcs éoliens en mer ont pris de l'ampleur dans le nord-ouest de l'europe en 2020 l'UE aura installé 40 GW d'énergie éolienne en mer. De nombreuses études ont montré que les parcs éoliens en mer sont le secteur le plus prometteur dans l'industrie mondiale des énergies renouvelables. L'une des raisons majeures du développement des parcs éoliens en mer est l'absence de ressources éoliennes adaptées sur terre. C'est particulièrement le cas dans les zones densément peuplées comme dans plusieurs pays européens. Une autre raison importante est que l'impact environnemental, tel que le bruit audible et l'impact visuel, est minime avec les parcs éoliens en mer [1, 2].

L'application de la technologie de transmission à courant alternatif haute tension (HVAC) pour la transmission de l'énergie électrique produite par les éoliennes en mer sur de longues distances peut être difficile en raison de la grande quantité de compensation de la puissance réactive requise. Par conséquent, une alternative est d'utiliser la technologie à courant continu haute tension (HVDC). En outre, étant donné que le réseau en mer peut agir comme un pool de puissance où la puissance peut être injectée et extraite du réseau à différents nœuds, la flexibilité pour contrôler la direction de puissance tout en maintenant la tension dans le réseau est nécessaire. Dans ce cas, la mise en œuvre de la technologie du convertisseur de source de tension HVDC (HVDC-VSC) est avantageuse. Aujourd'hui, les systèmes de transmission HVDC-VSC sont considérés comme une bonne solution pour relier les grands parcs éoliens en mer situés loin de réseau terrestre.

Le but principal de la mémoire est le fonctionnement d'un parc éolien en mer Connecté à la liaison HVDC basée sur un redresseur non contrôlé et un onduleur VSC.

Pour atteindre ce but, les objectifs peuvent être cités comme suit :

- Etude sur l'énergie éolienne et son importance pour contribuer à résoudre le Problème de la demande d'électricité pour les prochaines décennies;

- Etude sur un système HVDC-VSC et son importance pour transmettre la puissance de la source éolienne en mer éloignée;
- Développement d'un modèle de parc éolien en mer connecté au système HVDC basé sur un redresseur à diodes et un onduleur VSC adapté à diverses études ;

Chapitre 1 : donne une généralité sur l'énergie renouvelable et aussi l'énergie éolienne et son Importance pour la production d'électricité. les systèmes HVDC-VSC pour le raccordement éolien. Les avantages de l'énergie renouvelable sont discutés et aussi l'énergie éolienne et son importance sont étudiées. L'utilisation d'un système HVDC basé sur un redresseur à diodes et un onduleur VSC est présentée afin de démontrer les avantages qui peuvent offrir ce type de convertisseurs. Une comparaison entre un système HVDC-VSC et une liaison HVDC classique est présentée et également quelques avantages et réalisations dans ce domaine sont donnés.

Chapitre 2 : donne en détail le fonctionnement et la modélisation d'un parc éolien offshore relié à un système HVDC-(Diode-VSC). Cet système, ce qui offre une puissance totale de 800 MW. Le contrôle de ce système est donné en détail dans ce chapitre, dans lequel certaines stratégies de contrôle sont présentées afin d'intégrer l'ensemble du système au réseau terrestre.

Chapitre 3 : donne le résultat de simulation sont tirés afin de montrer la Robustesse du système.

CHAPITRE I

Généralité sur L'énergie renouvelable et Les liaisons HVDC-VSC

I.1-Introduction

L'énergie est un produit fondamental et directement liée au changement climatique et au développement. En plus des besoins fondamentaux de l'homme comme la cuisine, le chauffage, l'éclairage, l'énergie est également nécessaire pour soutenir et développer des processus économiques tels que l'agriculture, l'industrie, les services, le transport et d'autres activités.

Aujourd'hui, une plus grande partie de l'énergie provient de l'énergie fossile, mais la consommation d'énergie fossile est associée à de nombreux effets négatifs dans l'environnement et le changement climatique. En raison de la capacité limitée des combustibles fossiles, le monde se concentre sur l'utilisation des énergies renouvelables en termes de production d'électricité pour satisfaire sa demande croissante.

Par conséquent, il ne sera pas faux de dire que la production d'énergie renouvelable sera une source d'énergie importante dans un proche avenir. Dans ce chapitre, les énergies renouvelables, en particulier l'énergie éolienne, est étudiée afin de donner une idée générale de son importance comme une source principale pour la vie humaine au cours des prochaines décennies, puis la transmission HVDC-VSC est présentée pour montrer ses avantages pour le raccordement des éoliennes en mer éloignées au réseau terrestre CA.

Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables, produites à partir de sources différentes.

l.2. Energie solaire

L'énergie solaire est la source énergétique la plus abondante sur terre. Elle est à l'origine de la majorité des énergies renouvelables. Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire soit directement de l'électricité à l'aide de semi-conducteur photovoltaïque, soit de la chaleur solaire thermique pour le chauffage ou la production électrique [3].

I. 2.1.Energie solaire photovoltaïque

Les panneaux photovoltaïques transforment directement l'énergie solaire en énergie électrique à courant continu. Il s'agit de cellules en matériaux semi-conducteurs fonctionnant sur le principe de la jonction P-N et étant réalisées actuellement pour la grande majorité à partir de silicium cristallisé. Ils sont très utilisés pour l'alimentation des sites isolés en association avec un système de stockage [4].

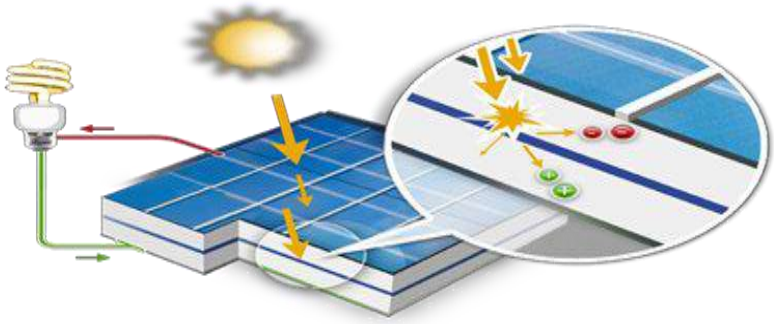


Fig I.1 solaire photovoltaïque

I.2.2 -Energie solaire thermique

Le solaire thermique actif permet de transmettre la chaleur du rayonnement solaire au sein d'un fluide, parfois de l'air, le plus souvent de l'eau, par la mise en œuvre de capteurs solaires.

Ces techniques peuvent assurer la production d'eau chaude sanitaire ou d'eau distillée,

le chauffage des piscines et des habitations ainsi que le séchage [5].

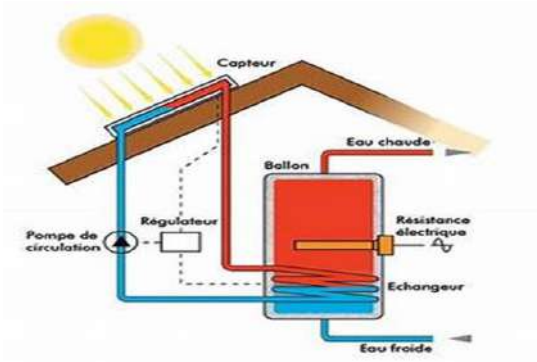


Fig. I.2: solaire thermique

I.3 Biomasse :

La biomasse désigne toute la matière vivante d'origine végétale ou animale de la surface terrestre. Généralement, les dérivés ou déchets sont également classés dans la biomasse. Différents types sont à considérer : le bois – énergie, les biocarburants, l'énergie est une ressource très abondante. C'est la ressource la plus utilisée au monde.

En Europe, c'est 51% de la part de l'énergie renouvelable qui appartient à ce mode de production d'énergie. Elle se concentre sur l'utilisation destinée au chauffage. On peut

utiliser toutes les ressources du bois : Les chutes ou déchets de production des industries de transformation du bois(bois d'élagage, bois forestier provenant de l'entretien des espaces boisés ou le bois de rebut provenant d'emballages, De palettes etc.) [6].

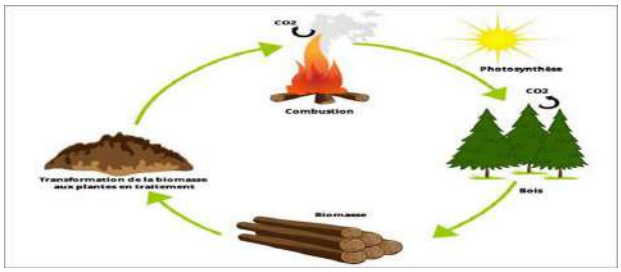


Fig I.3 biomasse

I.4 Géothermie

Le terme géothermie provient du grec <Ge> et <thermos>, signifiant respectivement : la terre et la chaleur. La géothermie peut se définir comme étant la technique qui consiste à puiser dans le sous-sol ou dans les roches, les calories qui y sont contenues, afin de les rendre disponibles en surface pour des applications de chauffage ou de production d'électricité. Dans des cas particuliers, la géothermie peut consister à injecter de la chaleur dans le sous-sol afin de refroidir les installations de surface. Différents sources de chaleurs sont à l'origine de la chaleur interne de la terre : La radioactivité, la chaleur initiale, la chaleur de différentiation et les mouvements différentiels. Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques ; c'est donc une énergie fiable et disponible dans le temps. Cependant, il ne s'agit pas d'une énergie entièrement inépuisable dans le sens où un puits verra un jour son réservoir calorifique diminuer. Si les installations géothermiques sont technologiquement au point et que l'énergie qu'elles prélèvent est gratuite, leur coût demeure, dans certains cas très élevé [7].

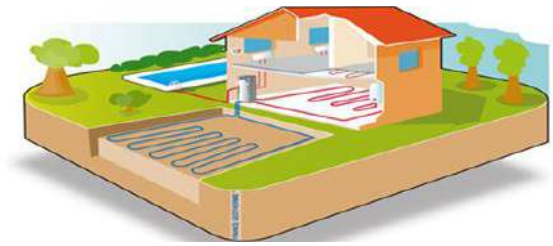


Fig I.4 géothermie

I. 5 Hydraulique

L'eau, comme l'air est en perpétuelle circulation. Sa masse importante est un excellent vecteur d'énergie. L'énergie hydraulique est produite soit au fil de l'eau soit par le biais du stockage de l'eau (lac de barrage, retenues d'eau) qui permet la constitution d'un stock d'énergie électrique mobilisable à tout moment. Les barrages sur les rivières ont une capacité importante pour les pays riches en cours d'eau qui bénéficient ainsi d'une source d'énergie propre et «stockable» [8].

Cette source représentait en 1998 environ 20% de la production mondiale de l'énergie électrique.

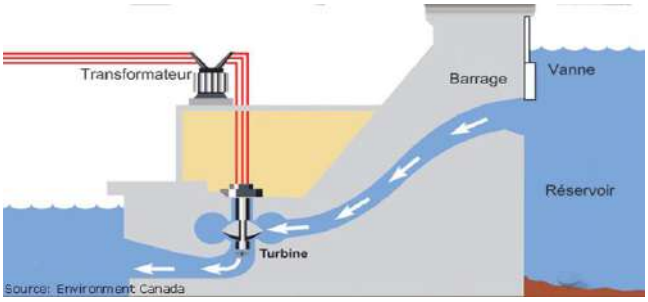


Fig I.5 Énergie hydraulique

I. 1.5 Avantage et inconvénient de l'énergie renouvelable

I.1.5.1 Avantage

- Source d'énergie gratuite et inépuisable.
- Pas de pollution ni de rejet de gaz à effet de serre.
- Les ressources exploitées sont locales, ce qui permet ainsi un développement durable des économies locales.
- Elles respectent l'environnement lors de la fabrication et lors de son fonctionnement.

I.1.5.2 Inconvénient

- Pour le moment, les énergies renouvelables coûtent plus chère que les énergies fossiles.
- Transport difficilement.
- Le soleil est disponible partout sur le globe mais n'est présent que 50% du temps et n'est donc pas toujours exploitable. La plupart des autres énergies dépendent du milieu et ne sont donc pas disponible partout et en même temps.

I.6 L'éolien

Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

Ensuite cette énergie est transformée en énergie électrique par l'intermédiaire d'une machine électrique. Les termes « parc éolien » ou « ferme éolienne » sont utilisés pour décrire les unités de production groupées, installées à terre – « on shore » ou dans la mer «offshore ». Les coûts d'investissement sont relativement élevés, surtout pour le« offshore », mais l'énergie primaire est gratuite et l'impact environnemental est petit. Dans certaines régions, les éoliennes posent quand même quelques problèmes, liés au bruit de basse fréquence, désagréable pour les personnes qui habitent à côté et les impacts avec les troupeaux sur les oiseaux [9].



Figure I.6 : les éoliens.

Les prévisions de l'UE sur les énergies renouvelables visent à produire 20% D'énergétique global à partir de sources d'énergie renouvelables d'ici 2020. Afin d'atteindre cet objectif, EWEA a fixé un objectif de développer 230 GW d'énergie éolienne; Dont 40 GW , viendront des centrales éoliennes en mer. En 2010, la puissance éolienne installée dans le monde a augmenté de 24,1% et a atteint 197 GW, dont 86 GW en Europe. Bien qu'une grande majorité d'entre eux soient des éoliennes terrestres, les centrales éoliennes en mer se développent à un rythme encore plus rapide. En 2010, 883 MW d'énergie éolienne en mer ont été ajoutés, ce qui porte la puissance éolienne totale installée en mer à 2946 MW en Europe.

Le développement, des centrales d'énergie éolienne en mer et en terre depuis 1990 et jusqu'au 2030, est prévu comme le montre la figure 1.7[10]. D'ici 2030, la puissance éolienne totale installée sera de 400 GW, dont 150 GW sera à partir des installations éoliennes en mer. Cependant, grâce à un meilleur facteur de capacité, l'énergie éolienne en mer contribuera autour d'environ la moitié de la production d'énergie éolienne totale, comme le montre la figure 1.8 [10]. D'ici l'an 2025, il est prévu qu'il y aura 350 GW à partir des installations en terre et 500 GW des installations éoliennes en mer. De cette façon, il sera en mesure de répondre à 50% de la demande d'électricité dans l'Union européenne. En Europe, le développement de nombreuses grandes éoliennes en mer a été planifié en mer du Nord et en mer Baltique. Ces parcs éoliens peuvent être autant 100-200 kilomètres loin de la côte; De sorte que l'objectif est de profiter d'un meilleur profil du vent et aussi pour éviter tout conflit de livraison, de pêche et de distraction visuelle. Jusqu'à aujourd'hui, les sites en mer qui étaient favorisés pour être utilisés pour les parcs éoliens étaient ceux près de la côte et avec des profondeurs relativement petites. Mais il existe de nombreux obstacles qui rendent l'utilisation de ces sites plus complexe. Le premier obstacle est que la côte est toujours utilisée pour le trafic maritime, les activités récréatives et la pêche. Deuxièmement, l'installation d'un parc éolien près du littoral aura un effet négatif du bruit et créera le problème de la visibilité. Pour ces raisons, les défis sont de placer les parcs éoliens en mer loin de la côte en augmentant la distance à des centaines de kilomètres. Mais le problème est de savoir comment transmettre sur de très longues distances la puissance générée par ces turbines à la terre pour établir une connexion avec le réseau terrestre principal.

