

Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 14 décembre 2004

pour obtenir le titre de

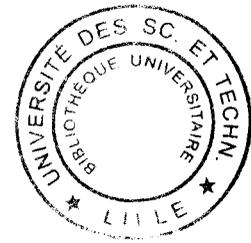
Docteur de l'université
(spécialité Génie électrique)

par

Ludovic LECLERCQ

Composition du jury

<i>Président :</i>	Damien Grenier	Univ. Cath. de Louvain
<i>Rapporteurs :</i>	Brayima Dakyo Patrick Bastard	GREAH-Univ. du Havre SÜPELEC
<i>Examineurs :</i>	Alain Bouscayrol Christophe Saudemont Benoit Robyns	L2EP-USTL L2EP-HEI L2EP-HEI



Remerciements

Ce travail de recherche, d'une durée de trois ans, s'est achevé avec un statut de maître auxiliaire. Trois années dans un bureau à l'école des Hautes Etudes d'Ingénieur (HEI) durant lesquelles j'ai pu intégrer une équipe de recherche et ainsi faire la connaissance de personnes qui ont contribué directement ou indirectement à l'avancement de mes recherches.

Tout d'abord, je tiens à remercier Benoit Robyns, responsable du département génie électrique de l'école des Hautes Etudes d'Ingénieur pour m'avoir fait découvrir le monde de la recherche par cette thèse en proposant un sujet aussi intéressant que celui-ci. Je le remercie également pour tout ce qu'il a mis en oeuvre afin que ce travail se déroule dans de bonnes conditions.

Je remercie Michel Vittu, Directeur de l'école des Hautes Etudes d'Ingénieur, pour m'avoir accepté dans son établissement et ainsi avoir pu disposer d'un environnement matériel de qualité.

Je remercie Jean-Paul Hautier, Directeur du Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique de Puissance de Lille (L2EP), pour sa considération, son écoute.

Pour leur participation à l'évaluation scientifique de ces travaux, je tiens également à remercier :

- Damien Grenier, professeur à l'université Catholique de Louvain, qui m'a fait l'honneur de présider mon jury de thèse,
- Patrick Bastard, professeur à Supélec de Gif-sur-Yvette qui a accepté d'être rapporteur dans des délais très contraignants et dont les nombreuses remarques ont fortement influencé le jugement scientifique que je porte aujourd'hui sur ce travail,
- Brayima Dakyo, professeur à l'université du Havre, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail en acceptant de le juger dans des délais très contraignants,
- Christophe Saudemont, enseignant chercheur à l'École des Hautes Etudes d'Ingénieur, pour avoir participé aux travaux depuis le début et pour sa participation au jury,
- Alain Bouscayrol, Maître de Conférences à l'USTL, pour l'intérêt qu'il a porté à mes travaux en participant au jury.

Je remercie également messieurs Mehdi Nasser, Aymeric Ansel et Arnaud Davigny, enseignants chercheurs à l'École des Hautes Etudes d'Ingénieur, pour leur rigueur, leur soutien moral ainsi que leur disponibilité.

Je n'oublie pas aussi Gabriel Cimuca, doctorant roumain en cotutelle avec qui j'ai beaucoup échangé sur le plan scientifique comme expérimental.

Je remercie François Gionco, technicien de laboratoire à l'École des Hautes Etudes d'Ingénieur mais également ami, pour m'avoir parfois sorti du contexte de la thèse de part ses qualités humaines.

Je remercie également toutes les personnes que j'ai côtoyé durant ces trois années et avec qui j'ai eu plaisir à échanger sur différents thèmes. Ces personnes se reconnaîtront.

S'il y a une personne à ne pas oublier, c'est bien Yann Pankow, avec qui j'ai partagé le même bureau durant trois années. Je le remercie de son investissement dans mon travail que ce soit par ses vérifications, son aide ou son soutien à quelques unes de mes idées. Je le remercie également de la patience qu'il a eu envers moi, d'avoir su travailler en ma compagnie.

Enfin, je remercie Line, pour la patience, le soutien et la compréhension qu'elle a témoignée tout au long de ce travail. Je la remercie également de m'avoir offert le plus beau cadeau inimaginable : notre fils Corentin, à qui je dédie ce mémoire.

Rien ne vaut la recherche lorsqu'on veut trouver quelque chose.
Extrait de Bilbo le Hobbit
J. R. R. Tolkien

Table des matières

Avant propos	1
Introduction générale	3
<hr/> <hr/>	
Partie I Trois systèmes à l'étude pour répondre aux objectifs	7
<hr/> <hr/>	
Introduction de la première partie	9
Chapitre 1 Le générateur éolien	11
1.1 Introduction	11
1.2 Rappels et état de l'art	11
1.2.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique	11
1.2.2 Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique	17
1.2.3 Les différentes chaînes de conversion d'énergie	17
1.3 Simulations	18
1.3.1 Modélisation de la turbine	18
1.3.2 Application à une éolienne à vitesse fixe	19
1.3.3 Éolienne à vitesse variable avec machine synchrone à aimants permanents	28
1.4 Conclusion	38
Chapitre 2 Le Système de stockage inertiel	39
2.1 Introduction	39
2.2 Généralités	40
2.2.1 Les machines électriques	40
2.2.2 Les paliers	40
2.2.3 Énergie stockée	40
2.2.4 Les matériaux et la forme du volant	40

2.3	Principe du stockage inertiel avec machine asynchrone	41
2.3.1	Zone de fonctionnement utile	41
2.3.2	Cahier des charges : calcul de l'inertie du volant	42
2.3.3	Commande : contrôle de la puissance	42
2.4	Stockage inertiel avec turbine éolienne et volant d'inertie	43
2.4.1	Principe	43
2.4.2	Simulation	43
2.5	Stockage inertiel avec volant d'inertie uniquement	46
2.5.1	Principe	46
2.5.2	Simulation	46
2.6	Systèmes de stockage en parallèle	48
2.6.1	Simulation	49
2.7	Conclusion	50
Chapitre 3 Onduleur de tension sur un réseau		51
3.1	Introduction	51
3.2	Structure de raccordement	51
3.2.1	Modélisation du filtre LC	52
3.2.2	Stratégies de commande	52
3.3	Fonctionnement en source de tension sur réseaux passif et actif	54
3.3.1	Structure de la commande	54
3.3.2	Fonctionnement sur réseau passif	56
3.3.3	Fonctionnement sur réseau actif	59
3.3.4	Connexion en parallèle	63
3.4	Fonctionnement en source de courant sur réseau actif	69
3.4.1	Structure de la commande	69
3.4.2	Contrôle des puissances active et réactive	70
3.4.3	Simulation avec référence puissance réactive nulle	70
3.4.4	Simulation avec référence puissance réactive déterminée	72
3.5	Conclusion	74
Conclusion de la première partie		75

Introduction de la deuxième partie	79
Chapitre 4 Couplages	81
4.1 Introduction	81
4.2 Les systèmes étudiés dans la première partie	81
4.3 Niveau hiérarchique supérieur du formalisme REM	83
4.4 Création d'une source de tension continue	85
4.5 Récapitulatif	86
4.6 Réalisation d'une chaîne de conversion d'énergie	87
4.7 Améliorer l'intégration d'éoliennes dans un réseau actif	90
4.8 Source de génération autonome susceptible d'assurer les services systèmes . .	91
4.9 Conclusion	92
Chapitre 5 Lissage de puissance variable	93
5.1 Introduction	93
5.2 Principe	93
5.3 Gestion de la variable de flux	95
5.4 Filtrage actif et Lissage de puissance variable	96
5.4.1 Principe	96
5.4.2 Simulation	97
5.5 Application à une éolienne à vitesse fixe	99
5.5.1 Schéma de raccordement	99
5.5.2 Simulation	99
5.6 Conclusion	104
Chapitre 6 Système de génération autonome	105
6.1 Introduction	105
6.2 Composition d'une source	105
6.2.1 Commande maximale	105
6.2.2 Détermination des puissances de référence	107
6.3 Interconnexion	109
6.3.1 La structure d'interconnexion	109
6.3.2 Simulation	109
6.4 Conclusion	113
Conclusion de la deuxième partie	115

Partie III Expérimentation	117
Introduction de la troisième partie	119
Chapitre 7 Présentation du banc d'essai	121
7.1 L'Emulateur de Turbine Eolienne : ETE	121
7.2 La Machine Synchrone à Aimants Permanents : MSAP	122
7.3 Le Système Inertiel de Stockage d'Energie : SISE	122
7.4 La connexion au réseau : CAR	122
Chapitre 8 L'émulateur éolien	123
8.1 Implantation	123
8.1.1 Commande en couple de la machine à courant continu	123
8.1.2 Commande en couple de la machine synchrone à aimants permanents	124
8.2 Résultats	124
Chapitre 9 Contrôle des tensions par correcteurs résonnants	127
9.1 Implantation	127
9.2 Résultats	127
Conclusion de la troisième partie	131
Conclusion générale	133
Bibliographie	137
Annexe A Modélisation des éléments communs	141
A.1 Rappel sur la transformation de Park	141
A.1.1 Passage du repère triphasé au repère de Park	141
A.1.2 Passage du repère de Park au repère triphasé	141
A.1.3 Propriétés de la transformation de Park	142
A.1.4 Interprétation de la transformation de Park	142
A.1.5 Application à une source de tension triphasée parfaite	142
A.2 La Représentation Énergétique Macroscopique (REM)	144
A.2.1 Aspects de la modélisation avec la REM	144
A.2.2 Un formalisme pour la commande	146
A.3 Modèles des machines électriques	146
A.3.1 La machine asynchrone	147

A.3.2	La machine synchrone à aimants permanents	148
A.3.3	La machine à courant continu	148
A.4	Modélisation de la transmission mécanique	149
A.5	Modèles continus équivalents des onduleurs de tension	150
A.5.1	Modèle en tension composées	152
A.5.2	Modèle dans le repère de Park	152
Annexes		141
Annexe B Contrôle commande des systèmes		155
B.1	Commande des machines électriques	155
B.1.1	Commande en couple de la machine synchrone à aimants permanents	155
B.1.2	Commande en couple de la machine asynchrone	156
B.1.3	Commande en couple de la machine à courant continu	157
B.2	Synthèse du correcteur résonnant	157
B.2.1	Principe du correcteur résonnant	157
B.2.2	Exemple de synthèse du correcteur résonnant	158

Avant propos

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique de Puissance (L2EP) de Lille dans les locaux de l'école des Hautes Études d'Ingénieur (HEI) dans le cadre d'une allocation de recherche financée par la Région Nord-Pas de Calais et la Fondation Norbert Ségard. Il conclut trois années de recherche au sein de l'équipe Réseaux Électriques et Systèmes Énergétiques (RESE) dont il convient de rappeler le contexte ;

En 1998, la société Norelec (située à Verquin, devenue Forclum Ingénierie en 2001) posait le problème de l'augmentation du taux de pénétration des éoliennes à vitesse fixe dans les sites isolés (en particulier dans les DOM TOM) où les éoliennes sont souvent associées à des générateurs diesels. Pour permettre cette augmentation, il est nécessaire de lisser la puissance générée par les éoliennes, ce qui nécessite l'ajout d'un système de stockage à court terme très dynamique et le développement d'une stratégie de commande de l'ensemble éolienne-système de stockage. Cette problématique a fait l'objet d'un projet de recherche associant Norelec au L2EP, financé par la Région Nord-Pas de Calais.

Le contexte régional a encouragé le développement des travaux visant à augmenter le taux de pénétration des éoliennes dans les réseaux électriques. D'une part parce que la Région accueille une entreprise (Jeumont Industrie) développant une éolienne à vitesse variable de grande puissance. D'autre part du fait du développement important prévisible de l'éolien dans la Région. Une étude de RTE a évalué la capacité d'accueil du réseau électrique de la Région en éoliennes classiques (ne participant pas aux services systèmes) à environ 250 MW. Actuellement, plus de 600 MW d'installation d'éoliennes sont en cours d'étude dans la région. A moyen terme, les fermes éoliennes devront donc participer pleinement aux services systèmes. Ces constats ont incités la Région à financer dans le cadre de son programme éolien une thèse de doctorat sur cette problématique (démarrage fin 2001). Trois autres thèses de doctorat ont démarré dans la continuité de ce programme en 2002, 2003, et 2004 basées sur d'autres sources de financement.

Introduction générale

Le type d'unité de production décentralisée qui fait l'objet de cette thèse concerne les sources à énergie renouvelable et plus particulièrement l'énergie éolienne. L'objectif étant d'une part de proposer une solution facilitant l'intégration des éoliennes existantes et d'autre part de proposer un système de génération d'énergie à base d'éolienne à vitesse variable pouvant participer à la gestion du réseau.

Deux types de réseaux doivent être considérés, d'une part les réseaux de transport et de répartition à haute tension, typiquement supérieure à 30 kV et d'autre part les réseaux de distribution à tension inférieure à 30 kV [15]. Les réseaux électriques de transport et de répartition sont constitués de circuits maillés alimentés par des générateurs de grande puissance commandés de manière coordonnée que l'on peut qualifier de centralisée. Les réseaux de distribution possèdent des structures radiales, alimentés par un nombre restreint de postes sources à partir du réseau de transport et de répartition. Ils ne comportent pratiquement pas d'unités de production à l'heure actuelle mais alimentent un grand nombre de consommateur.

La production décentralisée se définit par opposition à la production classique par unités de grosses puissances raccordées au réseau HT, dont la localisation et la puissance ont fait l'objet d'une planification et qui sont commandées de manière centralisée pour participer au contrôle de la fréquence et de la tension, en assurant des services systèmes pour un fonctionnement fiable et économique de l'ensemble du réseau. Par rapport à ces unités classiques, les unités décentralisées sont caractérisées par des puissances ne dépassant pas 50 à 100 MW, ne sont pas planifiées de manière centralisée, ni actuellement coordonnées, elles sont pour une grande part raccordées au réseau de distribution.

L'ouverture du marché de l'électricité a pour conséquence le développement d'une production dite décentralisée sur base de cogénérations, de productions traditionnelles installées par des producteurs indépendants ou de sources à énergies renouvelables.

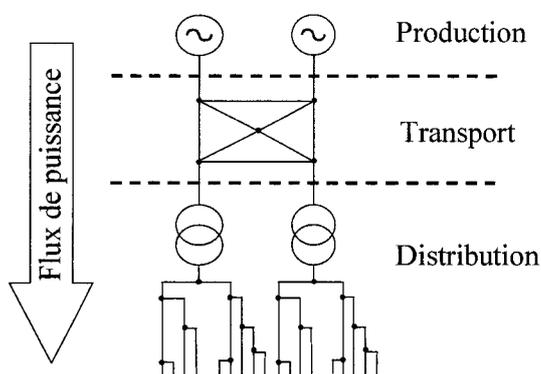


FIG. 1 – Structure des réseaux électriques [15].

La figure 1 représente la structure actuelle des réseaux électriques sur laquelle est indiqué le sens du flux de puissance naturellement imposé par la charge. Les systèmes de protection et le réglage de la tension se basent actuellement sur ce caractère unidirectionnel de l'échange d'énergie or l'intégration dans les réseaux de ce type de production implique le respect de contraintes techniques et des aménagements des réseaux existants.

La caractéristique fondamentale de la production décentralisée est d'être pilotée dans la plupart des cas par d'autres facteurs que la demande d'électricité, le besoin de chaleur dans le cas d'unité de cogénération et les conditions climatiques dans le cas des éoliennes. Il en résulte des incertitudes sur la localisation géographique, la dynamique du développement et les niveaux et moments d'activité de la production, avec des conséquences sur le développement, la gestion et l'exploitation des réseaux électriques. Ces derniers doivent, notamment, être en mesure d'une part d'accueillir la production décentralisée quand elle est active, et d'autre part d'acheminer la puissance de substitution quand la production décentralisée est inactive. La pratique actuelle, de ne pas faire participer la production décentralisée aux services systèmes, ne pourra pas perdurer longtemps avec le développement de ce type de production. Cette dernière sera dans l'avenir appelée à participer aux services systèmes. Dès lors, pour tout nouveau type de production, il faut considérer son aptitude à assurer des services systèmes : réglage de la puissance réactive, réglage de la tension, participation à la répartition de charge (réglage primaire et réglage secondaire), capacité de démarrage sans tension auxiliaire (fonctionnement autonome).

Actuellement les éoliennes ne participent pas aux réglages de la production. Cependant, cet état de chose devrait rapidement changer, compte tenu de la part plus significative que ce type de source est destiné à prendre dans les parcs de production. En raison du caractère très aléatoire du vent, une éolienne seule ne peut adapter la production à la consommation. Cette adaptation doit se faire par l'intervention de sources disposant d'une réserve de puissance permettant un réglage rapide de la production. Afin d'assurer l'équilibre production-consommation, un système de stockage de type inertiel est envisagé. Cette solution possède une bonne dynamique, un bon rendement et une durée de vie similaire à l'éolienne. L'objectif général de ce travail est donc d'évaluer les possibilités de participation aux services systèmes d'éoliennes couplées à des systèmes de stockage inertiel. Dans ce mémoire, le travail de trois ans de recherche est présenté en trois parties.

La première partie traite de la modélisation, de l'élaboration de stratégies de commande et de la simulation de trois systèmes électrotechniques faisant chacun l'objet d'un chapitre :

- le premier chapitre de ce mémoire présente la modélisation d'une turbine éolienne appliquée à une éolienne à vitesse fixe. Les résultats de simulation sont comparés avec des mesures. La turbine ainsi modélisée est utilisée pour de la vitesse variable avec une machine synchrone à aimants permanents et à attaque directe connectée à un onduleur de tension. L'objectif de ce chapitre est de tester, par simulation, une stratégie de commande en puissance de l'éolienne à vitesse variable qui sera utilisée par la suite,
- le deuxième chapitre traite du système de stockage inertiel. Premièrement en considérant le couplage mécanique d'un volant d'inertie sur l'arbre d'une turbine éolienne. Deuxièmement en adoptant une solution plus classique en utilisant uniquement un volant d'inertie. La stratégie de commande permet alors d'extraire la puissance souhaitée,
- le troisième et dernier chapitre de cette première partie présente deux types de stratégie de commande d'un onduleur de tension dans le cas d'un raccordement sur un réseau passif puis sur un réseau actif. Dans le cas du réseau passif, seul un fonctionnement en source de tension est envisagé alors que dans le cas d'un réseau actif, l'onduleur peut fonctionner soit en source de courant soit en source de tension.