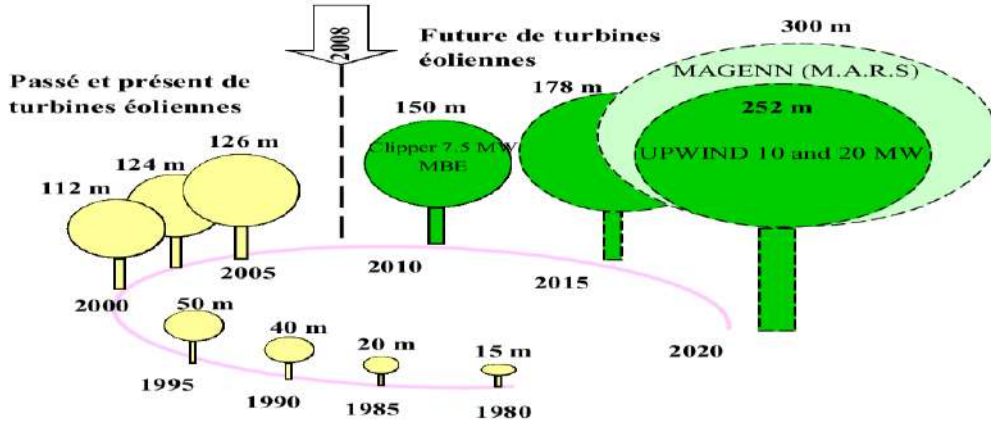


Fig. 1.7: Croissance de la taille des conceptions d'éoliennes commerciales

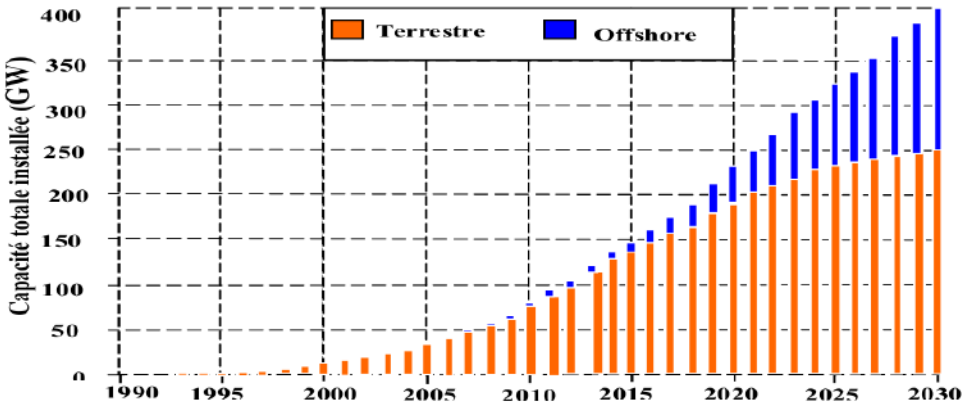


Fig. 1.8: Capacité totale installée de l'énergie éolienne dans l'UE, jusqu'en 2030

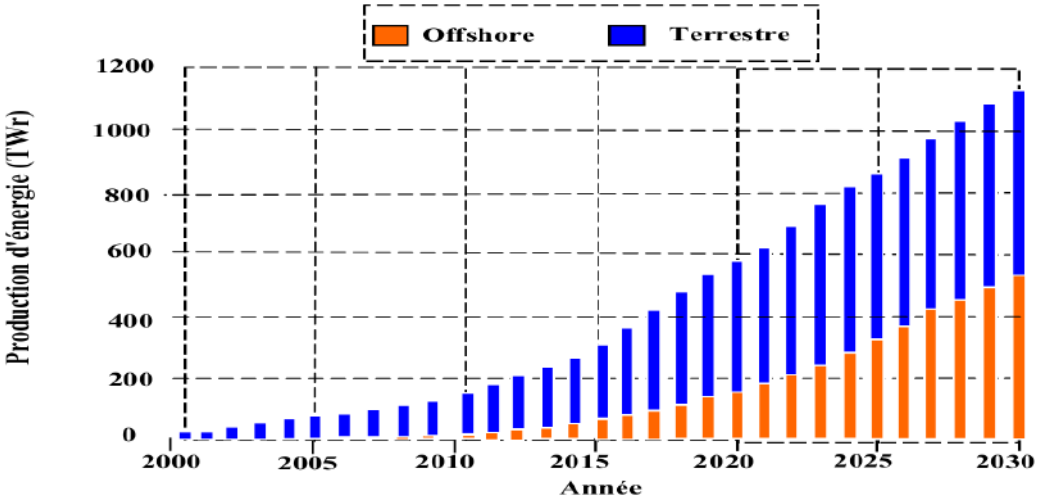


Fig. 1.9: Production d'énergie éolienne dans l'UE, jusqu'en 2030

I.6.1-Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

I.6.1.1- Avantages

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, contrairement aux autres énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier ; L'énergie éolienne ne nécessite aucun carburant ;
- L'énergie éolienne n'est pas plus une énergie de risque comme l'énergie nucléaire et elle ne produit pas de déchets;
- Il s'agit d'une source d'énergie local située dans des endroits généralement très proches, ce qui minimise les pertes des lignes de transport ;
- C'est l'énergie la moins chère parmi les énergies renouvelables ;

- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite ;
- Les parcs éoliens peuvent être installés sur des terres agricoles et ils se désassemblent facilement et ne laissent aucune trace ;
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. L'installation d'un parc ou d'une éolienne est relativement simple; Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant.

I.6.1.2- Inconvénients

- Le bruit aérodynamique lie à la vitesse de rotation du rotor;
- Transport difficilement
- L'impact sur les parcours de migration des oiseaux et l'impact visuel;
- C'est une source coûteuse à rendement faible dans les sites moins ventés.

I.7- Le Système de transmission HVDC-VSC pour la connexion des sources d'énergie éolienne

A la fin du 19ème siècle, un débat houleux se concentre sur la production d'électricité et sa distribution ainsi que sa transmission. Le résultat a identifié la structure du réseau électrique que nous connaissons aujourd'hui. Un conflit connu sous le nom "Bataille des courants" a eu lieu entre Nikola Tesla, un supporteur de la distribution électrique en courant alternatif (CA),

et Thomas Edison un supporteur du courant continu (CC). Le résultat de la bataille a été bien connu et le courant alternatif a dominé dans de nombreux domaines, mais aujourd'hui, nous voyons une reprise du courant continu dans plusieurs domaines: l'intégration des énergies renouvelables, en particulier l'énergie éolienne et solaire, la charge des véhicules électriques et, dans notre cas, l'utilisation du courant continu pour les interconnexions HVDC [11].

De grands pas ont été faits dans le développement des convertisseurs HVDC dont commercialisées sous le nom "HVDC Light" par ABB et "HVDC Plus" par SIEMENS. Le système HVDC basé sur le convertisseur de source de tension (HVDC-VSC) est la technologie de transmission la plus récente pour connecter l'éolien éloigné en mer qui nécessite une connexion par câble de longue distance. Le système HVDC-VSC

Offre une connexion asynchrone entre le réseau éolien en mer et le réseau électrique terrestre, et aussi il offre un contrôle indépendant de la puissance active et de la puissance réactive. Ces liaisons sont prévues d'améliorer l'intégration des parcs éoliens dans le réseau électrique. Un autre avantage devient de l'utilisation du système HVDC-VSC, est que les génératrices de turbines éoliennes utilisent des convertisseurs d'électroniques de puissance, augmentant ainsi leur propre contrôle et flexibilité, ce qui offre de nouvelles possibilités pour améliorer la qualité de puissance des réseaux CA [12]. La connexion d'une grande ferme éolienne est nécessaire pour la transmission et la distribution de l'énergie électrique générée [13]. Le HVDC-VSC est l'option la moins chère pour la connexion d'une ferme éolienne au réseau lorsque la capacité de l'installation est supérieure à 100 MW et que la distance est supérieure à 90 km par rapport aux systèmes HVAC ou HVDC classique.

I.8- Aperçu historique sur les systèmes HVDC

Le premier système de puissance électrique (comprenant un générateur, des câbles et des Charges) a été construit par Thomas Edison – c'est l'historique station de Pearl Street à New York qui fonctionna à partir de 1882. Il s'agissait d'un système CC (continu) dans lequel la génératrice fournissait de la puissance à 59 consommateurs, disposés à l'intérieur d'une surface d'environ 1.5 km de rayon.

Apres plusieurs étapes, La première transmission de puissance utilisant les systèmes HVDC a été commercialisée en 1954. Il s'agissait d'une interconnexion entre l'île de Gotland et le continent suédois. Elle était réalisée par l'intermédiaire d'un câble sous-marin de 96 km de long, offrant un transport de puissance de 20 MW avec une tension nominale de 100 kV. Actuellement, plus de 50 systèmes HVDC qui fonctionnent dans le monde et beaucoup d'autres sont en construction [14, 15].

La réussite de ces premiers projets suscita un intérêt considérable dans le monde entier. Au cours des années 60, plusieurs liaisons HVDC furent construites : Konti-Skan entre la Suède et le Danemark, Sakuma au Japon (avec des convertisseurs de fréquence 50/60 Hz), la liaison néo-zélandaise entre les îles du sud et du nord, la liaison Italie-Sardaigne et la liaison avec l'île de Vancouver au Canada [16].

En 1965, les laboratoires de General Electric réalisent un dispositif semi-conducteur

capable de réaliser la fonction de commutation statique avec fermeture contrôlée: Le thyristor.

En 1970, une première valve à thyristors est expérimentée sur le lien de Gotland et en 1972; La première station convertisseur dos à dos est mise en service par General ElectricEel River, Canada [14, 15].

Le plus grand projet de transport HVDC est le lien Itaipu au Brésil (6300 MW), fut lancé en 1979. Ce raccordement, réalisé et mis en service en plusieurs étapes entre 1984 et 1987, joue un rôle clé dans l'alimentation en énergie électrique au Brésil.

La baisse sensible du coût des convertisseurs, facilitée par cette nouvelle technologie, a permit d'accentuer fortement la croissance des liaisons à courant continu. Après Itaipu, le projet le plus ambitieux fut, sans conteste, l'interconnexion Québec-Nouvelle Angleterre (2000 MW, ± 450 kV), première liaison multi-terminal HVDC importante construite au monde en 1992.

En 1999, le premier système de transport HVDC à convertisseurs, à source de tension à base d'IGBT, baptisé HVDC Light, commençait à acheminer l'électricité entre Hellsjon et Granges berg en Suède [14, 16].

I.9- Description du système HVDC-VSC

Il est clair que dans les liaisons HVDC classique, l'élément de base est le thyristor, mais dans la constitution des liaisons HVDC-VSC, la valve IGBT est utilisée. La transmission de puissance pour un système HVDC Classique est définie à partir de courant tandis que pour un système HVDC-VSC il défini à partir de tension, parce que la liaison classique fonctionne comme une source de courant alors que la liaison VSC fonctionne comme une source de tension. La figure 1.10 illustre la description de la transmission HVDC-VSC. A l'extrémité du câble à courant continu le même type de station terminale peut être trouvé. Chaque station se compose d'un transformateur, qui transforme la tension au niveau de transmission désiré.

Les deux stations VSC fonctionnent comme un redresseur et un onduleur, selon la direction de la puissance active transmise. La tension est redressée par un premier conv-

ertisseur et la puissance est transmise par le câble CC. A la deuxième borne, la tension est ondulée par un autre convertisseur et la puissance transformée vers le réseau principal.

Pour son fonctionnement, la liaison HVDC-VSC nécessite toujours des filtres. De coté CA un filtre est nécessaire a fin de limiter la quantité d'harmoniques qui peuvent affecter le réseau. Entre le transformateur de puissance et le VSC, une réactance de phase par phase est insérée pour travailler comme un filtre série. La réactance de phase diminue les harmoniques de courant qui atteignent le réseau. Du côté CC, il ya un filtre continu qui se compose toujours de condensateurs. Son objectif est de maintenir la tension au niveau du câble CC constante. Le lien est toujours connecté à deux réseaux CA.

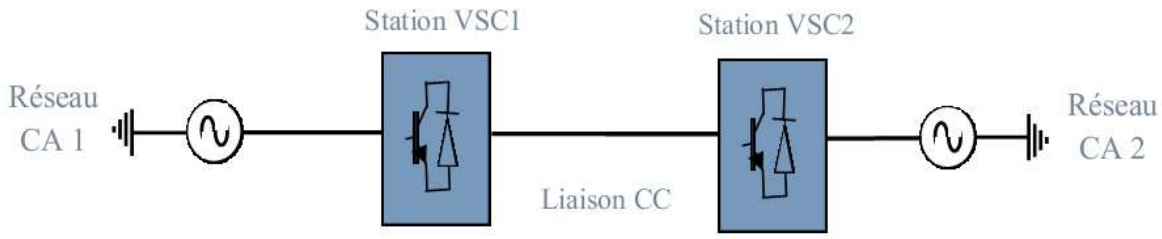


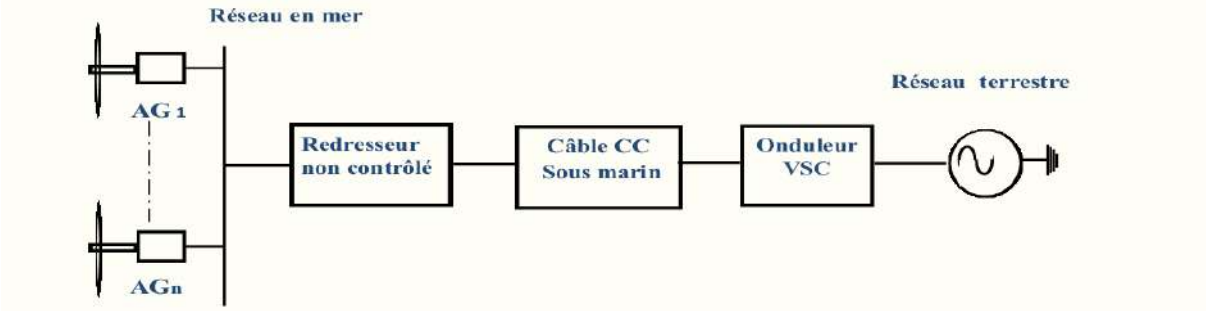
Fig.1.10: Description de la transmission HVDC-VSC

I.10- Un Système HVDC basé sur un redresseur non contrôlé et un onduleur VSC pour le raccordement des parcs éoliens en mer

Nombreux chercheurs présentent le système HVDC basé sur un redresseur à diodes comme une solution qui peut être utilisée dans le cas de flux de puissance unidirectionnel, par exemple, la transmission de puissance à partir de grands parcs éoliens en mer vers le réseau terrestre principal. Par rapport aux technologies LCC ou VSC, Les avantages qui peuvent être tirés de l'utilisation de cette technologie sont: moins de pertes de conduction, moins de coût d'installation et une fiabilité plus élevée [17]. Mais cette technologie a quelques inconvénients comme l'‟absence de système de contrôle dans le redresseur à diodes et aussi le manque de système de protection. Ces inconvénients peuvent être résolus par l'insertion des systèmes de compensation et aussi l'insertion de stratégie de protection sur le système de contrôle [18].

Les coûts d'installation dans les installations éoliennes en mer sont beaucoup plus élevés et, par conséquent, toute réduction des aspects tels que le poids de l'équipement, les exigences d'entretien ou les pertes de transmission aura un effet plus évident sur les coûts de transmission. Pour cette raison, la proposition d'utiliser des redresseurs à diodes devient plus attrayante pour réduire ces coûts [19,20]. La figure 1.11 présente un parc éolien en mer relié

au réseau terrestre via un système HVDC avec un redresseur non contrôlé et un onduleur VSC.