C'est à partir de ces trois systèmes de base étudiés dans la première partie que seront proposés dans un premier temps une structure permettant d'améliorer l'intégration d'éoliennes dans un réseau actif et dans un deuxième temps une structure susceptible d'assurer des services systèmes. C'est donc avec la deuxième partie que l'on entre au coeur du sujet avec les trois chapitres

suivants :

- le quatrième chapitre montre les différents couplages entre les trois systèmes de base afin de déterminer les associations susceptibles d'améliorer l'intégration d'éoliennes dans un réseau actif d'une part et d'autre part de participer aux services systèmes,
- c'est dans le cinquième chapitre que sera alors abordé le lissage de la puissance fluctuante avec un système de stockage inertiel appliqué à une éolienne à vitesse fixe, source par nature fluctuante. L'intérêt est de montrer que l'on tiens compte du niveau de stockage tout en lissant la puissance fluctuante. Le travail présenté dans ce chapitre reprends la suite de mon stage de DEA [29].
- cette deuxième partie sera clôturée par un sixième chapitre présentant un système de génération d'énergie autonome composé d'une éolienne à vitesse variable associée à un système de stockage inertiel pouvant assurer des services systèmes.

Cette deuxième partie clôture pour une grande part les travaux théoriques des trois années de recherche et qui ont fait l'objets de publications nationales et internationales [32], [30] et [31]. A ces travaux théoriques vient s'ajouter des essais expérimentaux développés sur le site de l'école des Hautes Études d'Ingénieur (HEI) avec l'aide d'un banc d'essai. La troisième partie expose donc le banc d'essai développé et montre des résultats expérimentaux sur trois chapitres :

- le septième chapitre présente le banc d'essai du site de l'école des Hautes Études d'Ingénieur (HEI),
- le huitième chapitre présente le développement d'un simulateur éolien avec une machine à courant continu,
- le neuvième chapitre montre les résultats expérimentaux pour le contrôle des tensions composées aux bornes d'un filtre LC triphasé.

Première partie

Trois systèmes à l'étude pour répondre
aux objectifs

Introduction de la première partie

L'objectif de cette première partie est de présenter la modélisation et les stratégies de commande développées dans le cadre de trois systèmes électrotechniques sur base d'électronique de puissance faisant chacun l'objet d'un chapitre :

- Le premier chapitre traite du générateur éolien. Le modèle de la turbine utilisé est présenté après un bref état de l'art de l'énergie éolienne. Les résultats obtenus sont comparés avec les mesures d'une éolienne à vitesse fixe située sur le site de Dunkerque dans le nord de la France. Le modèle de la turbine est ensuite utilisé pour modéliser la chaîne de conversion d'une éolienne à vitesse variable et une stratégie de commande est présentée.
- Le deuxième chapitre traite du système de stockage inertiel avec machine asynchrone, d'abord en utilisant l'inertie de la turbine et en ajoutant un volant si besoin puis en considérant uniquement un volant pour une question de réalisation technique. Les stratégies de commande développées montrent la faisabilité d'un tel système de stockage et l'intérêt qu'il apporte pour une association avec une éolienne.
- Le troisième chapitre traite de la connexion au réseau triphasé via un élément LCL d'un onduleur de tension alimenté par une source continue. Le réseau considéré est susceptible d'être passif ou actif. On distinguera deux stratégies de commande, l'une permettant de fonctionner en source de courant et l'autre en source de tension.

La manière dont fonctionne ces trois systèmes sera utile pour déterminer un dispositif permettant de faciliter l'intégration au réseau d'éoliennes existantes ou pour l'élaboration d'un système de génération autonome d'énergie pouvant assurer des services systèmes.

Chapitre 1

Le générateur éolien

1.1 Introduction

Ce chapitre a pour premier objectif de présenter les éoliennes de manière générale, sans entrer dans les détails afin d'avoir une vue globale de ce qui existe. Le lecteur pourra se reporter aux différentes références citées pour de plus amples informations. Le deuxième objectif de ce chapitre est de présenter la modélisation de la turbine éolienne dans le cas d'une éolienne à vitesse fixe car les résultats obtenus sont comparés avec des mesures prises sur une éolienne de 300 kW afin de valider le modèle. Le troisième et dernier objectif est de présenter la stratégie de commande d'une éolienne à vitesse variable avec machine synchrone à aimants permanents à attaque directe. La stratégie de commande sans mesure de la vitesse du vent permet de fonctionner au maximum de puissance ou à puissance contrôlée.

1.2 Rappels et état de l'art

1.2.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

L'énergie cinétique dE d'une colonne d'air de longueur dl , de section S , de masse volumique ρ animée d'une vitesse v (figure 1.1) s'écrit :

$$dE = \frac{1}{2} \rho S dl v^2 \quad (1.1)$$

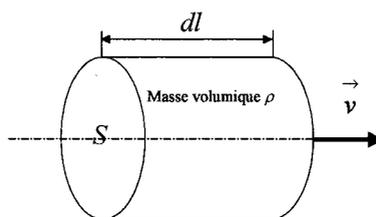


FIG. 1.1 – Colonne d'air.

En supposant $dl = v dt$, on déduit l'expression de la puissance P_0 :

$$P_0 = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (1.2)$$

L'organe capteur

Le but de l'organe capteur est de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Pour des raisons de conversion d'énergie électromécanique, on cherche à obtenir un mouvement de rotation. Les organes capteurs sont en général classés selon deux catégories [33] :

- les capteurs à axe vertical,
- les capteurs à axe horizontal.

Chaque catégorie possède ses avantages et inconvénients, cependant les éoliennes à axe horizontal sont les plus répandues. Notons que les éoliennes à axe horizontal sont obligées de s'orienter dans la direction du vent.

Coefficients de similitude

Les coefficients de similitude permettent de comparer simplement le comportement d'hélices aériennes de tailles différentes mais géométriquement semblables. Les éoliennes possèdent leur propres coefficients de similitude, voisins mais différents de ceux habituellement utilisés dans le cadre d'hélices aériennes [45], [33], [38]. On parle alors, en général, de ratio de vitesse, de coefficient de puissance et de coefficient de couple.

Le ratio de vitesse (tip-speed ratio)

On définit le ratio de vitesse λ comme étant le rapport de la vitesse tangentielle de l'aubage $\Omega_t R_t$ sur la vitesse instantanée du vent v (figure 1.2). Soit :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{v} \quad (1.3)$$

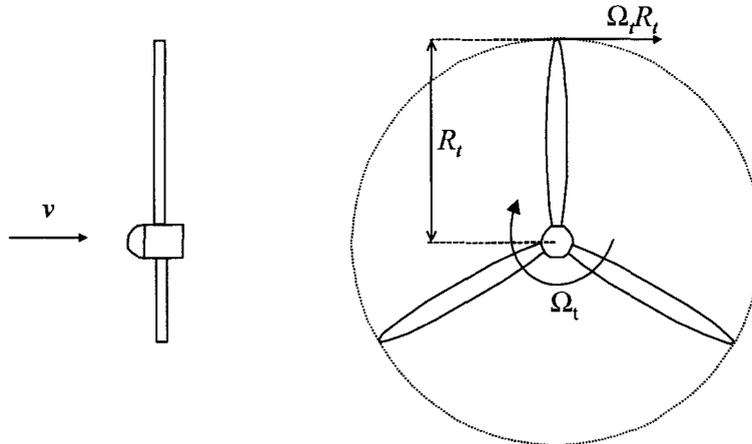


FIG. 1.2 – Vitesse du vent (v) et vitesse tangentielle de l'aubage ($\Omega_t R_t$).

Ω_t est la vitesse de rotation de la turbine en rad/s et R_t est le rayon de la surface balayée en m . La vitesse du vent v est ici exprimée en m/s .

Le coefficient de puissance (power coefficient)

On ne peut extraire en totalité la puissance fournie par le vent (P_0), cela supposerait une vitesse de vent nulle après l'organe capteur. On définit le coefficient de puissance comme suit :

$$C_p = \frac{P_t}{\frac{1}{2}\rho S_t v^3} = \frac{P_t}{P_0} \quad (1.4)$$

Avec :

- P_t , puissance de la turbine éolienne,
- $S_t = \pi R_t^2$, surface balayée par la turbine éolienne,
- ρ , masse volumique de l'air.

Le coefficient C_p est variable, il est fonction de la vitesse du vent v et de la vitesse de rotation de la turbine Ω_t . Il est souvent représenté en fonction du ratio de vitesse λ . La valeur maximale théorique possible du coefficient de puissance, appelée limite de Betz, est de $\frac{16}{27} \approx 0,5926$ [9]. En réalité, cette limite n'est pas atteinte et on définit alors le rendement aérodynamique :

$$\eta = \frac{27}{16} C_{pMAX} \quad (1.5)$$

C_{pMAX} étant la valeur maximum que peut prendre le coefficient de puissance C_p . Cette valeur est associée à un ratio de vitesse nominal λ_{OPT} pour laquelle la turbine a été dimensionnée suivant une vitesse de vent nominale v_n et une vitesse de rotation nominale Ω_{tn} . En pratique, la valeur du maximum du coefficient de puissance approche la valeur de 0,48 avec une turbine tripale. Ce qui donne un rendement aérodynamique de 81 % pour les turbines éoliennes actuelles.

Le coefficient de couple (torque coefficient)

Le coefficient de couple C_m est assez proche du coefficient de puissance C_p . Il est fort utile afin d'estimer la valeur des couples pour différents points de fonctionnement notamment à vitesse de rotation Ω_t nulle. En effet, à rotor bloqué, il y a bien un couple sur l'arbre dû à la force du vent sur les pales mais la puissance est nulle, ce qui correspond à une valeur de C_p nulle pour une valeur de C_m non nulle. L'expression du couple est la suivante :

$$T_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{R_t P_t}{\lambda v} = \frac{C_p}{\lambda} \frac{1}{2} \rho \pi R_t^3 v^2 \quad (1.6)$$

La valeur du coefficient de couple C_m est déterminée par la formule qui suit :

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{T_t}{\frac{1}{2}\rho S_t R_t v^2} \quad (1.7)$$

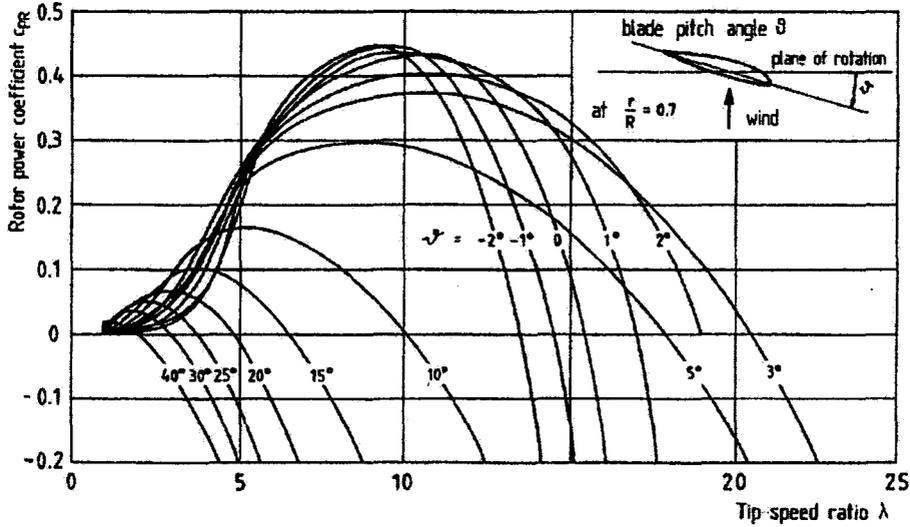
Avec :

- T_t , couple de la turbine éolienne.

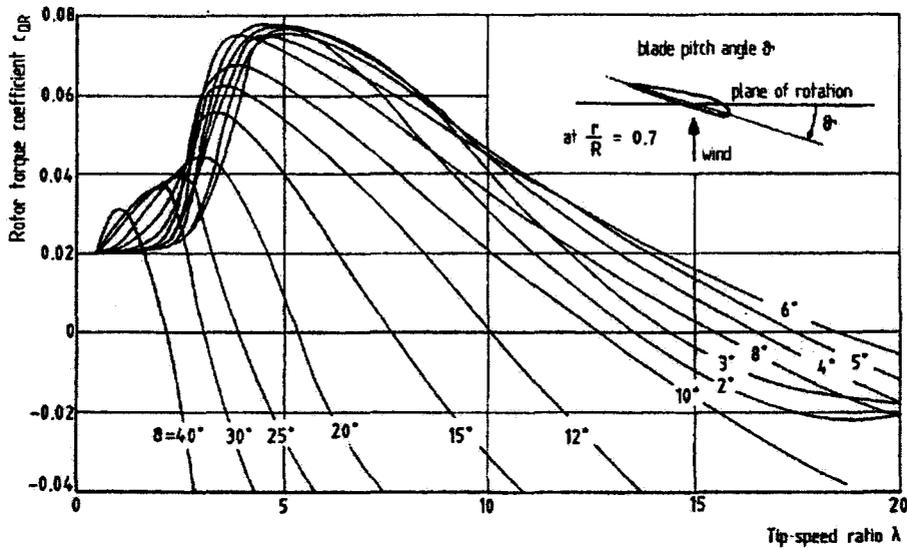
Le coefficient C_m est, comme le coefficient C_p , fonction de la vitesse du vent v et de la vitesse de rotation de la turbine Ω_t .

Courbes caractéristiques

Les turbines sont caractérisées par les courbes de C_p et C_m en fonction du ratio de vitesse λ . En général, les turbines disposent d'un système d'orientation des pales destiné à limiter la vitesse de rotation. L'allure des coefficients C_p et C_m change donc pour chaque angle de calage β comme représenté à la figure 1.3. On peut trouver dans la littérature des équations du coefficient de puissance [2], [52], [51].



(a) $C_p = f(\lambda, \beta)$



(b) $C_m = f(\lambda, \beta)$

FIG. 1.3 – Allure des coefficients C_p et C_m en fonction du ratio de vitesse λ et de l'angle de calage β [19].

Le nombre de pales

Les éoliennes utilisant des organes capteurs à axe horizontal sont les plus répandues car leur rendement est supérieur [33], [38] (figure 1.4). Ce sont les descendantes directes des moulins à vent. Dans la suite du rapport, on parlera uniquement d'éoliennes à axe horizontal.

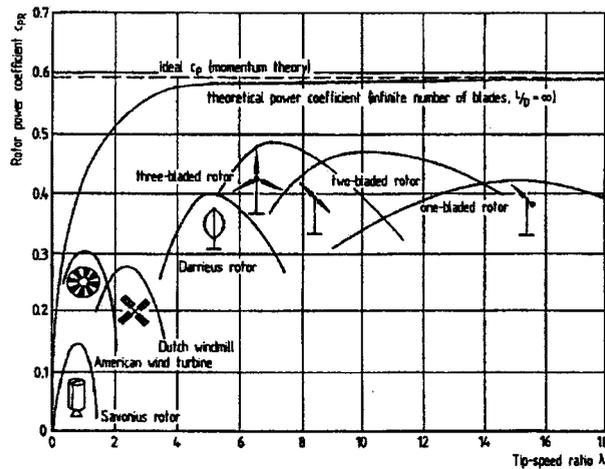


FIG. 1.4 – Coefficients de puissance de divers éoliennes [19].

La majorité de ces éoliennes possèdent 3 pales. Théoriquement, plus le nombre de pale est élevé, meilleur est le rendement aérodynamique. On augmente alors le coefficient de puissance de 10 % en passant d'une pale à deux, de 3 % en passant de deux à trois, de 1 % en passant de trois à quatre, etc... (figure 1.5(a)). Une turbine possédant 3 pales est dynamiquement plus stable et a un meilleur impact visuel. Une turbine équipée d'une seule pale nécessite un contrepoids. Pour une turbine à 2 pales, des vibrations cycliques importantes peuvent apparaître lorsque la nacelle cherche à suivre le vent et que les pales sont à l'horizontale. Aussi, le couple de torsion sur l'arbre est beaucoup plus important dans le cadre d'éoliennes possédant une seule pale (figure 1.5(b)).

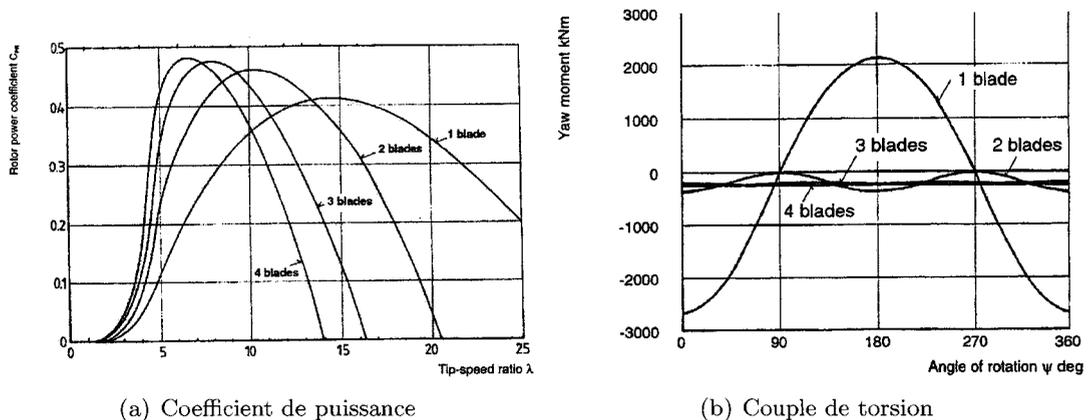


FIG. 1.5 – Influence du nombre de pales [19].

Intérêt de la vitesse variable

Au regard des courbes caractéristiques, pour une vitesse de rotation Ω_t constante, une variation de la vitesse du vent v entraîne une variation du coefficient de puissance C_p . Le rendement aérodynamique (équation 1.5) s'en trouve alors dégradé. L'intérêt de la vitesse variable est de pouvoir garder le maximum du coefficient de puissance C_p quelque soit la vitesse du vent v pour ainsi optimiser le fonctionnement de la turbine, autrement dit de garder le rapport $\frac{\Omega_t}{v}$ constant.