Turbines éoliennes en mer

Fig.1.11: Parc éolien en mer connecté au système HVDC de redresseur non contrôlé et onduleur VSC

I.11- Comparaison de HVDC classique et HVDC-VSC

Dans un système HVDC-VSC, un VSC peut être utilisé comme une source de tension et avoir la même fréquence avec le système CA auquel il est connecté. Il peut contrôler la puissance active et réactive indépendamment. Contrairement au système HVDC-VSC, un système HVDC classique consomme de la puissance réactive et il a besoin d'une source de tension alternative pour les commutations, ce qui n'est pas le cas pour un HVDC-VSC. Dans le cas d'une inversion de puissance est recommandée ; Le système HVDC classique modifie la polarité de la tension continue tandis que le VSC change la direction du courant [21]. Cela rend le HVDC classique inadapté aux configurations MTDC car le fait de changer la polarité de la tension d'un convertisseur inverserait la polarité de tous les convertisseurs connectés au même réseau CC et ne pourrait pas produire l'écoulement de puissance requis. Ce problème est résolu en utilisant un VSC car l'écoulement de puissance peut être inversé à un seul VSC sans inverser la polarité de tension continue du système complet. En outre, l'inversion de l'écoulement de puissance pour HVDC Classique prend un temps pour faire des manœuvres mécaniques, mais avec VSC, elle peut être obtenue immédiatement.

En outre, le système HVDC classique doit être relié à un réseau CA fort, car

les fluctuations de tension ou de fréquence peuvent entraîner des erreurs de commutation qui peuvent perturber le flux de puissance. Avec le VSC, le flux de puissance ne sera réduit qu'en cas de chute de tension; en fonction de la grande réduction de la tension alternative [22]. Le problème majeur dans l'utilisation de HVDC-VSC est les pertes de commutation plus élevées. Par rapport au HVDC classique, où les pertes de conversion sont d'environ 0,5%, les pertes de conversion du HVDC-VSC ont été réduites d'environ 3% à 1%. En conséquence, il est clair que pour la liaison point à point, où de grandes quantités d'énergie doivent être transférées, une liaison HVDC classique est toujours recommandée [23]. Dans le tableau 1.1, une brève comparaison entre le système HVDC classique et le système HVDC-VSC est résumée.

Tableau 1.1: Comparaison de HVDC classique et HVDC-VSC

HVDC classique	**HVDC-VSC**
Ligne-commutée	Auto-commutation
Contrôle uniquement la puissance active	Contrôle la puissance active et réactive indépendamment
Contrôle la direction de puissance par la polarité de la tension	Contrôle la direction de puissance par la polarité du courant
Capacité limitée d'inversion de puissance	Inversion de puissance presque instantanée
Nécessite un réseau CA fort	Peut alimenter un réseau CA faible
Impossible pour les configurations MTDC	Possible pour les configurations MTDC
A besoin du soutien de la puissance réactive	Peut injecter ou retirer la puissance réactive en fonction de ce qui est nécessaire
Pertes de conversion autour 0.5 %	Pertes de conversion autour 1%

I.12- Avantages de la liaison HVDC-VSC

La principale différence de fonctionnement entre HVDC classique et système HVDC- VSC est la plus grande contrôlabilité de la seconde technologie. Cela nous permet de résumer certains avantages liés au système HVDC-VSC, où tous sont indiqués ci-dessous:

- Le contrôle de la puissance active et réactive, sans équipement de compensation Supplémentaire, se fait indépendamment. Le HVDC-VSC peut contrôler à la fois la puissance active et réactive indépendamment, en raison de l'utilisation du convertisseur PWM. Le régulateur de tension CA peut commander la tension sur le réseau CA tandis que la

puissance active transmise est réservé constante. De plus, la génération et la consommation de puissance réactive d'un convertisseur HVDC-VSC peuvent être utilisées pour la commande de tension pour compenser les besoins du réseau connecté

- Les convertisseurs VSC sont adaptés pour créer une liaison CC multi-terminal avec de nombreux convertisseurs. Ceci peut être réalisé avec une faible coordination entre les convertisseurs. Cette application est adaptée pour alimenter les centres urbains.
- Le convertisseur VSC est capable de créer sa propre tension CA à une fréquence prédéfinie, sans la présence de machines tournantes. En conséquence, il peut être facilement utilisé pour connecter de grands parcs éoliens.
- Contrairement à la technologie conventionnelle, il n'y a pas de communication entre chaque côté de la liaison, car le système de commande sur le redresseur et l'onduleur est fait indépendamment. Cet avantage peut améliorer la vitesse et la fiabilité du système de contrôle.

I.13- La transmission courant alternatif haute tension (HVAC)

Les systèmes à courant alternatif sont le mode le plus courant pour transmettre l'énergie électrique, et ils sont utilisés dans le monde entier. Mais cette technologie présente de nombreux inconvénients pour transmettre la puissance à partir de sources d'énergie renouvelables comme l'énergie éolienne. Ces inconvénients peuvent être résumés comme suit:

- Les câbles sous-marins produisent d'énormes quantités de puissance réactive qui doivent être consommées aux extrémités des câbles.
- Il n'est pas possible d'utiliser la transmission HVAC sur de longues distances en raison des pertes diélectriques et aussi en raison de l'inconvénient précédent;

I.14- L'application du système HVDC-VSC pour le raccordement éolien

Les transmissions HVDC à base de VSC peuvent être utilisées pour alimenter des charges isolées sur des îles ou des parcs éoliens en raison de leurs avantages, tels que: l'auto- commutation et le contrôle dynamique de la tension, [24]. La technologie HVDC-VSC est une technologie très appropriée pour transmettre la puissance des parcs éoliens en

mer éloignés au réseau terrestre. La capacité de contrôler la puissance réactive et sa contribution à la stabilité du réseau rend la technologie HVDC-VSC très admirée pour de nombreuses applications. De plus, la technologie est flexible et, dans de nombreux cas, lorsque de nouvelles unités pour agrandir le parc éolien sont souhaitées, il est possible de les ajouter sans problème [25].

I.15- Technologie HVDC-VSC pour le Parc éolien en mer BorWin 1

Bor Win 1 est un parc éolien en mer. Il est situé à 128 km de la côte en mer du Nord et il est le parc éolien le plus éloigné dans le monde. En outre, c'est le premier éolien dans lequel l'énergie éolienne générée est reliée au réseau CA par une transmission à courant continu haute tension. La connexion est développée par ABB via un système de transmission HVDC Light de 400 MW. Il se compose de 80 éoliennes de 5 MW chacune. Les génératrices alimentent un système CA de 36 kV qui est transformé en 154 kV pour la station en mer HVDC Light. La station réceptrice est située à Diele, à 75 km de la côte, où la puissance est injectée dans le réseau allemande de 380 kV [26].

I.16- Conclusion

Le monde est confronté à d'énormes défis dans la fourniture d'énergie à la démographie croissante de la population. Cela passe aujourd'hui par l'utilisation de la technologie HVDC parce que c'est une technologie très mature qui se développe encore rapidement dans une puissance plus élevée. Cette énergie doit être fournie sans endommager l'environnement Beaucoup de solutions sont trouvées pour protéger l'environnement et satisfaire cette demande énergétique croissante comme le vent en mer et l'énergie solaire dans les déserts et en même temps ces types d'énergie sont propres et ils sont également adaptés à notre environnement. Mais ces sources d'énergie sont situées dans des zones situées très éloignées des villes et la transmission d'énergie électrique énorme est réalisée sur de longues distances.

Pour résoudre ce problème, l'utilisation de la technologie HVDC est l'une des solutions qui peuvent contribuer à fournir de l'énergie à partir de ces zones. Par conséquent, HVDC aura un rôle important et significatif à l'avenir pour créer un monde plus durable.
De plus, la technologie HVDC-VSC apparaît comme une alternative robuste et économique pour l'extension future du réseau de transport.

CHAPITRE II

Fonctionnement et commande d'un parc éolien en mer relié à une liaison HVDC-(Diodes-VSC)

II.1-Introduction

Aujourd'hui, la ferme éolienne en mer devient plus intéressante par rapport à Celle en terre, parce que ce dernier présente les inconvénients de l'absence d'espace, Problème de bruit et l'impact visuel. Un autre avantage pour le parc éolien en mer qui est la disponibilité de vent à des vitesses élevées conduisant à plus de puissance générée et aussi plus d'espace pour construire le parc éolien. L'utilisation de câbles CA pour le transport d'énergie sur une longue distance n'est pas la bonne solution pour de nombreuses raisons cités récédemment. La liaison à courant continu en haute tension HVDC en particulier la technologie HVDC-VSC pourrait être un système de transmission attrayant, au lieu d'utiliser une transmission de câble haute tension CA.

L'objectif principal du présent chapitre est de présenter un parc éolien en mer relié à une liaison HVDC basée sur un redresseur à diodes et un onduleur VSC.Ce grand parc éolien offshore, est divisé en cinq groupes. Chaque groupe constitue de quelques éoliennes qui sont similaires dans tous les paramètres. Ensuite, chaque groupe peut être remplacé par une seule unité équivalente dont la puissance égale à la somme de la puissance individuelle des éoliennes. Les cinq groupes ont une puissance totale égale à 800 MW, constitue le système qui sera étudié dans ce chapitre. Les composants qui font partie du parc éolien offshore sont les turbines éoliennes et le réseau offshore CA.

Chaque turbine est constitué à son tour du rotor de vent, le système de transmission mécanique, la génératrice synchrone à aimant permanent, le double convertisseur de puissance et le transformateur.

La liaison HVDC est constitue d'un redresseur à diodes non commandé, un câble Sous-marin et un convertisseur de source de tension VSC qui agit comme un onduleur.

Le redresseur comprend à son tour des ponts à diodes, des filtres CA, des Transformateurs et du filtre côté CC. Le redresseur non contrôlé est utilisé pour remplace le redresseur VSC. Il est situé entre deux convertisseurs commandés, de sorte Qu'il ne peut pas affecter le fonctionnement du système. Dans les étapes suivantes, le fonctionnement, la modélisation et le contrôle du système seront étudiés en détail.

II.2- Système HVDC-(Diodes-VSC) pour le raccordement éolien

La figure 2.1 montre un système typique qui se compose d'un parc éolien en mer avec un certain nombre de turbines éoliennes. Ce système est connecté à un point de couplage commun offshore. La liaison HVDC se compose d'un redresseur non contrôlé

à diodes de 12 impulsions et d'un câble CC sous-marin et enfin d'un onduleur VSC.
Le deux cotés alternatifs des convertisseurs de la liaison sont relies aux réseaux CA par l'intermédiaire des transformateurs. Les composants principaux du système à étudier Sont :

II.2.1- Parc éolien

Le parc éolien se compose de 160 turbines éoliennes. Chaque turbine éolienne basée sur la génératrice synchrone à aimants permanents GSAP de 5MW relie à deux convertisseurs commandés dos à dos.

II.2.2- Convertisseurs de la liaison HVDC

Les deux convertisseurs utilisés pour la liaison HVDC sont un convertisseur non commandé à base de diodes et un convertisseur à base de VSC employant des semi-conducteurs de puissance IGBT. Le premier convertisseur fonctionne comme un redresseur et l'autre nécessairement comme un onduleur.

II.2.3- Transformateurs

Évidemment, les convertisseurs sont connectés aux systèmes CA par des transformateurs. La fonction la plus importante des transformateurs consiste à transformer la tension CA à des valeurs adéquates pour le bon fonctionnement du convertisseur. Un transformateur permet des fonctions supplémentaires comme L'adaptation de la tension, l'association d'unités de conversion ou l'isolement vis-à-vis de la composante homopolaire. L'inductance de fuite des transformateurs utilisés dans ce mode de transport est généralement entre 0,1pu et 0.2pu. D'une part un transformateur TR sans changeur de prise connecté le redresseur avec le réseau alternatif en mer, et d'autre part un autre transformateur TV relie l'onduleur avec le réseau terrestre.

II.2.4- Filtres et condensateurs shunt

En fonction du réseau alternatif, des filtres peuvent être nécessaires pour empêcher toute pénétration d'harmoniques vers la station de conversion.

D'autre part, la fréquence élevée des commutations dans l'unité de conversion rend les harmoniques qu'elle génère plus nocifs pour le matériel mais également plus faciles à filtrer. Z_{FR} représente à la fois le condensateur shunt CF du redresseur et le banc de filtres d'harmoniques.

Des filtres peuvent être installés sur le bus continu pour limiter l'ondulation de tension continue sans pour autant augmenter la valeur de la capacité continue, dans les cas où cette dernière est limitée par d'autres contraintes.

II.2.5- Câbles à courant continu

De par sa sensibilité aux défauts continus, ce type de liaisons est effectué majoritairement par câbles souterrains ou sous-marins. De plus, étant donné que la polarité de la tension continue ne s'inverse jamais, on utilise des câbles à isolation synthétique qui sont plus économiques que les câbles **traditionnels**. Le câble utilisé dans les liaisons HVDC-VSC est un nouveau type développé, où l'isolant est constitué d'un polymère extrudé qui est particulièrement résistant à la tension continue. Ce type des câbles est le choix préféré pour les liaisons HVDC-VSC, cela principalement en raison d e leur résistance mécanique, la souplesse et le faible poids.

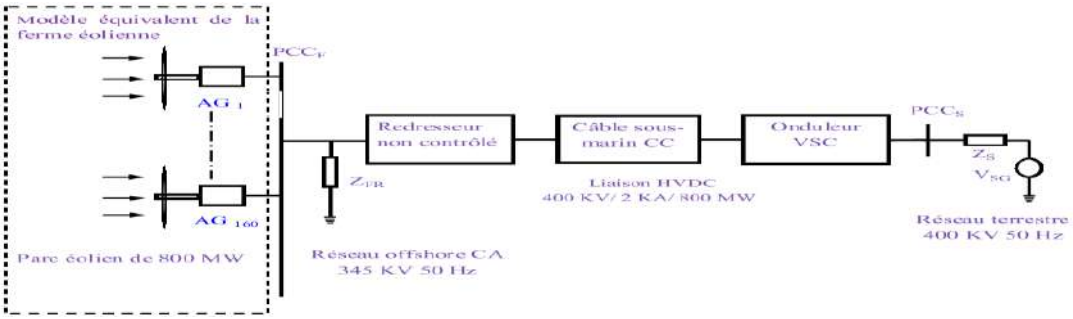


Fig. 2.1**:** La configuration d'une ferme éolienne connectée à un système HVDC à base d'un redresseur non contrôlé et un onduleur VSC

II.3- Énergie éolienne

L'énergie éolienne est un domaine en développement rapide. La puissance éolienne installée a considérablement augmenté au cours des dix dernières années et la tendance est d'installer de plus grandes turbines éoliennes et de les regrouper dans de grands parcs éoliens reliés au réseau par des liaisons HVDC [29].

II.3.1- Distribution de vent

La vitesse du vent peut être modélisée comme une variable aléatoire continue, en utilisant la distribution de Rayleigh. La distribution de Rayleigh est une simplification de la distribution de Weibull. La fonction commune de densité de probabilité la plus courante pour décrire la vitesse du vent est donnée par [30,31] :

$$f(w_w) = \frac{k}{C}\left(\frac{w_w}{c}\right)^{k-1} exp^{\left[-\left(\frac{w_w)}{C}\right)^k\right]} \quad (2.1)$$

Où : f (w_w) Fonction de densité de probabilité du vent .

w_w: Vitesse moyenne du vent .

k : Paramètre de forme.