Similitudes

Pour effectuer une similitude entre éoliennes de différentes puissances, on utilise les équations suivantes :

$$P_{base} = \frac{1}{2} \rho_{base} \pi R_{tbase}^2 C_{pbase} v_{base}^3 \quad (1.8)$$

$$\lambda_{base} = \frac{\Omega_{tbase} R_{tbase}}{v_{base}} \quad (1.9)$$

Avec :

- $\rho_{base} \approx 1,22$: masse volumique de l'air dans des conditions normales de pression et de température,
- P_{base} : puissance nominale de la turbine de base,
- R_{tbase} : rayon de la surface balayée par la turbine de base,
- $C_{pbase} = C_{pMAX} \approx 0,48$: coefficient de puissance maximum de la turbine de base,
- $\lambda_{base} \approx 8$: ratio de vitesse pour la turbine tripale de base correspondant au coefficient de puissance maximum [19],
- v_{base} : vent nominal de la turbine de base.

On peut rechercher le lien entre la puissance d'une turbine P_{t1} et son rayon R_{t1} :

$$\left(\frac{P_{t1}}{P_{base}} \right) = \left(\frac{\rho_1}{\rho_{base}} \right) \left(\frac{R_{t1}}{R_{tbase}} \right)^2 \left(\frac{C_{p1}}{C_{pbase}} \right) \left(\frac{v_1}{v_{base}} \right)^3 \quad (1.10)$$

Ainsi, pour une turbine éolienne tripale ($C_{p1} = C_{pbase}$) dimensionnée pour fonctionner sous un même vent, dans les mêmes conditions de pression et de température, l'équation 1.10 devient alors :

$$\left(\frac{P_{t1}}{P_{base}} \right) = \left(\frac{R_{t1}}{R_{tbase}} \right)^2 \quad (1.11)$$

Soit :

$$P_{t1} = \frac{P_{base}}{\pi R_{tbase}^2} \pi R_{t1}^2 = k S_{t1} \quad (1.12)$$

La puissance nominale des éoliennes est donc proportionnelle à la surface balayée. En restant dans les mêmes conditions ($\lambda_1 = \lambda_{base}$), on peut aussi démontrer que plus la puissance nominale de l'éolienne augmente, plus la vitesse de rotation de la turbine diminue :

$$\left(\frac{R_{t1}}{R_{tbase}} \right) = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_{base}} \right) \left(\frac{\Omega_{tbase}}{\Omega_{t1}} \right) \left(\frac{v_1}{v_{base}} \right) \quad (1.13)$$

En remplaçant 1.13 dans 1.11, on obtient :

$$\left(\frac{P_{t1}}{P_{base}}\right) = \left(\frac{\Omega_{tbase}}{\Omega_{t1}}\right)^2 \quad (1.14)$$

Soit :

$$\Omega_{t1} = \Omega_{tbase} \sqrt{\frac{P_{base}}{P_{t1}}} \quad (1.15)$$

1.2.2 Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique

Le convertisseur électromécanique

Tout convertisseur électromécanique peut être utilisé pour produire de l'énergie. En règle générale pour les éoliennes de forte puissance, il s'agit d'une génératrice soit synchrone soit asynchrone. Mais, pour un aérogénérateur servant à la charge de batteries par exemple, on peut utiliser une génératrice à courant continu.

Le multiplicateur de vitesse

Suivant la nature du convertisseur électromécanique et la taille de la turbine éolienne, la transmission mécanique se fait par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse dont le rôle principal est d'adapter la vitesse de rotation de la turbine à celle du convertisseur électromécanique. Des problèmes de vibrations, de bruit et de coûts de maintenance sont liés à la présence de ces multiplicateurs.

L'électronique de puissance

L'électronique de puissance était déjà bien présente dès le début de l'éolien, que se soit par des ponts de diodes et hacheurs avec génératrices synchrones à aimants permanents ou pour démarrer progressivement les éoliennes à vitesse fixe [53]. Elle a par la suite contribué à l'extraction du maximum de puissance permettant aux génératrices de fonctionner à vitesse variable. On retrouve un état de l'art assez complet dans [4].

1.2.3 Les différentes chaînes de conversion d'énergie

On peut regrouper les générateurs éoliens selon différentes catégories. Ils peuvent être classés selon [17], [4] :

- la nature du convertisseur électromécanique (machine synchrone, asynchrone, à courant continu, etc...),
- la nature de l'accouplement mécanique (présence de multiplicateur de vitesse ou attaque directe),
- le type de fonctionnement (vitesse fixe ou variable),
- le type de capteur (à axe horizontal ou vertical).

Ces différentes catégories peuvent se croiser, par exemple, une éolienne peut être à vitesse variable, posséder un multiplicateur de vitesse et une génératrice asynchrone.

1.3 Simulations

1.3.1 Modélisation de la turbine

Le modèle de la turbine doit, lorsqu'elle est soumise à un vent v , créer un couple T_t qui aura pour conséquence de faire tourner l'arbre mécanique sur lequel elle est fixée. Ceci est illustré par la figure 1.6 qui met en évidence le principe d'action-réaction par une Représentation Énergétique Macroscopique (voir Annexe A.2). Ω_t est la vitesse de rotation de l'arbre et F_v la force en retour.

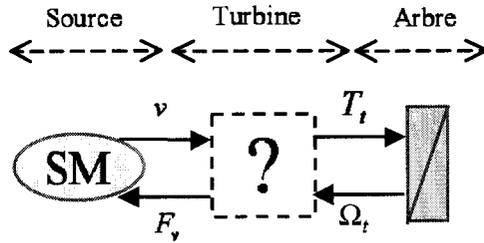


FIG. 1.6 – REM de la turbine éolienne.

La turbine

Il existe des modèles de turbine relativement complexes, prenant en compte l'effet de mât, de la pesanteur sur la rotation des pales, de leur élasticité ou encore de la variation de la vitesse du vent selon l'altitude [18], [44]. Les modèles les plus fréquemment rencontrés dans le cadre d'études électromécaniques sont relativement simplifiés. Cependant, ils permettent des temps de simulation relativement courts et le comportement dynamique global qui en résulte reste fidèle aux modèles réels.

Pour obtenir un modèle reflétant le comportement dynamique global de la turbine, on peut utiliser une courbe du coefficient de puissance en fonction du ratio de vitesse ($C_p(\lambda, \beta)$) du même type que celle représentée à la figure 1.3(a) [11].

Pour simuler un démarrage de turbine, il est cependant plus intéressant d'utiliser la formule du couple 1.16 associée à la caractéristique $C_m(\lambda, \beta)$ comme représenté à la figure 1.3(b) [24] sous forme de tableau à deux entrées et une sortie. Le couple de la turbine est alors déterminé par la relation suivante :

$$T_t = \frac{1}{2} C_m(\lambda, \beta) \rho \pi R_t^3 v^2 \quad (1.16)$$

Ce modèle n'est uniquement valable que pour des valeurs de λ comprises entre 0 et λ_{MAX} . La valeur de λ_{MAX} correspondant à une valeur de C_m nulle.

Le système d'orientation des pales

On retrouve peu d'informations dans la littérature concernant le système d'orientation des pales qui peut être un système hydraulique ou électrique avec machines à courant continu. Le

but de ce système est d'asservir la position des pales suivant une référence. Dans [49] et [12], ce système asservi est représenté par une fonction de transfert du premier ordre du type :

$$H(s) = \frac{\beta}{\beta_{ref}} = \frac{1}{1 + \tau_{\beta}s} \quad (1.17)$$

La constante de temps τ_{β} est respectivement fixée à 1,2 s. pour une éolienne de 660 kVA [49] et 0,2 s. pour une éolienne de 387,5 kVA [12].

La figure 1.7 représente le schéma bloc de la turbine tel qu'il est implanté dans le logiciel de simulation Matlab Simulink. La courbe non linéaire $C_m(\lambda, \beta)$ est entrée dans un tableau à deux entrées une sortie sous forme de point que Matlab interpole. Le vent peut être élaboré soit à partir d'un fichier de mesure ou soit à partir de données statistiques [43].

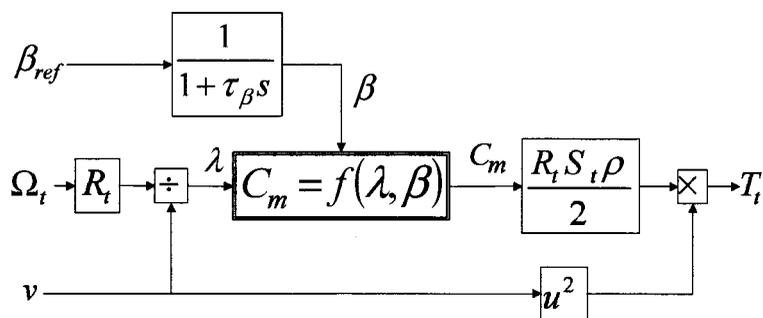


FIG. 1.7 – Schéma bloc de la turbine éolienne avec son système d'orientation des pales.

La REM de la turbine est représentée à la figure 1.8 qui montre par le principe d'action-réaction que sous l'effet d'un vent la turbine va créer un couple qui sera aussi fonction de la vitesse en retour.

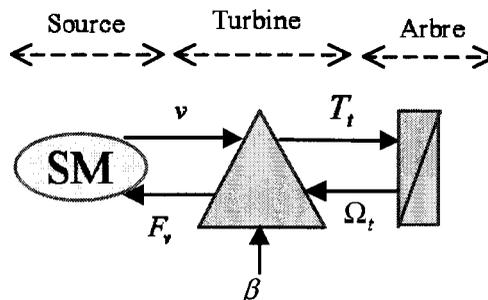


FIG. 1.8 – REM de la turbine éolienne.

1.3.2 Application à une éolienne à vitesse fixe

On s'intéresse à la production d'énergie éolienne avec machine asynchrone directement reliée au réseau électrique. La turbine, sous l'action du vent, entraîne la machine asynchrone au delà de sa vitesse de synchronisme pour la faire fonctionner en génératrice. Pour une machine à deux paires de poles reliée à un réseau électrique de fréquence 50 Hz ($N_s = 1500 \text{ tr/min}$), un multiplicateur de vitesse est alors nécessaire pour adapter la vitesse de la turbine à celle de la génératrice dont la vitesse de rotation avoisine les 40 tr/min. L'éolienne à vitesse fixe à modéliser est représentée à la figure 1.9. La figure 1.10 montre la REM de l'éolienne à vitesse fixe à modéliser.

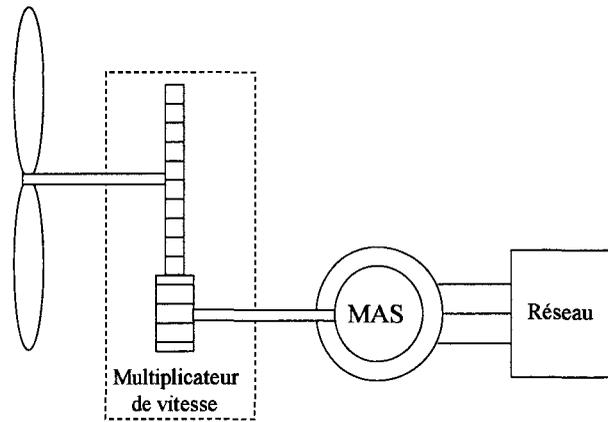


FIG. 1.9 – Éolienne à vitesse fixe à modéliser.

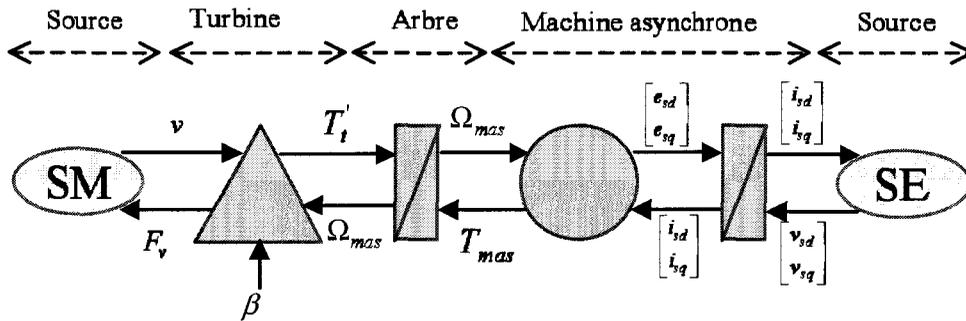


FIG. 1.10 – REM de l'éolienne à vitesse fixe.

L'arbre de transmission

La modélisation de la transmission mécanique se résume à l'équation fondamentale de la dynamique pour un arbre rigide ramené sur l'arbre de la machine asynchrone :

$$\frac{d\Omega_{mas}}{dt} = \frac{1}{J_t} (T_{mas} + T_t' + T_p(\Omega_{mas})) \quad (1.18)$$

Avec :

- J_t : inertie totale ramenée sur l'arbre de transmission comprenant l'inertie de la génératrice, de la turbine, des deux arbres et du multiplicateur,
- T_{mas} : couple électromagnétique développé par la machine asynchrone,
- T_t' : couple développé par la turbine éolienne sous l'action du vent ramené sur l'arbre de la machine asynchrone,
- $T_p(\Omega_{mas})$: couple de pertes lié aux frottements secs et visqueux.

Le multiplicateur est représenté par un simple gain Gm , ses pertes sont comprises dans les frottements de l'arbre $T_p(\Omega_{mas})$ et son inertie comprise dans l'inertie totale J_t . Il suffit alors de diviser le couple de la turbine T_t' et la vitesse d'arbre de la machine asynchrone Ω_{mas} par le gain Gm pour retrouver les valeurs du couple développé par la turbine éolienne ramené sur l'arbre de la machine asynchrone T_t' et la vitesse de rotation de la turbine Ω_t :

$$\begin{bmatrix} T'_t \\ \Omega_t \end{bmatrix} = \frac{1}{Gm} \begin{bmatrix} T_t \\ \Omega_{mas} \end{bmatrix} \quad (1.19)$$

Le modèle du réseau électrique est développé en annexe A.1 et le modèle de la machine asynchrone est développé en annexe A.3.

Limitation de la vitesse mécanique par orientation des pales

La figure 1.11 montre la structure de la commande maximale pour contrôler la vitesse de rotation par variation de l'angle de calage des pales β . On retrouve une commande similaire dans [51].

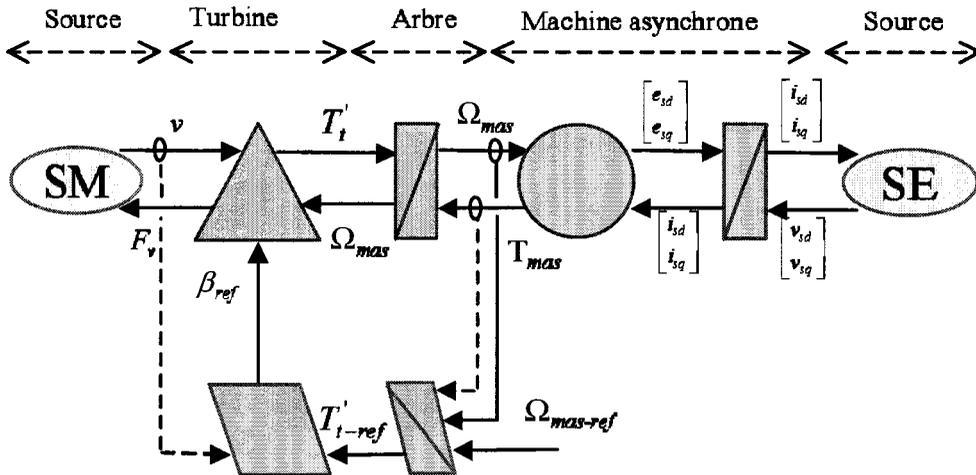


FIG. 1.11 – Commande maximale pour la limitation de la vitesse.

Le correcteur de vitesse est un correcteur de type proportionnel présentant une non linéarité. Le couple T'_t a été supposé proportionnel à la vitesse de rotation de la turbine Ω_t par linéarisation du modèle à l'ordre 1. La stratégie de commande implantée est donc la suivante :

$$\begin{aligned} \beta_{REF} &= \beta_0 = -2^\circ & \text{pour } 0 < \Omega_t \leq \Omega_{tN} \\ \beta_{REF} &= \frac{\Delta\beta}{\Delta\Omega}(\Omega_t - \Omega_{tN}) + \beta_0 & \text{pour } \Omega_t > \Omega_{tN} \end{aligned} \quad (1.20)$$

Avec $\frac{\Delta\beta}{\Delta\Omega} \approx 114,6 \text{ s}$ et $\Omega_{tN} \approx 2,62 \text{ rad/s}$.

Simulation

Pour valider le modèle de la turbine, on dispose de mesures effectuées sur une éolienne de 300 kW située à Dunkerque dans le nord de la France. Ces mesures comprennent la vitesse du vent et la puissance active renvoyée au réseau en fonction du temps. Trois types de vents sont considérés dans ces mesures : un vent considéré comme "faible" avec une vitesse moyenne de 6 m/s, un vent considéré comme "moyen" avec une vitesse moyenne de 10 m/s et un vent considéré comme fort avec une vitesse moyenne de 12 m/s. La figure 1.12 montre les trois vents considérés dans toutes les simulations de turbine éolienne.

La figure 1.13 représente sous forme de nuage de points, la puissance mesurée sur l'éolienne à vitesse fixe de 300 kW en fonction de la vitesse du vent mesurée.

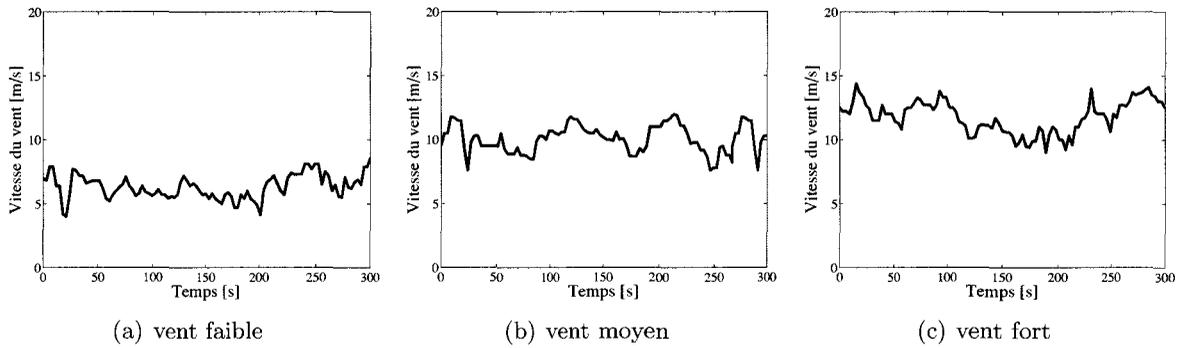


FIG. 1.12 – Allure des trois vents considérés dans les simulations.