C : Paramètre d'échelle et donné par :

$$C = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\overline{w_w} \qquad (2.2)$$

Où : $\overline{w_w}$est la vitesse annuelle moyenne du vent. Pour simplifier, nous avons mis k = 2

La distribution de probabilité est donnée par la vitesse moyenne du vent :

$$f(w_w) = \frac{\pi w_w}{2\overline{w_w}^2} \exp[-\frac{\pi\, {w_w}^2}{4\overline{w_w}^2}] \qquad (2.3)$$

Pour utiliser la distribution de Rayleigh, il suffit de définir la vitesse moyenne annuelle du vent. Les distributions de probabilité pour des différentes vitesses moyennes du vent en utilisant la distribution de Rayleigh sont présentées à la Figure 2.2, dans laquelle 5 distributions de 5 vitesses du vent moyennes annuelles différentes sont Présentée

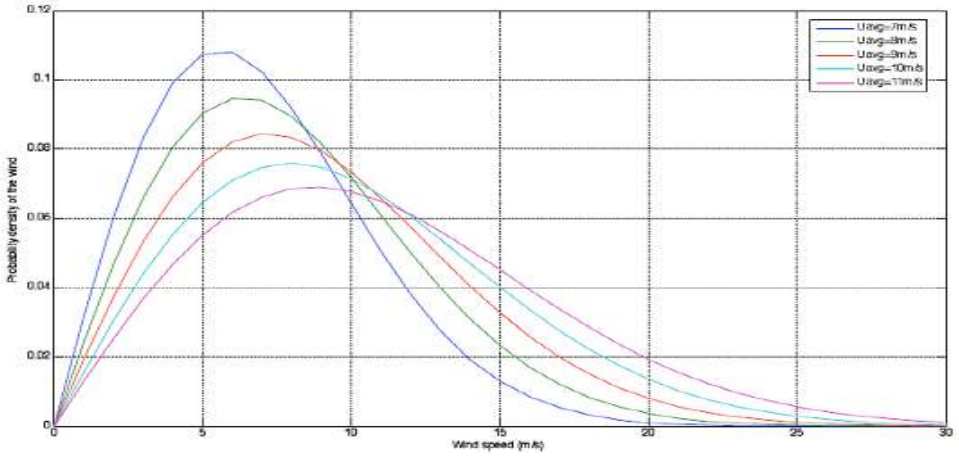


Fig. 2.2: Distribution de probabilité de la vitesse du vent.

II.4- Description générale du système à étudier

Un système proposé point à point est présenté sur les figures 2.3 et 2.4. Il se compose de trois parties clairement définies: le parc éolien offshore, une liaison à courant continu et un réseau terrestre CA. Le parc éolien se compose de 160 éoliennes de 5 MW. La puissance totale installée est donc de 800 MW.

La liaison HVDC se compose d'un redresseur non contrôlée à diodes, d'un câble sous-marin de longueur d'environ 100 kilomètres et d'un convertisseur de tension VSC qui agit comme un onduleur. Le réseau terrestre est simplement modélisé par son équivalent de Thevenin. Toutes les éoliennes montrent le même comportement si l'incident du vent était également le même. Comme l'extension du parc éolien est importante, on suppose que l'incident du vent ne sera pas le même pour toutes les éoliennes. Pour tenir compte de cette

différence et avoir un système plus flexible, il ya eu cinq groupes de 4, 16, 28, 44, et 68 turbines éoliennes.

Dans chaque groupe de turbines éoliennes, l'incident du vent est le même et ce groupe est modélisé par un parc éolien équivalent

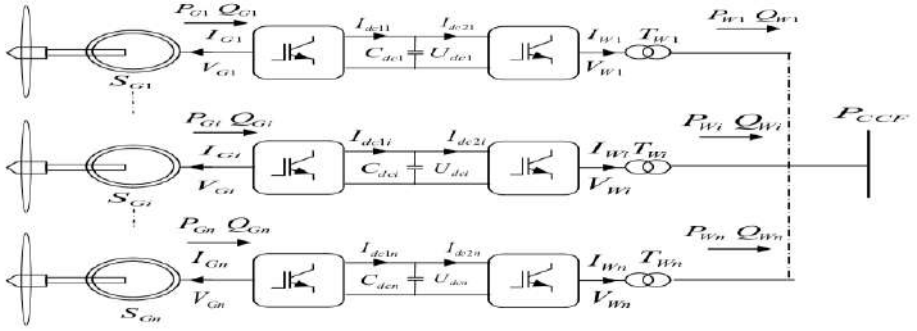


Fig. 2.3 : Parc éolien offshore (i = 1,2,3,4,5) relié au point pcc

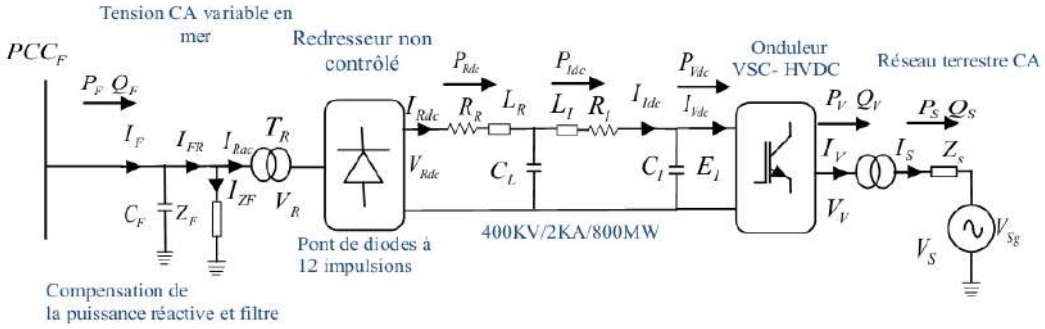


Fig. 2.4 : Transmission HVDC-(Diodes - VSC).

II.4.1- Fonctionnement de la turbine éolienne

La turbine éolienne est une machine qui convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique qui est de son tour convertie en énergie électrique. Le parc éolien peut produire de l'énergie uniquement en réponse à une ressource immédiatement disponible: le vent; car il n'est pas possible de stocker le vent et de l'utiliser plus tard.
Pour cette raison, tout système auquel une éolienne est connectée doit tenir en compte de cette disponibilité [32].

Un schéma simplifié des composants de la turbine éolienne est présenté à la figure 2.5; comme le montre ce schéma, les éléments de l'éolienne sont:

• le rotor de l'éolienne ;

• Système de transmission mécanique ;

• Génératrice synchrone à aimant permanent ;

• Convertisseurs dos à dos ;

• Transformateur.

De cette figure, il est clair que la puissance produite par l'éolienne est transférée à travers les convertisseurs de puissance dos à dos ; Par conséquent, le fonctionnement Dynamique de la génératrice électrique est effectivement isolé du réseau électrique. En d'autres termes, la fréquence électrique de la génératrice est indépendante de la Fréquence du réseau, permettant ainsi un fonctionnement à vitesse variable de l'éolienne.

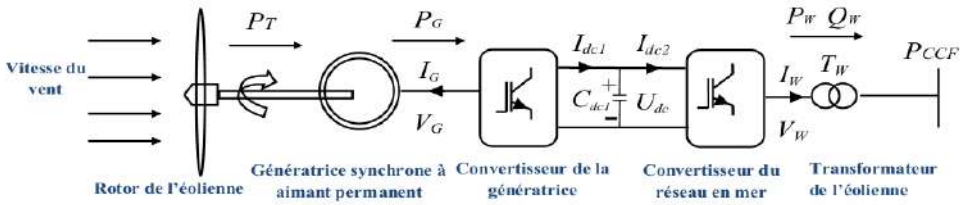


Fig. 2.5: Composants de la turbine éolienne

La machine synchrone à aimant permanent joue un rôle clé dans les systèmes de production d'énergie éolienne à entraînement direct pour transformer la puissance mécanique en énergie électrique. Les aimants inclus dans la génératrice fournissent un champ magnétique constant évitant la nécessité d'une excitation électrique indépendante.

Ce type de génératrice présente une option intéressante pour la nouvelle génération d'éoliennes pour les applications en mer [33].

II.4.2- Modélisation du parc éolien offshore

Les équations suivantes représentent le modèle électrique du iéme groupe de turbines éoliennes raccordées au point de couplage commun PccF du réseau offshore CA :

Les équations des axes d-q utilisées pour modéliser la génératrice à aimants permanent

Permanents synchrones sont:

$$V_{Gdi} = R_{Gi} I_{Gdi} + L_{Gdi} \frac{dI_{Gdi}}{dt} - w_{Gi} \lambda_{Gqi} \quad (2.4)$$

permanents synchrones sont:

$$V_{Gqi} = R_{Gi} I_{Gqi} + L_{Gqi} \frac{dI_{Gqi}}{dt} - w_{Gi} \lambda_{Gdi} \quad (2.5)$$

V_{Gqi} : est la tension aux bornes du stator de l'axe q en volt ;

V_{Gdi} : est le tension du stator de l'axe d en volt ;

I_{Gdi} : est le courant du stator de l'axe d en ampère A ;

I_{Gqi} :est le courant du stator de l'axe q en ampère A ;

R_G : est la résistance équivalente de l'enroulement du stator ;

L_{Gdi} : est l'inductance équivalente du stator dans l'axe d.

L_{Gqi} : est l'inductance équivalente du stator dans l'axe q.

Le flux du stator peuvent être définis-en Wb par les équations suivantes :

$$\lambda_{Gdi} = L_{Gdi} I_{Gdi} + \lambda_m \quad (2.6)$$

$$\lambda_{Gqi} = L_{Gqi} I_{Gqi} \quad (2.7)$$

Avec :

λ_{Gdi} :est le flux du stator dans l'axe d.

λ_{Gqi} :est le flux du stator dans l'axe q.

λ_m :est le flux permanent de l'aimant.

L'équation de la balance de puissance du côté convertisseur de la génératrice :

$$P_{Gi} = -3\left(V_{Gdi} I_{Gdi} + V_{Gqi} I_{Gqi}\right) \quad (2.8)$$

$$P_{dc1i} = U_{dci} \mathrm{I}_{dc1i} \quad (2.9)$$

La dynamique de la tension U_{dci} est définie par l'équation de la capacitance de C_{dci} et elle peut être exprimée comme suite :

$$I_{dc1i} - I_{dc2i} = C_{dci} \frac{dU}{dt} dci \quad (2.10)$$

L'équation de la balance de puissance du côté convertisseur du réseau offshore :

$$P_{dc2i} = U_{dci}(\mathrm{I}_{dc2i}) n_i$$

(2.11)

Avec ni est le nombre d'éoliennes constituait le groupe

$$P_{wi} = 3\left(V_{wdi} I_{wdi} + V_{wqi} I_{wqi}\right) \quad (2.12)$$

La dynamique de l'intégration de réseau offshore peut s'écrire en cordonnées synchrone d-q tournant a w_{dq} comme suite :

$$\frac{d}{dt} I_{wdi} = -\frac{R_{Twi}}{L_{Twi}} I_{wdi} + w_{dq} I_{wqi} + \frac{1}{L_{Twi}} V_{wdi} - \frac{1}{L_{Twi}} V_{Fd} \quad (2.13)$$

$$\frac{d}{dt} I_{wqi} = -w_{dq} I_{wdi} - \frac{R_{Twi}}{L_{Twi}} I_{wqi} + \frac{1}{L_{Twi}} V_{wqi} - \frac{1}{L_{Twi}} V_{Fq} \quad (2.14)$$

Et aussi :

$$I_{Fd} = \sum_{i=1}^{5} I_{wdi} \quad (2.15)$$

$$I_{Fq} = \sum_{i=1}^{5} I_{wqi} \quad (2.16)$$

la dynamique de tension du réseau offshore peut s'ecrire en coordonnees synchrones d-q tournant a W_{dq} comme suite :

$$\frac{d}{dt}V_{Fd} = \frac{1}{C_F}\sum_{i=1}^{m} I_{wdi} - \frac{1}{C_F}I_{FRd} + w_{dq}V_{Fq} \quad (2.17)$$

$$\frac{d}{dt}V_{Fq} = \frac{1}{C_F}\sum_{i=1}^{m} I_{wdi} - \frac{1}{C_F}I_{FRd} + w_{dq}V_{Fd} \quad (2.18)$$

II.4.3.- La liaison HVDC-(Diodes-VSC)

La liaison HVDC utilisée dans le système étudie consiste d'un redresseur à diodes non contrôlé en mer, Un câble CC sous- marin et un onduleur terrestre VSC.d'une part, ce lien est relie au point PCC_F en mer par L'intermédiaire de deux Transformateurs et également de batterie de condensateurs et de filtres, d'autre part il est Au réseau terrestre par un autre Transformateur. Les principales composantes du système de transmission HVDC Proposé sont indiquées à la figure 2.6.

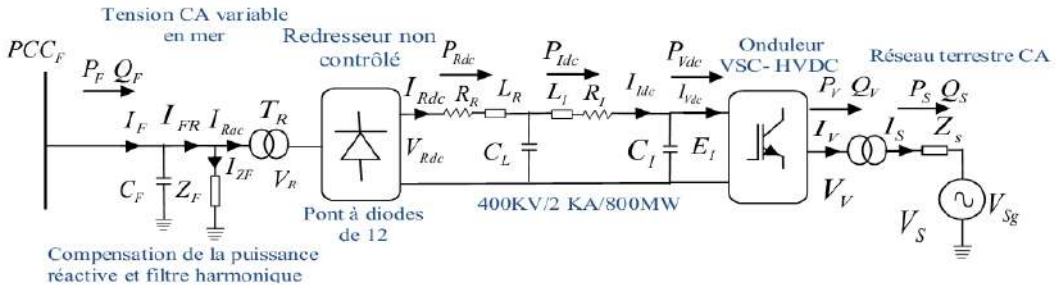


Fig. 2.6: Configuration de la transmission HVDC

II.4.3.1- Le redresseur non contrôlé à deux ponts

Un redresseur non contrôlé à diodes de 12 impulsions est utilisé dans la transmission HVDC.

Ce convertisseur est placé entre deux autres éléments contrôlés : les convertisseurs offshores des éoliennes et L'onduleur terrestre VSC, de sorte que l'utilisation du redresseur non contrôlé ne peut pas affecter le bon Fonctionnement du système. Les deux ponts doivent fournir des courants continus identiques afin que les Courants alternatifs qu'ils prélèvent sur les secondaires des transformateurs aient les mêmes valeurs.

Deux transformateurs, l'un connecté Y-Y et l'autre Y -Δ, sont utilisés pour alimenter les ponts avec un décalage De tension triphasée de 30 entre eux. La figure 2.7 montre un redresseur non contrôlé, un condensateur et un Banc de filtres.

Les transformateurs nécessitent une conception spéciale car ils doivent supporter les

harmoniques de Courants causées par les diodes. La structure de redresseur provoque une recombinaison des courants harmoniques Générés par chacun pont au primaire du transformateur et le calcul montre que les harmoniques de rang 6 k ± 1Avec k impair sont éliminés [34]. C'est le cas en particulier pour les harmoniques 5 et 7 dont les amplitudes sont Les plus importantes. Les harmoniques 11 et 13 sont conservés tandis que les harmoniques 17 et 19 sont éliminés.

Les harmoniques restants sont donc de rang 12 k ± 1 avec k entier naturel

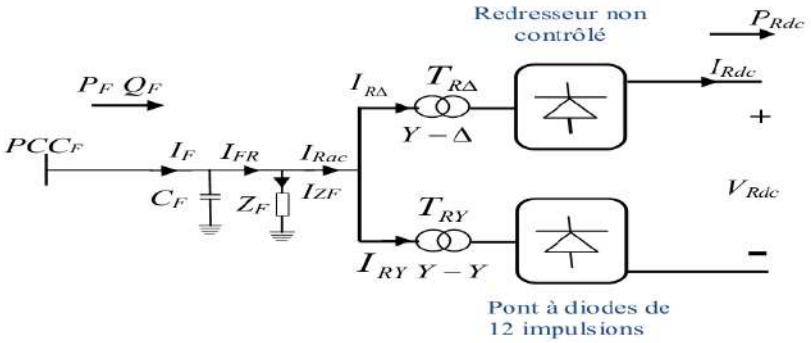


Fig. 2.7:Redresseur non contrôlé, un condensateur, un banc de filtres,
et transformateurs

L'utilisation d'un convertisseur à deux ponts est insuffisante de limiter les courants harmoniques a une faible valeur, donc il est nécessaire d'installer des circuits filtrants. Pour réduire l'effet des courants Harmoniques, on utilise des filtres réalisés par des circuits RLC. Pour un convertisseur d'indice de pulsation P = 12, on utilise des circuits résonnants pour filtrer les courants harmoniques de rang 11, et 13, et d'un filtre Amorti pour filtrer les harmoniques de rang supérieur [18].

II.4.3.2- Câble sous-marin

Un câble sous-marin est utilisé pour transporter l'électricité de la station en mer à la station terrestre Le câble est modélisé en utilisant une ligne équivalente de transmission à courant continu en T comme La montre la figure 2.8. Le câble est utilisé pour une tension de 400 kV et une puissance admissible est D'environ 800 MW.

La figure 2.8 montre le modèle en «T », avec $R_R = R_1 = 2.5$ohm et $L_R = L_1 = 0.5968$H et C_L=26Uf. V_{RDC} et $V_{LDC.}$

Représentent respectivement les tensions aux bornes du redresseur et l'onduleur.

Est la capacitance totale de La ligne de transmission CC.

I_{RDC} et I_{LDC} sont les courants continus respectivement côté redresseur et côté onduleur.

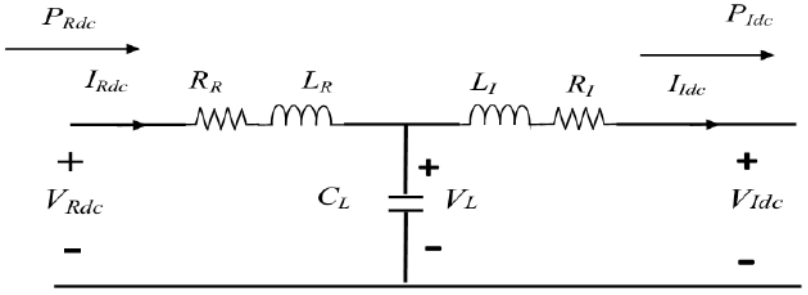


Fig. 2.8: Modèle du câble sous-marin en "T"

II.4.3.3- L'onduleur HVDC -VSC

Une configuration commune pour un convertisseur VSC à commutation forcée triphasé utilisant des valves IGBT avec des diodes antiparallèles est représentée sur la figure 2.9. Chaque bras de pont peut conduire le courant dans les deux directions en raison de unidirectionnel offert par les diodes et la polarité de tension sur Chaque IGBT et la combinaison de commutateur à diode. Un changement de direction du flux de puissance peut Maintenant être réalisé en changeant la direction du courant continu, Ceci est fait en changeant la tension continue des stations de convertisseur opposées permettant au courant continu de circuler dans la direction désirée.

La source CC est fournie par les condensateurs CC qui peuvent stocker une quantité importante d'énergie.

Les considérations de conception incluent la capacité de puissance active et réactive, les imites d'injection harmonique, les pertes de commutation de valve et les implications de coût [35].

Pour deux systèmes CA interconnectés, le flux de puissance active et réactive est déterminé par l'impédance de connexion ainsi que par l'amplitude et l'angle entre les deux vecteurs de tension. Dans ce cas, le schéma VSC représente une source de tension connectée à un système CA via les impédances combinées du transformateur du convertisseur et l'inductance série comme le montre la Figure 2.10.

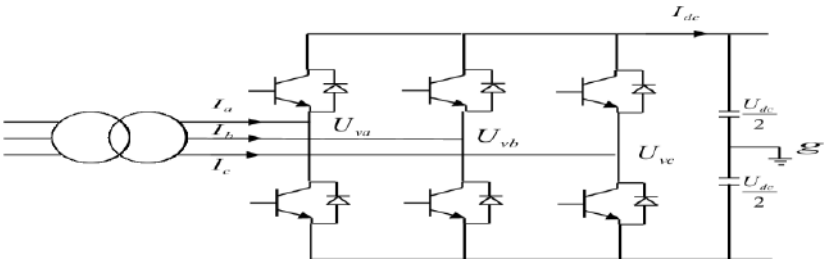


Fig. 2.9: Disposition de base du circuit VSC

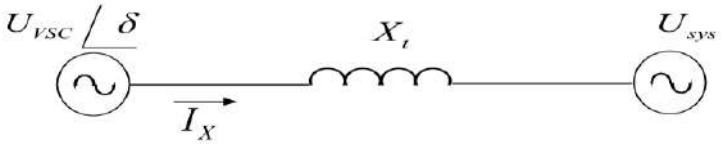


Fig. 2.10: Angle relative de tension et impédance.

La puissance réelle P qui s'écoule du convertisseur vers le système CA est donnée par la relation:

$$P = \frac{U_{sys}U_{VSC}}{X_t}\sin(\sigma) \qquad (2.19)$$

Ou V_{SYS} est la tension du système CA V_{SYS} est la tension aux bornes du VSC ;

X_t est la réactance reliant le VSC au système CA et δ indique l'angle de tension entre le VSC et le système CA.

La puissance réactive qui sera échangée entre le VSC et le système est donnée par la relation suivante :

$$Q = \frac{U_{VSC}(U_{VSC} - U_{sys}\cos(\sigma))}{X_t} \qquad (2.20)$$

A partir de ces équations, on peut voir que pour aucune différence d'angle de tension, la puissance réelle est tension, la puissance réelle est égale à zéro et la puissance réactive est déterminée par la différence des magnitudes de tension.

Si $U_{sys} > U_{VSC}$ Q est inférieur à zéro et implique un fonctionnement inductif (VSC absorbe la puissance réactive).

Si $U_{SYS} > U_{VSC}$ Q est supérieur à zéro et implique un fonctionnement inductif (VSC délivre une puissance réactive au réseau).

Pour des amplitudes égales de tension, la puissance réactive est égale à zéro et la puissance réelle est déterminée par l'angle de tension entre les deux vecteurs. Si δ >0, la puissance passe du VSC au système CA (Fonctionnement en onduleur) et si δ<0, la puissance passe du système CA au VSC (fonctionnement en redresseur).

A partir des équations de flux de puissance active et réactive (2.19) - (2.20), il a été démontré que La commande de puissance à quatre quadrants est possible et bien que la

puissance active et réactive puisse être contrôlée presque indépendamment, il existe une certaine mesure de couplage introduite une certaine mesure de couplage introduite par le schéma VSC lui-même, ainsi que les systèmes CA connectés Pour la Commande de la puissance réactive, l'indice de modulation contrôle l'amplitude de la tension alternative
Et le flux de puissance réactive et l'instant d'allumage des valves en relation avec la tension côté CA déterminent L'angle de phase de tension et le flux de puissance.

Pour les tensions et courants représentés à la figure 2.11, les équations du convertisseur Peuvent être définies :

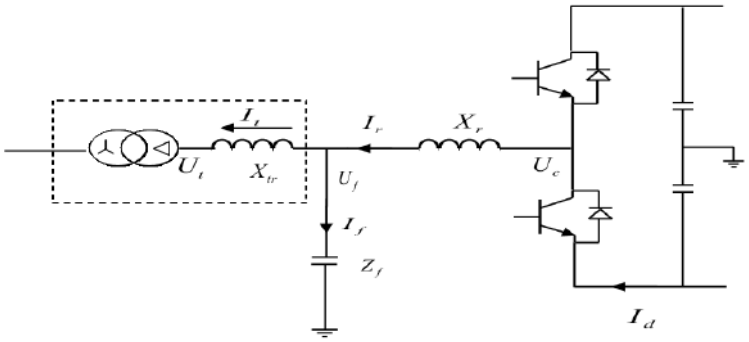


Fig. 2.11: Schéma équivalent du circuit VSC

La tension du convertisseur est donnée par la relation :

$$U_c = U_f + X_r I_r \quad (2.21)$$

Où U_F est la tension du nœud de filtre CA, X_R est la réactance de l'inductance du convertisseur et I_R est le courant traversant l'inductance du convertisseur.

Le courant I_R est donné par la relation :

$$I_r = I_t + I_f \quad (2.22)$$

Où It est le courant total à travers le transformateur du convertisseur et IF est le courant traversant l'impédance du filtre.

La tension Uf du nœud de filtre CA est donnée par la relation :

$$U_f = U_t + X_{tr} I_t \quad (2.23)$$

Où U_t est la tension sur le côté primaire du transformateur de convertisseur et X_{tr} est la réactance du transformateur de convertisseur.

Le courant de filtre I_f est donné par la relation suivante :

$$I_f = \frac{U_f}{Z_f} \quad (2.24)$$

Les équations du convertisseur définies dans les équations (2.21) - (2.24) sont représentées par un diagramme représentées par un diagramme vectoriel dans la figure 2.12

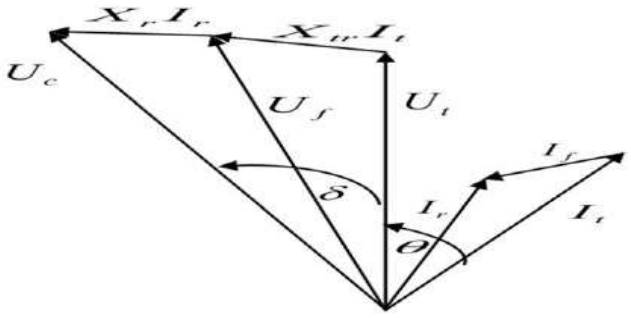


Fig. 2.12: Représentation vectorielle du Circuit VSC

A partir de la figure 2.12, peut être égale à la tension de convertisseur U_{vsc} et U_t à la tension de système U_{sys} sans le rapport de transformateur et changeur de prise.

L'angle δ est l'angle de tension à travers l'inductance du convertisseur et les impédances du transformateur et L'angle Θ est l'angle entre la tension de sortie et le courant.

Dans cette thèse, L'onduleur est composé d'un convertisseur de tension (VSC), comme le montre La figure 2.13. Le convertisseur est connecté entre une capacité de valeur C_I , qui stabilise la tension continue Nécessaire pour le VSC, et un transformateur élévateur.

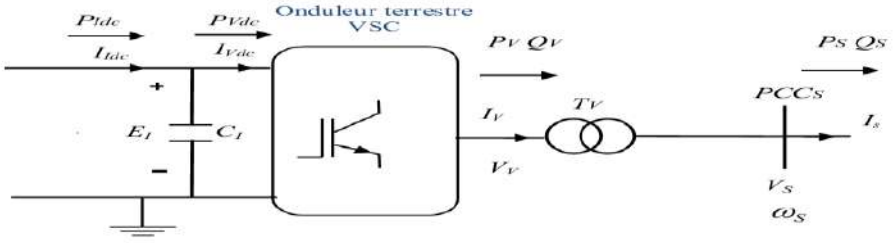


Fig. 2.13: Onduleur terrestre VSC

II.4.4- Le réseau terrestre CA

L'énergie produite par le parc éolien en mer et transportée par la liaison HVDC est finalement délivrée au réseau terrestre. Pour caractériser le comportement du réseau au point

de connexion PCC_S, on utilise un modèle simplifié constitué d'un réseau équivalent de Thevenin, formé par une impédance Z_S et une source de tension V_{Sg} comme il est montré dans la figure 2.14 [36]. L'impédance est constituée par une résistance R_S en série avec une inductance L_S .

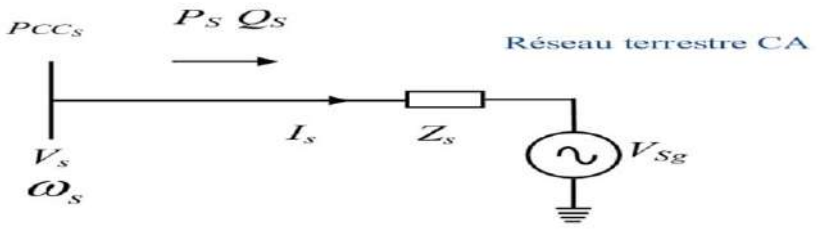


Fig. 2.14: Modèle de réseau terrestre CA

II.5- Commande du système étudié

Cette section présente la conception des stratégies de contrôle pour un parc éolien en mer connecté au système de transmission HVDC constitué d'un redresseur diode et un onduleur VSC.

Le comportement des composants de l'ensemble du système est évalué, des stratégies de contrôle Qui assurent un bon comportement du système sous des courts-circuits appliqués dans les deux cotés des réseaux CA sont proposés.

De plus, des systèmes de protection contre les surtensions sont ajoutés au double convertisseur de la turbine et à l'onduleur VSC de la liaison HVDC, sous la forme de résistances de freinage dynamique.

L'objectif principal du système de contrôle utilisé est de laisser le parc éolien en mer produire la quantité maximale de puissance active à tout moment et laisser le système de transmission HVDC assure que le réseau CA comporte des conditions de fonctionnement stables, avec de fluctuations réduites de tension et de fréquence. Ceci est réalisé par les objectifs de contrôle suivants :

• La vitesse de La turbine éolienne est contrôlée par la variation de l'angle de calage ;

• Le convertisseur côté génératrice de l'éolien contrôle la tension continue ;

• Le convertisseur côté réseau CA de l'éolien contrôle la fréquence et une autre grandeur, qui peut être la tension du réseau ou la puissance délivrée par les éoliennes ;

• Le redresseur en mer de la liaison HVDC n'est pas contrôlé ;

• L'onduleur terrestre VSC de la liaison HVDC assure des conditions de fonctionnement stables pour le Convertisseur en mer en contrôlant la tension continue CC et la puissance réactive.

II.5.2- Contrôle de la génératrice et contrôle de la tension continue du double Convertisseur

La commande de la génératrice synchrone à aimants permanents s'effectue sur les axes d-q orientés au champ magnétique du rotor. La puissance mécanique appliquée sur l'arbre de la génératrice à aiment permanant peut être exprimée par :

$$P_{méc} = -T_{em}\Omega_G \quad (2.25)$$

Ou Ω_G est la vitesse angulaire du rotor de la génératrice en [rad / s] et Tem est le couple électromécanique de la génératrice et aussi cette puissance peut être exprimée par :

$$P_{méc} = -W_G \emptyset_{Gq} I_{Gd} + W_G \emptyset_{Gd} I_{Gq} \quad (2.26)$$

$$P_{méc} = -W_G L_{Gq} I_{Gd} + W_G (L_{Gd} I_{Gd}) I_{Gq} + W_G \lambda_m I_{Gq} \quad (2.27)$$

Pour une machine à pôles lisses LGd = LGq = LG et pour une machine à poles saillants on suppose que le courant actif IGd egal à zero. Dans les deux cas, l'"équation 2.27 devient:

$$P_{méc} = W_G \lambda_m I_{Gq} \quad (2.28)$$

De l'équation 2.25 et l'équation 2.28:

$$-T_{em}\Omega_G = W_G \lambda_m I_{Gq} \quad (2.29)$$

Le couple électromécanique de la géneratrice peut être exprimée est :

$$T_{em} = -3\lambda_m I_{Gq} \quad (2.30)$$

Ou λ_m est le flux permanent de l'aimant. Le couple par unité de courant est maximal et il est contrôlé Uniquement avec le courant q. Pour le c ontrôle des deux courants, les tensions d'entrée peuvent être prise à Partir des équations :

$$u_{Gd} = \frac{1}{L_{Gd}}(V_{Gd} + W_G L_{Gq} I_{Gq}) \quad (2.31)$$

$$u_{Gq} = \frac{1}{L_{Gd}}(V_{Gd} + W_G (L_{Gq} I_{Gq} + \lambda_m)) \quad (2.32)$$

Alors la dynamique de la génératrice peut être écrite comme suit:

$$u_{Gd} = \frac{R_G}{L_{Gd}} I_{Gd} + \frac{dI_{Gd}}{dt} \quad (2.33)$$

$$u_{Gq} = \frac{R_G}{L_{Gq}} I_{Gq} + L_{Gq} \frac{dI_{Gd}}{dt} \quad (2.34)$$

Les deux systèmes résultants sont des systèmes de premier ordre et peuvent être contrôlés par des régulateurs PI dans les axes synchrones d-q. les fonctions de transfert de ces deux systèmes sont :

$$I_{Gd}(s) = \frac{1}{S+\frac{R_G}{L_{Gd}}} u_{Gd}(S) \quad (2.35)$$

$$I_{Gq}(s) = \frac{1}{S+\frac{R_G}{L_{Gq}}} u_{Gq}(S) \quad (2.36)$$

Le convertisseur de la génératrice (back-end) est responsable de contrôler les courants de la génératrice, faisant plus facile d'ajouter des limites à ces courants.