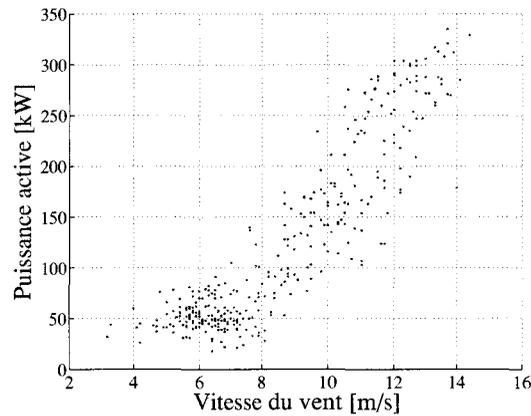


FIG. 1.13 – Puissance mesurée en fonction du vent mesuré de l'éolienne de 300 kW.

Pour valider dans un premier temps l'ensemble électromécanique modélisé composé de la machine asynchrone, du réseau et de l'arbre, on considère la turbine éolienne comme étant une source de couple indépendamment de la vitesse comme représenté à la figure 1.14. Le couple délivré par cette source a été déterminé avec la puissance mesurée en considérant une vitesse constante de 1515 tr/min correspondant à la vitesse nominale de la machine asynchrone.

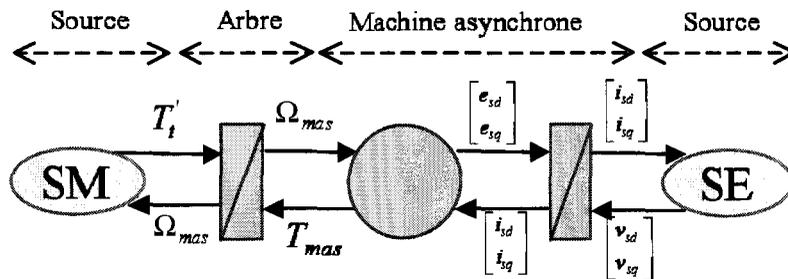


FIG. 1.14 – REM de l'éolienne à vitesse fixe avec turbine considérée comme source de couple.

Paramètres utilisés dans la simulation

Paramètres de la machine asynchrone :

- Puissance nominale : 315 kW,

- Inductance cyclique statorique : 12,8 mH,
- Inductance cyclique rotorique : 11,6 mH,
- Résistance statorique : 6,3 m Ω ,
- Résistance rotorique : 11,4 m Ω ,
- Mutuelle inductance : 11,6 mH,
- Nombre de paire de pôles : 2.

Le réseau électrique :

- Tension réseau directe v_d : 0 V,
- Tension réseau en quadrature v_q : $-400\sqrt{3}$ V.

Conditions initiales de la simulation

Initialement, la machine asynchrone tourne à 1500 tr/min, la machine est fluxée ($\psi_{rd} = 0$ et $\psi_{rq} = 1,2$ Wb). Les courants statoriques de la machine asynchrone i_{sd} et i_{sq} sont nuls.

Résultats

Les figures 1.15(a), 1.16(a) et 1.17(a) représentent la puissance active simulée en trait continu et mesurée en tirets, les figures 1.15(b), 1.16(b) et 1.17(b) représentent la puissance réactive et les figures 1.15(c), 1.16(c) et 1.17(c) représentent la vitesse de rotation de la machine asynchrone. Respectivement par vent faible (figure 1.15), vent moyen (figure 1.16) et vent fort (figure 1.17).

Interprétation

Les puissances actives issues de la simulation collent de très près les puissances mesurées sur le site de Dunkerque et permettent de valider le modèle électromécanique sans la turbine dans un premier temps.

La vitesse de rotation reste toujours supérieure à 1500 tr/min (vitesse correspondant à la vitesse de synchronisme imposée par le réseau et le nombre de paires de poles de la machine asynchrone).

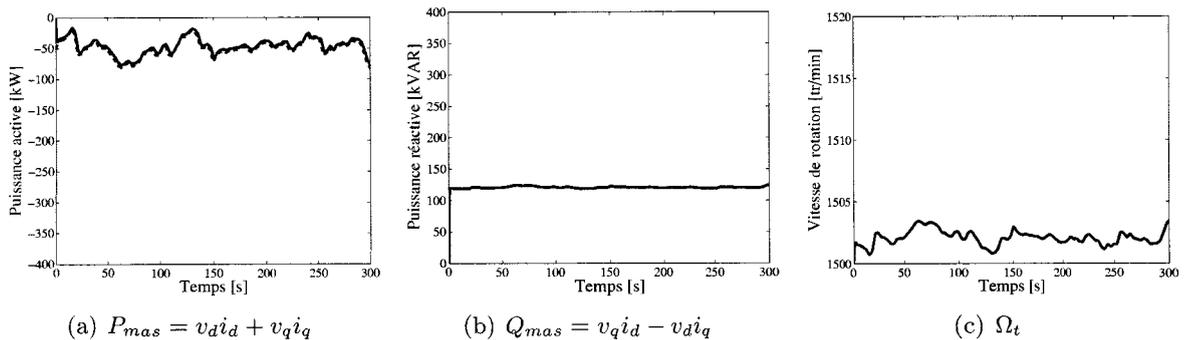


FIG. 1.15 – Simulation d'une éolienne à vitesse fixe basée sur une génératrice asynchrone : puissance active générée, puissance réactive consommée, vitesse de rotation de la génératrice avec la source de couple par vent faible.

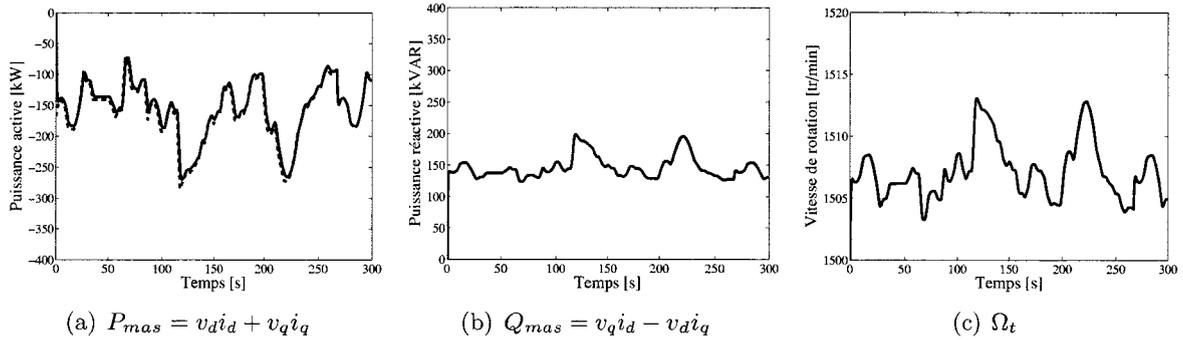


FIG. 1.16 – Simulation d’une éolienne à vitesse fixe basée sur une génératrice asynchrone : puissance active générée, puissance réactive consommée, vitesse de rotation de la génératrice avec la source de couple par vent moyen.

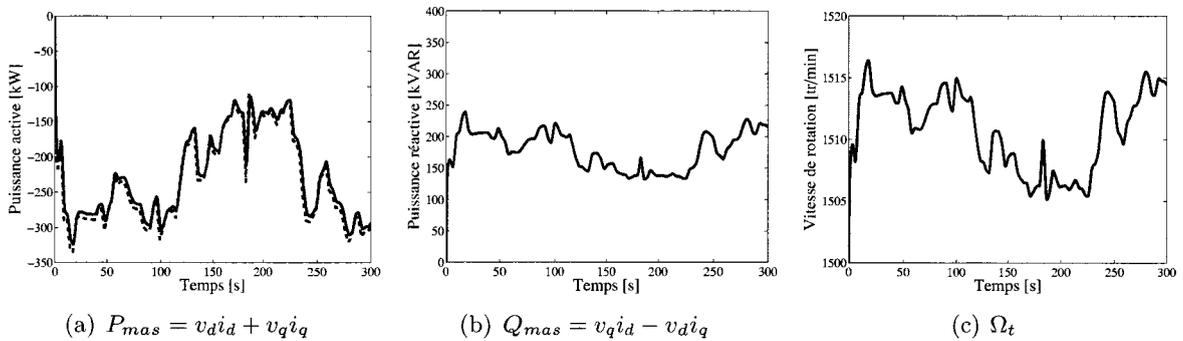


FIG. 1.17 – Simulation d’une éolienne à vitesse fixe basée sur une génératrice asynchrone : puissance active générée, puissance réactive consommée, vitesse de rotation de la génératrice avec la source de couple par vent fort.

Simulation du modèle de la turbine

Il s'agit maintenant de valider le modèle de la turbine en remplaçant la source de couple simulée précédemment. La figure 1.18 illustre le principe.

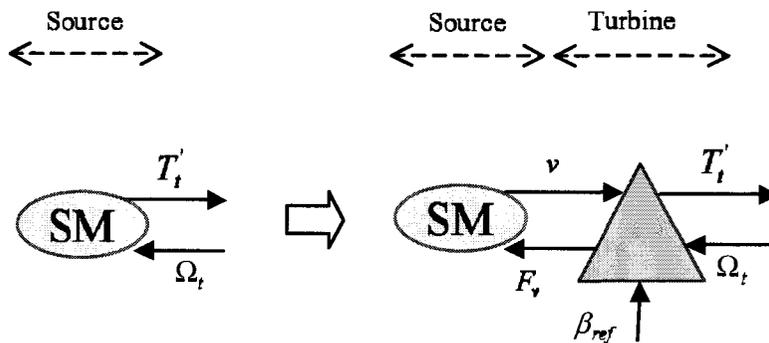


FIG. 1.18 – Remplacement de la source de couple par le modèle de turbine.