La limitation des courants est d'une grande Importance pour maintenir l'intégrité des composants, en particulier en cas de défauts dans le système Devant la boucle interne du courant $I_{Gq,}$ une autre boucle lente de régulation est utilisée afin de Contrôler la tension U_{dc} du double convertisseur de la liaison. Négligeant les pertes dans la génératrice

Du convertisseur :

$$-3\left(V_{Gd}I_{Gd} + V_{Gq}I_{Gq}\right) = U_{dc}I_{dc1} \quad (2.37)$$

La dynamique de la tension U_{dc} est définie par l'équation de la capacitance C_{dc1} de la liaison CC et Peut être exprimée comme suit [37] :

$$I_{dc1} - I_{dc2} = C_{dc1}\frac{dU_{dc}}{dt} \quad (2.38)$$

En supposant que la référence de courant de champ est mise à zéro, c'est -à- dire $I^*_{Gd} = 0$, alors :

$$-3\mathrm{V_{Gq}I_{Gq}} = \mathrm{U_{dc}I_{dc1}} \quad (2.39)$$

Donc on peut écrire l'équation 2.39 comme suit:

$$-3\mathrm{V_{Gq}I_{Gq}} = \mathrm{C_{dc1}U_{dc}}\frac{\mathrm{dU_{dc}}}{\mathrm{dt}} + \mathrm{U_{dc}I_{dc2}} \quad (2.40)$$

On peut définir l'expression suivante comme un artifice mathématique:

$$\frac{\mathrm{dU^2_{dc}}}{\mathrm{dt}} = 2\mathrm{U_{dc}}\frac{\mathrm{dU_{dc}}}{\mathrm{dt}} \quad (2.41)$$

On peut donc écrire l'équation 2.40 comme suit:

$$\frac{\mathrm{dU^2_{dc}}}{\mathrm{dt}} = -\frac{1}{C_{dc1}}(6V_{Gq}I_{Gq} + 2U_{dc}I_{dc2}) \quad (2.42)$$

Afin d'effectuer un découplage dynamique, l'expression suivante est définie :

$$U_{U_{dc}} = -\frac{1}{C_{dc1}}(6V_{Gq}I_{Gq} + 2U_{dc}I_{dc2}) \quad (2.43)$$

Par conséquent, la dynamique de U^2_{dc} est réduite à l'expression suivante :

$$U_{U_{dc}} = \frac{dU^2_{dc}}{dt} \quad (2.44)$$

La fonction de transfert correspondante peut être définie comme suit:

$$U^2_{dc} = \frac{1}{S}U_{U_{dc}}(S) \quad (2.45)$$

Alors U_{Udc} devient un simple intégrateur et peut être facilement contrôlé par une boucle

U_{dc}^2 de régulation PI :

Selon l'équation 2.43, il est possible de régler aux valeurs souhaitées en utilisant la référence de Courant de la génératrice I_{Gq} comme suit :

$$I_{Gq} = \frac{C_{dc1}}{6V_{Gq}} U_{U_{Dc}} - \frac{U_{dc} I_{dc2}}{3V_{Gq}} = -\frac{C_{dc1}}{6V_{Gq}} \left[U_{U_{dc}} + \frac{2U_{dc} I_{dc2}}{C_{dc1}} \right] \quad (2.46)$$

Où U_{Udc} est la sortie du contrôleur PI utilisé dans la boucle de contrôle de U^2_{dc} en outre,La référence de courant de couple de la génératrice I_{Gq} a été limitée, de sorte que la génératrice ne fonctionnera jamais dans la région de motorisation. La boucle de contrôle proposée U^2_{dc} est représentée sur la figure 2.15 [38].

Si la tension U_{dc} reste constante, la puissance P_G délivrée par la génératrice suivra les variations de puissance P_W délivrée par le réseau qui est connecté au point de connexion commun PCCF. Ce résultat Permet l'utilisation du convertisseur de réseau de l'éolienne de suivre le point de puissance maximum.

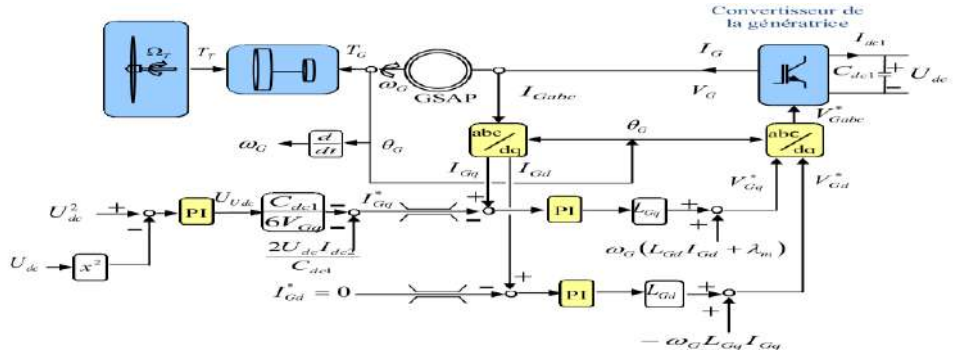


Fig. 2.15: Diagramme de bloc de contrôle du convertisseur de la génératrice GSAP

II.5.3- Contrôle de la tension alternative et de la fréquence du réseau offshore CA

A partir des d'équations 2.13 et 2.14, on peut écrire :

$$\frac{d}{dt} I_{wdi} + \frac{R_{Twi}}{L_{Twi}} I_{wdi} = +w_F I_{wqi} + \frac{1}{L_{Twi}} V_{wdi} - \frac{1}{L_{Twi}} V_{Fd} \quad (2.47)$$

$$\frac{d}{dt} I_{wqi} + \frac{R_{Twi}}{L_{Twi}} I_{wqi} = -w_F I_{wdi} + \frac{1}{L_{Twi}} V_{wqi} \quad (2.48)$$

Les tensions d'entrée sont définies comme suit :

$$u_{wd} = \frac{d}{dt} I_{wdi} + \frac{R_{Twi}}{L_{Twi}} I_{wdi} \quad (2.49)$$

$$u_{wq} = \frac{d}{dt} I_{wqi} + \frac{R_{Twi}}{L_{Twi}} I_{wqi} \quad (2.50)$$

Le résultat est donc des systèmes de premier ordre qui peuvent être contrôlés par des Régulateurs PI.

Les fonctions de transfert de ces systèmes sont :

$$I_{wdi}(S) = \frac{1}{s+\frac{R_{Twi}}{L_{Twi}}} u_{wd}(S) \quad (2.51)$$

$$I_{wqi}(S) = \frac{1}{s+\frac{R_{Twi}}{L_{Twi}}} u_{wq}(S) \quad (2.52)$$

La figure 2.16 montre la commande des courants d-q du convertisseur de réseau offshore.

La puissance totale générée est divisée en m sources d'énergie. Il est donc nécessaire de définir Un coefficient de participation de chaque groupe en fonction de sa puissance nominale. Ce coefficient De participation sera défini pour chaque groupe comme suit :

$$K_{dqi} = \frac{Puissance\ nominale\ du\ i^{éme}\ groupe}{Puissance\ globale\ du\ parc\ éolien\ offshore} \quad (2.53)$$

Notez que $K_{di}=K_{qi}$ et

$$\sum_{i=1}^{m} K_{dqi} = 1 \quad (2.54)$$

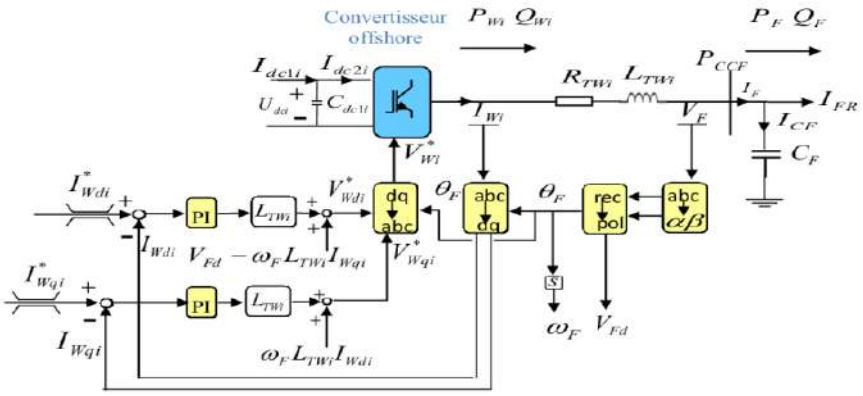


Fig. 2.16: Schéma fonctionnel de contrôle des courants

Pour contrôler la tension et la fréquence du réseau offshore, on utilise la dynamique du Condensateur C_f. Dans ce cas, si la variable d'entrée est définie :

$$u_v = \frac{1}{C_F}(I_{Fd} - I_{FRd}) \quad (2.55)$$

Ensuite, on obtient un système de premier ordre:

$$u_v = \frac{dV_{Fd}}{dt} \quad (2.56)$$

La fonction de transfert de ce système est comme suit

$$V_{Fd}(S) = \frac{1}{S} u_v(S) \quad (2.57)$$

De sorte que la tension V_{fd} peut également être commandée avec un régulateur P.

D'autre part pour contrôler la fréquence, un régulateur P peut être utilisé, de sorte que :

$$I_{Fq} = C_F V_{Fd} w_F + I_{FRq} \quad (2.58)$$

Comme la tension et la fréquence au point P_{CCF} sont communes à toutes les turbines éoliennes, Une commande distribuée est utilisée pour que les courants I_{Fd}, I_{Fq} soient fournis par toutes les éoliennes,Ce qui est fait en proportion de sa commande de puissance nominale :

$$I^*_{wdi} = K_{di} I^*_{Fd} \quad (2.59)$$

$$I^*_{wqi} = K_{qi} I^*_{Fq} \quad (2.60)$$

La figure 2.17 montre les boucles de contrôle de la tension et de la fréquence du réseau Offshore CA, y compris les termes des protections (la protection est étudiée en détail dans la section II.6).

Dans la figure 2.17, P_{Giopt} est la puissance optimale fournie par la turbine éolienne. Cette puissance Est dérivée de la caractéristique de puissance optimale de l'éolienne [39]. Cette puissance peut être donnée par :

$$P_{Giopt} = K_{opt} \Omega^3_T \quad (2.61)$$

Où Ω_T est la vitesse de la turbine éolienne, K_{opt} est une constante optimale qui dépend de la caractéristique physique du rotor de la turbine éolienne et de la densité de l'air.

Lorsque le système fonctionne dans des conditions normales, la commande décrite permet à chaque éolienne d'obtenir un travail supplémentaire au point de puissance maximale. Pour cela, il est utilisé comme tension de référence V_{Fd} =1.1 pu et le courant I_{Wid} est limité à une valeur maximale I_{Widmax} qui est donnée par la puissance éolienne optimale P_{Gioot} à la figure 2..2. Bien que, de ce fait, le contrôle de tension est perdu, donc cela ne subit pas de grandes variations, puisque le redresseur HVDC couple cette tension avec la tension continue V_{Rdc} :

$$V_{Rdc} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} BNV_{Fd} - \frac{3}{\pi} BW_F L_{TR} I_{Rdc} \quad (2.62)$$

Cette tension continue est régulée par l'onduleur de la liaison HVDC et la protection VDCOL limiteles courants délivrés par l‟onduleur éolien lors de courts- circuits dans le réseau offshore lorsque la tension VFd est réduite.

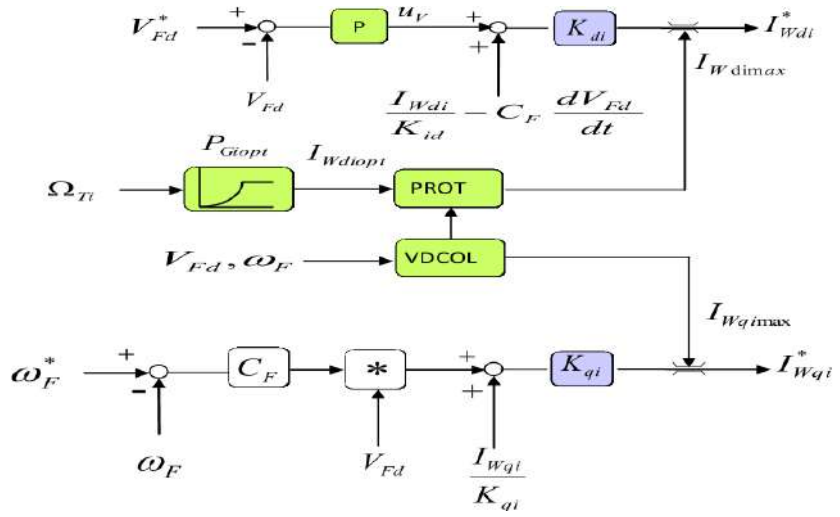


Fig. 2.17: Schéma de contrôle de la tension et de la fréquence du réseau offshore

II.5.4 - Contrôle de l'onduleur terrestre VSC

L'onduleur de la liaison HVDC se compose d'un convertisseur VSC. Le système de contrôle se Compose d'une boucle interne qui représente le contrôle des courants et une boucle externe représente le contrôle de la tension offshore CA et la fréquence.

II.5.4.1- Contrôle des courants de l'onduleur terrestre VSC

Pour contrôler les courants de l'onduleur VSC, on utilise une stratégie similaire à celle utilisée dans le convertisseur de réseau de la turbine éolienne, à la différence que les axes sont orientés avec la tension V_S, Donc V_{Sd} =0. Les tensions d'entrée sont définies :

$$u_{vd} = \frac{1}{L_v}(V_{Vd} + w_s L_{Vq} I_{Vq} - V_{sd}) \quad (2.63)$$

$$u_{vq} = \frac{1}{L_v}(V_{Vq} + w_s L_V I_{Vd}) \quad (2.64)$$

Les équations suivantes du transformateur :

$$u_{Vd} = \frac{R_V}{L_V} I_{Vd} + \frac{dI_{Vd}}{dt} \quad (2.65)$$

$$u_{Vq} = \frac{R_V}{L_V} I_{Vq} + \frac{dI_{Vq}}{dt} \quad (2.66)$$

Les fonctions de transfert de ces systèmes sont comme suit :

$$I_{Vd}(S) = \frac{1}{S+\frac{R_V}{L_V}}\, u_{Vd}(S) \quad (2.67)$$

$$I_{Vq}(S) = \frac{1}{S+\frac{R_V}{L_V}}\, u_{Vq}(S) \quad (2.68)$$

Donc, des systèmes de premier ordre qui peuvent être contrôlés par des régulateurs PI. La figure 2.18Montre le contrôle des courants du convertisseur VSC. De nouveau, des limites sont incluses dans les courants Pour protéger les composants du système [40].

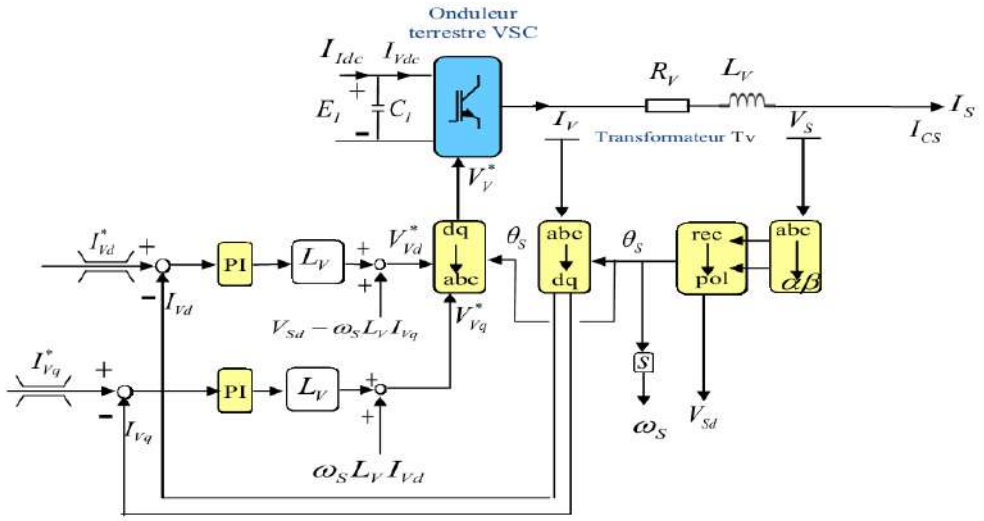


Fig. 2.18: Diagramme de bloc du contrôle des courants du convertisseur VSC

Avec les deux boucles de régulation de courant qui sont implémentées, deux autres boucles Externes seront introduites : une boucle lente pour contrôler la tension continue de la liaison HVDC et une Autre pour contrôler la puissance réactive.

II.5.4.2- Contrôle de tension CC de la liaison HVDC

Le contrôle de tension de la liaison HVDC est conçu à partir de l'équation du condensateur

$$I_{Idc} - I_{Vdc} = C_t \frac{dE_t}{dt} \quad (2.69)$$

Négligeant les pertes dans le convertisseur VSC :

$$3\left(V_{Vd}I_{Vd} + V_{Vq}I_{Vq}\right) = E_I I_{Vdc} \quad (2.70)$$

Donc :

$$E_I I_{Idc} - 3V_{Vd}I_{Vq} - 3V_{vq}I_{Vq} = C_I \frac{dE^2{}_I}{dt} \quad (2.71)$$

En supposant : donc :Vvq ≃ 0

$$P_{IDC} - 3V_{Vd}I_{Vd} = C_I \frac{dE^2{}_I}{dt} \quad (2.72)$$

Où $P_{IDC} = E_I I_{dc}$ L'entrée est définie :

$$u_{EI} = \frac{1}{C_I}(P_{Idc} - 3V_{Vd}I_{Vd}) \quad (2.73)$$

Alors :

$$u_{EI} = \frac{dE^2{}_I}{dt} \quad (2.74)$$

La fonction de transfert de ce système est :

$$E^2{}_I(s) = \frac{1}{s}\, u_{EI}(s) \quad (2.75)$$

Un système de premier ordre est obtenu. Il peut être commandé par un contrôleur PI. La figure 2.19 Montre le contrôle de tension de la liaison HVDC où Vv = 230/√3 KV.

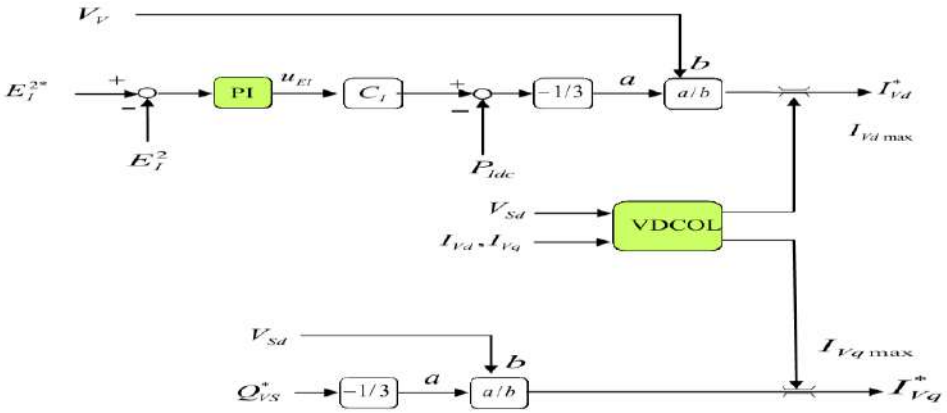


Fig. 2.19: Diagramme de bloc de contrôle externe du convertisseur VSC

II.5.4.3- Contrôle de la puissance réactive

Le contrôle de la puissance réactive est aussi illustré à la Figure 2.21. L'expression de la puissance réactive du convertisseur VSC injecté au réseau est utilisée en coordonnées d-q :

$$Q_{VS} = -3V_{sd}I_{Vq} \quad . \quad (2.76)$$

Le contrôle de la boucle du courant réactif permet l'écriture $I_{Vq} \approx I^*_{Vq}$ alors:

$$I^*{}_{Vq} = \frac{-1}{3V_{sd}}\, Q^*{}_{VS} \quad (2.77)$$

II.6- Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les principales composantes du parc éolien en mer connecté Au système de transmission HVDC basé sur un redresseur à diodes et un onduleur VSC. La liaison HVDC utilise un redresseur de ponts à diodes qu'il ne peut pas être contrôlé. Cette limitation apparente Est résolue par la commande disponible dans le convertisseur de l'éolienne du réseau offshore.

Le convertisseur de source de tension VSC a été considéré comme idéal, négligeant les Pertes de conduction et de commutation, ainsi que les harmoniques. Comme pour le réseau terrestre,

Un modèle simple est utilisé par équivalent de Thevenin, avec une puissance de court-circuit relativement élevée.

Le premier convertisseur du double convertisseur de la turbine éolienne qui fonctionne comme Un redresseur a été utilisé pour ajuster la tension continue de la liaison CC dos à dos tandis que le deuxième convertisseur a été actionné pour régler la tension alternative et la fréquence du réseau offshore.

Le contrôle de l’onduleur VSC de la liaison HVDC à été basé sur le réglage de la tension continue de la Liaison et le réglage de la puissance réactive coté réseau terrestre. La stratégie de contrôle utilisée pour le Convertisseur offshore et l'onduleur terrestre VSC a permis au redresseur non contrôlé de la liaison HVDC De ne pas affecter le bon fonctionnement du système.

Les stratégies de contrôle du parc éolien en mer connecté au système de transmission HVDC, permis de bien gérer la transmission de la puissance de tous les cinq groupes au point de couplage Commun et par conséquence la transmission de cette puissance au réseau terrestre au moyen du système HVDC. Aussi, on a inséré aussi dans le système de contrôle des stratégies de protection par l’utilisation De la fonction VDCOL qui agisse lorsqu'un court-circuit se produit sur les réseaux CA offshore et Terrestre.

Chapitre III :

Simulation et Analyse des résultats

III .1- Introduction

Dans Cette partie se concentre sur l'évaluation de la robustesse et la performance de système VSC- HVDC, au cours de son état d'équilibre et Le fonctionnement de l'éolienne, ainsi la variation et l'écoulement de puissance en utilisant la simulation par le logiciel MATLAB/Simulink.

III.2.Simulation de système HVDC-VSC

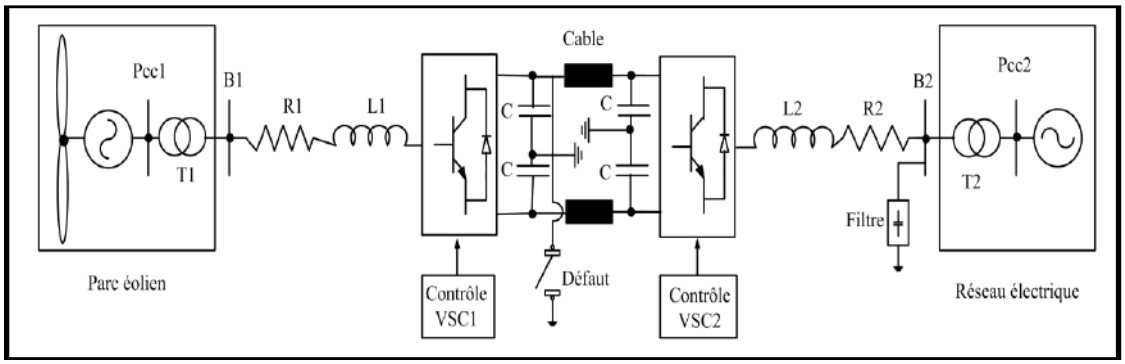


Figure 3.1 Éolienne offshore avec système de transmission VSC-HVDC

Cette partie se concentre sur l'évaluation de la robustesse et la performance de système VSC- HVDC, au cours de son état d'équilibre et son état dynamique, ainsi la variation et l'écoulement de puissance en utilisant la simulation par le logiciel MATLAB/Simulink

Le tableau et la figure 3.1, présentent les paramètres et le modèle complet, le parc éolien de 100 MW composés de 160 éoliennes et le système VSC-HVDC à trois niveaux point neutres calés à base d'IGBT pour la transmission, qui est synchronisée, afin de maintenir la fréquence constante. Le tableau 3.1 présente les paramètres du système VSC- HVDC offshore qui est simulé avec un pas de temps de 1.5 ms en observant la réponse globale du système au démarrage et les changements majeurs au cours de défauts.

Les résultats de simulations du courant et tension continue sont illustrée par les figures suivantes :

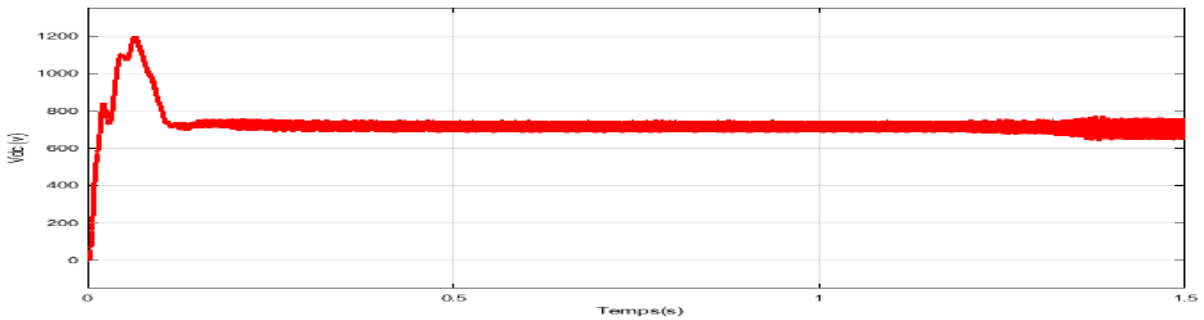


Figure 3.2 : *Forme d'onde de la tension Vdc1 (redresseur).*

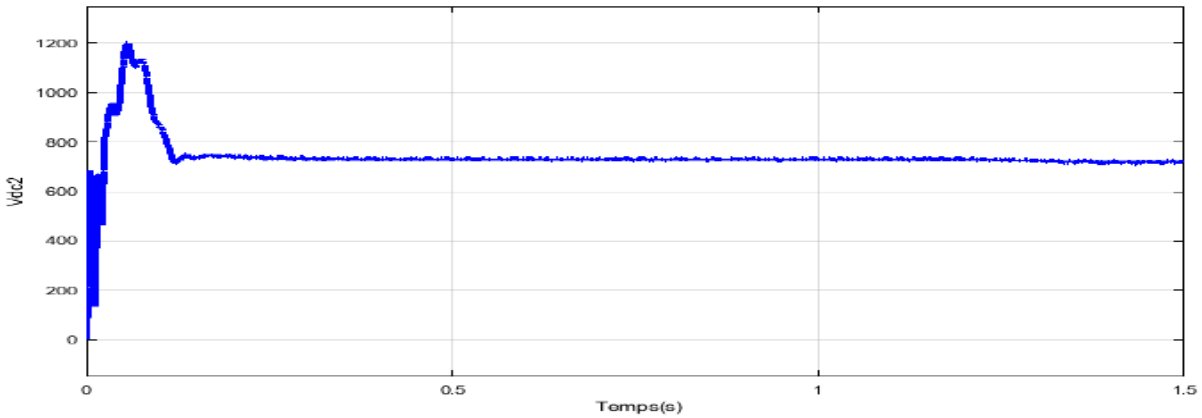


Figure 3.3 : Forme d'onde de la tension Vdc2(onduleur).

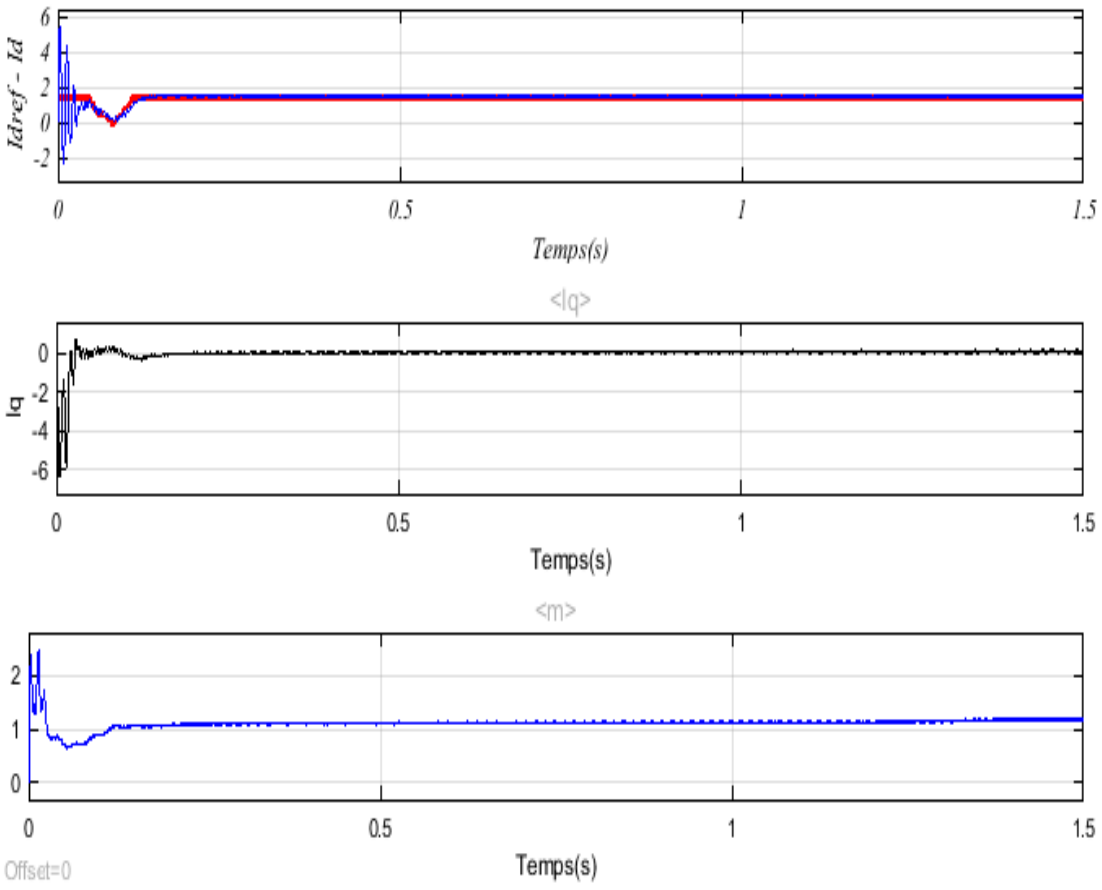


Figure 3.4 : Forme d'onde de les courantVdc2 (onduleur).

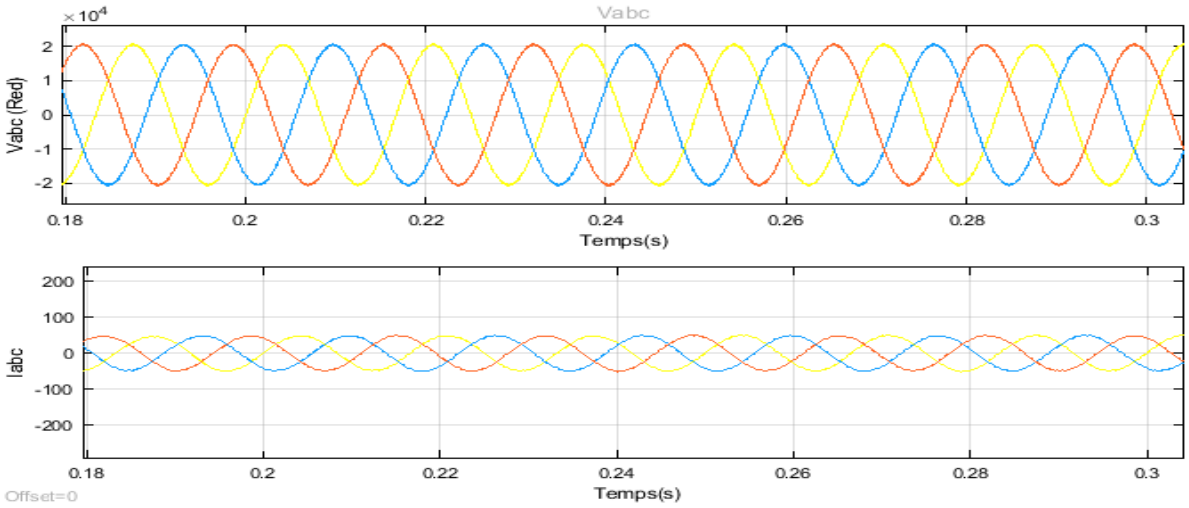


Figure 3. 5 : Les Tensions (Vabc) et Les courants(Iabc)

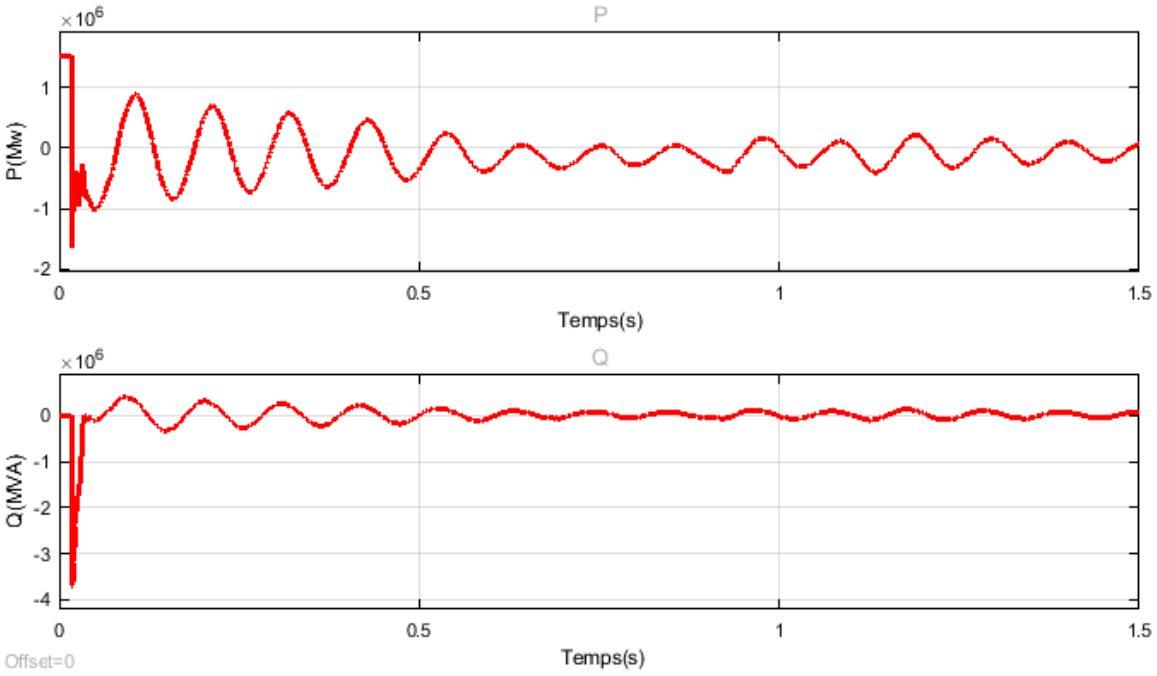


Figure 3.6: puissance active (P MW) et puissance réactive (Q Mvar)

Les résultats de simulation montrent qu'il y a une bonne tendance de la tension Vdc à s'aligner avec la référence, suivant les figures (3.2, 3.3). Ainsi, les tensions cotées continues de redresseur et onduleur sont bien alignées à 800 KV et le système atteint le régime permanent avec un bon écoulement de puissance.

Le figure (3.4) montre les courants bien organisés en fonction du courant de référence.

Le figure (3.5) Présentent la tension sinusoïdale inchangeable par contre le courant change son amplitude.

Le figure 3.5 présentent l'écoulement de puissance(active et reactive), ils résultent que les contrôleurs fonctionnent correctement et le système VSC-HVDC à des réponses stable et raisonnables.

III.3 - Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné une idée générale sur les systèmes VSC –HVDC offshore. Toutes les composantes du système VSC-HVDC sont expliquées, ainsi que sa modélisation.

L'évolution rapide de l'électronique de puissance permet de développer le secteur de l'énergie électrique.

Les résultats des simulations obtenus montrent le bon fonctionnement de notre système ainsi la robustesse .Les formes d'ondes des grandeurs électriques, entre autres, la tension, le courant, la puissance active et réactive, le courant et la tension continue, sont présentées et analysées au cours de l'apparition de défaut et d'analyse du comportement de la transmission du système VSC-HVDC offshore.

CONCLUSION GENERALE

Dans notre mémoire, nous avons simulé le système VSC-HVDC offshore à base d'IGBT à trois niveaux point neutre calé (NPC) ce qui rend le contrôle des grandeurs de sortie du convertisseur plus facile. Cette flexibilité, de contrôle, permet d'avoir un certain nombre d'avantages du système VSC-HVDC offshore. Afin d'utiliser pleinement la capacité des VSC-HVDC, le contrôle de la puissance et de la tension de bus continu a été utilisé en augmentant la performance et le rendement du système. L'utilisation de synchronisation entre le parc éolien et le système de transmission VSC-HVDC rend le système efficace et améliore les signaux au cours de la transmission.

Les principales contributions de ce mémoire sont les suivantes :

• développement d'un modèle détaillé du système VSC-HVDC à trois niveaux .

• conception et mise en œuvre du système de transmission VSC-HVDC connecté aux deux réseaux, l'un infini et l'autre privé, afin de comprendre leur comportement fonctionnel dans l'état dynamique, transitoire et de défaut.

Les résultats des simulations du système VSC-HVDC avec une stratégie de contrôle simple et efficace montrent le bon fonctionnement du système, durant toutes les phases opérationnelles. Nous constatons ainsi que :

• le système à une réponse rapide;

• les puissances actives et réactives dans les deux côtés du système peuvent être contrôlées indépendamment;.

En fin pour les futurs travaux, on suggère :

• d'adopter un dispositif de contrôle commandé à distance en temps réel pour améliorer le système et éviter les imprévues en cas de défauts;

- d'utiliser le multi-terminal du système VSC-HVDC;
- alimenter le système VSC-HVDC par les parcs éoliens et solaires.

ANNEXE I

Tableau -3 -1 : Paramètres de système VSC-HVDC

Paramètres de système	**Valeur**
La puissance nominale	100 MW
La tension primaire de T1	25 KV
La tension secondaire de T1	100 KV
La tension primaire de T2	80 KV
La tension secondaire de T2	100 KV
La fréquence	60 Hz
Tension DC	±100 KV
Longueur de câble DC	25 km
L'impédance de câble DC	0.159 mH/Km
La résistance de câble DC	0.0139 Ω/Km
La capacité de câble DC	0.231µF/Km

References bibliographies

[1] B. R. Stanley "Renewable energy today and tomorrow" Proceedings of the IEEE Volume: 89, Issue: 8, pp. 1216-1226, 2001.

[2] S. Talpur "Dynamic line rating implementation as an approach to handle wind power integration" Master Thesis, Department of Electromagnetic Engineering School of Electrical Engineering The Royal Institute of Technology , Stockholm, 2013.

[3] Ch. Ismunandar "Control of Multi-Terminal VSC-HVDC for Offshore Wind Power Integration" Master thesis, Faculty of Electrical Engineerin Mathematics and Computer Science, Delft University of Technology, Netherlands, August, 2010.

[4] L. Mazouz. S.A. Zidi, S. Saadi, M. Khatir, T. Benmassaoud. "VSC-HVD system optimized PI controllers using bacterial foraging algorithm" Electrical Engineering journal. Springer, Volume 97, Issue 3, pp 205-212, September 2015.

[5] B. Amin, "memoire pour obtznir le diplome de master professionnel," etude Concept. d'un systéme hybridz Prod. d ' énergie, p. 65, 2015.

[6] M. L. Djamel, "these ,doctorat d'etat ,en electrotechnique," Prod. Decent. couplage au . reseau, p. 173, 2008

[7] kalla fayçal Aouachria, Z, "mémoire magister," la cnversion thermdynamique l"énergie solaireetude modélisation d'un capteur Sol., pp. 1–73, 2014.

[8] A. Mirecki, "thèse,docteur de l'institut nationel polytechnique de toulouse," Etude Comp. chaînes Convers. d'énergie dédiées à une éolienne petite puissance, no. 2213, p. 252, 2005.

[9] F. Omar, "Mémoire de Magister en electrotechnique," Contrib. à l ' Etude des Systèmes Hybrides Génération Appl. aux Energies Renouvelables, p. 130, 2013.

[10] R. Radia, "magister en electrotechnique," etude d'une Chain. Convers. d'énergie éolienne, 2009.

[11] H. Kanchev, "these doctoret en génie electrique," Gest. des flux énergétiques dans un systéme hybride sources d ' énergie renouvelable Optim. la Planif. opérationnelle Ajust. d'un micro réseau électrique urbain, p. 207, 2014.

[12] S. K Chaudhary "Control and Protection of Wind Power Plants with VSC- HVDC Connection" Doctorate thesis, The Faculty of Engineering, Science and Medicine, Aalborg University, Denmark 2011.

[13] R. Piccin “Partial Discharge Analysis in HVDC Gas Insulated Substations" Department of intelligent electrical power grids, Delft University of Technology, Netherlands, July 2013.

[14] M. Khatir “ Analyse de performance des différentes configurations d’une liaison de transport d‟énergie à courant continu VSC HVDC et son impact sur la fiabilité des réseaux alternatives connectés” Doctorate thesis, University of Sidi Bel Abbès, Algeria, July 2010.

[15] G. S. Structural “Flexibility of Large Direct Drive Generators for Wind Turbines” Master thesis, University of Siegen geborente Damauli, Nepal 2013.

[16] S.A. Zidi “Contribution à l‟étude des réseaux de transport d‟énergie électrique à courant continu haute tension (CCHT) en régime dynamique” Doctorate thesis, Sidi Bel Abbès University, Algeria, 2005.

[17] S. Hadjeri, Etat de l‟art dans le domaine du transport en courant continu à haute tension (CCHT): modélisation, performance et simulation”, Doctorate thesis, Université Djillali Liabès de Sidi Bel-Abbès, Algérie, 2003.

[18] L. Mazouz “ Etude Et Simulation D‟un Modèle De CIGRE D‟une Liaison CCHT’’ Master thesis, Sidi Bel Abbès University, Algeria 2010.

[19] J. R. D´Derlée “Control strategies for offshore wind farms based on PMSG wind turbines and HVdc connection with uncontrolled rectifier” Doctorate thesis, University polytechnic of Valencia, July, 2013

[20] J. Bowles, “Multi-terminal HVDC transmission systems incorporating diode rectifier stations” Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, vol. PAS- 100, no. 4, pp. 1674-1678, 1981.

[21] S. Hungsasutra and R. Mathur “Unit connected operator with diode valve rectifier scheme,” Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 4, no. 2, pp.538-543, 1989.

[22] T. Machida, I. Ishikawa, E. Okada, and E. Karasawa, “Control and protection of HVDC systems with diode valve converter” Electrical Engineering in Japan, vol. 98, no. 1, pp. 62-70, 1978.

[23] M. Holm “DC voltage control in stacked converters at low pulse numbers” Master of Science Thesis, Chalmers University Of Technology, Goteborg, Sweden, 2007.

[24] D. Gilles “VSC-HVDC in meshed networks” Master of science thesis, Katholieke University Leuven, Belgium, 2008.

[25] O. Lennerhag "Traff Modelling of VSC-HVDC for Slow Dynamic Studies" Master of science thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden 2013.

[26] M. P. Bahrman "Hvdc transmission overview" Power Systems, IEEE Transactions on, pp. 1-7, 2008.

[27] M. P. Bahrman "Overview of HVDC transmission" PSCE, pp. 18-23, 2006.

[28] Miteshkumar Nandlal Popat "Current So urce Converter Based Offshore Wind Farm" Configuration and Control" Doctorate Thesis, Ryerson University, Toronto, Canada 2013.

[29] G. Puglia "Life cycle cost analysis on wind turbines" Master of Science thesis,Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2013.

[30] L. Max "Energy Evaluation for DC/DC Converters in DC-Based Wind Farms" Licentiate Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2007.

[31] T. Thiringer and J. Linders, "Control by variable rotor speed of a fixed- pitch wind turbine operating in a wide speed range," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 8, no. 3, pp. 520–526, September 1993.

[32] B. Toual "Modélisation et Commande Floue Optimisée d‟une Génératrice àdouble Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable" Master of Science thesis, University of Batna, Algeria, 2010.

[33] Z. Fan "Mathematical Modelling of Grid Connected Fixed-Pitch Variable – Speed Permanent Magnet Synchronous Generator s for Wind Turbines". Master thesis, University of Central Lancashire, June 2012.

[34] F. Jean Noël "Harmoniques en amont des redresseurs des ASI" Cahier Technique Merlin Gerin n° 160, édition Mars 1993

[35] M. P. Bahrman "Overview of HVDC transmission" PSCE, pp. 18-23, 2006.

[36] S. Bernal-Perez, Salvador Añó-Villalba, Ramon Blasco-Gimenez, ,and Johel Rodríguez-D‟Derlée "Efficiency and Fault Ride-Through Performance of a diode-Rectifier- and VSC-Inverter-Based HVDC Link for Offshore Wind Farms," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, Issue 6, pp. 2401-2409, 2013.

[37] R. Blasco-Gimenez, S. Ano-Villalba, J. Rodriguez-D'Derlee, S. Bernal-Perez,and F. Morant, "Diode-based HVdc link for the connection of large offshorewind farms," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 26, pp. 615- 626, June 2011.

[38] R. Blasco-Gimenez, S. Añó-Villalba, J. Rodríguez-D"Derlée, S. Bernal-"Diode Based HVDC Link for the Connection of Large Off-shore Wind Farms with Self Start Capability" Proceedings of 14th European Conference on Power Electronics and Applications pp. 1 – 9, 2011.

[39] S. Bernal-Perez; S. Añó-Villalba; R. Blasco-Gimenez; J. Rodríguez-D'Derlée"Offshore Wind Farm Grid Connection using a Novel Diode-Rectifier and VSC-Inverter based HVDC Transmission Link" IECON 2011 , 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 3186 – 3191, 2011

[40] I. Andrade; R. Blasco-Gimenez; G. Ruben Pena "Distributed control strategy for a wind generation systems based on PMSG with uncontrolled rectifier HVDC connection" 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT) pp. 982 - 986, 2015.