Paramètres utilisés dans la simulation

- rayon de la turbine $R_t = 14$ m
- gain du multiplicateur $Gm = 35$

Les paramètres de la machine asynchrone et du réseau électrique sont les mêmes que dans la précédente simulation.

Conditions initiales de la simulation

Initialement, la machine asynchrone tourne à 1500 tr/min, la machine est fluxée ($\psi_{rd} = 0$ et $\psi_{rq} = 1,2$ Wb). Les courants statoriques de la machine asynchrone i_{sd} et i_{sq} sont nuls.

Résultats

Les figures 1.19(a), 1.20(a) et 1.21(a) représentent la vitesse de rotation, les figures 1.19(b), 1.20(b) et 1.21(b), le coefficient de puissance, les figures 1.19(c), 1.20(c) et 1.21(c), l'angle de calage et sa référence en pointillés, les figures 1.19(d), 1.20(d) et 1.21(d), la puissance active de la machine asynchrone et la mesure en pointillés, les figures 1.19(e), 1.20(e) et 1.21(e), la puissance réactive de la machine asynchrone, respectivement pour des vents faible (figure 1.19), moyen (figure 1.20) et fort (figure 1.21).

Interprétation

On retrouve une puissance active différente mais voisine de la mesure pour des vents moyen et fort. Pour un vent faible, le couple développé par la turbine n'est pas suffisant pour entraîner la machine asynchrone au delà de sa vitesse de synchronisme ce qui peut s'expliquer par :

- le fait que la turbine sur laquelle les mesures ont été effectuées possède un ratio de vitesse nominal (λ_{OPT}) de 4,5. Or la courbe de $C_m(\lambda, \beta)$ introduite dans la simulation dispose d'un λ_{OPT} de 5. Le couple développé est donc plus faible pour un même vent,

- la vitesse du vent mesurée qui est celle en haut du mât et qui n'est pas parfaitement représentative de celle que subit réellement la turbine,
- l'allure de la courbe introduite dans le programme de simulation qui ne peut représenter fidèlement et avec exactitude la réalité,
- la simplicité du modèle en lui-même.

En comparaison avec la simulation où la turbine est représentée par une source de couple, les vitesses de rotation sont similaires sauf évidemment dans le cas du vent faible.

Le coefficient C_p est fortement dégradé. On montrera par la suite l'intérêt de la vitesse variable.

Le système d'orientation des pales est très peu sollicité excepté dans le cas d'un vent fort où la vitesse tend à dépasser la vitesse nominale (1515 tr/min).

Pour un vent faible, on passe en fonctionnement moteur alors que d'après les mesures, l'éolienne à vitesse fixe fournit une faible puissance (voir figure 1.19(d)). Cette différence s'explique par le fait que la courbe $C_m(\lambda, \beta)$ ne reflète pas exactement celle de la turbine de l'éolienne de Dunkerque dans la mesure la valeur nominale du λ implantée dans la simulation vaut 6 alors que pour l'éolienne de Dunkerque $\lambda_N = 5$. Ceci implique une limite dans l'utilisation du modèle lorsque les valeurs de C_m deviennent négatives et on verra qu'il est tout à fait possible de produire de l'énergie avec une éolienne fonctionnant à vitesse variable pour de telles valeurs de vitesse du vent.

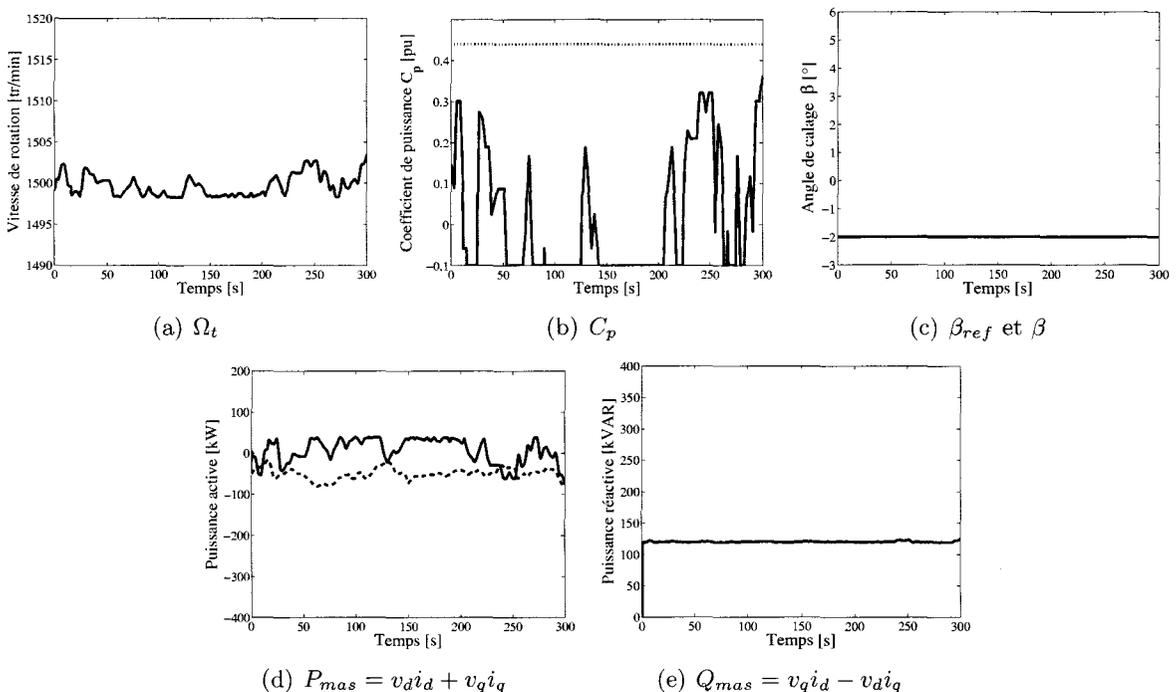


FIG. 1.19 – Simulation d'une éolienne à vitesse fixe basée sur une génératrice asynchrone : vitesse de rotation de la génératrice, coefficient de puissance, angle de calage, puissance active générée et puissance réactive consommée avec la turbine par vent faible.

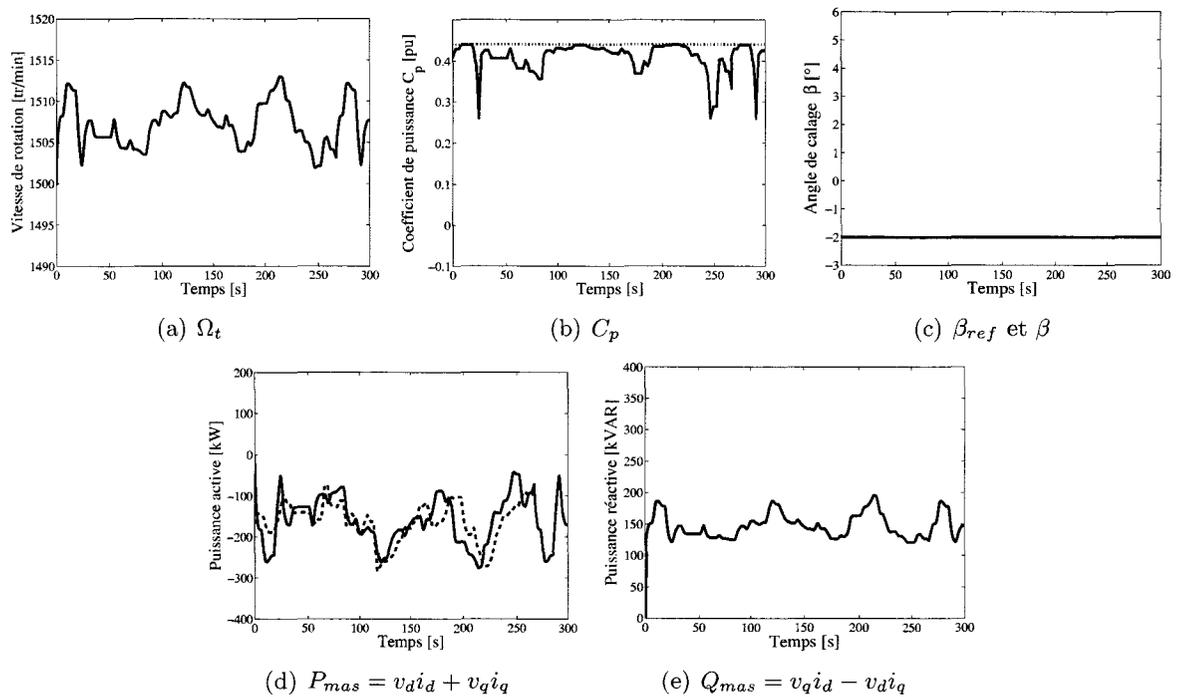


FIG. 1.20 – Simulation d’une éolienne à vitesse fixe basée sur une génératrice asynchrone : vitesse de rotation de la génératrice, coefficient de puissance, angle de calage, puissance active générée et puissance réactive consommée avec la turbine par vent moyen.

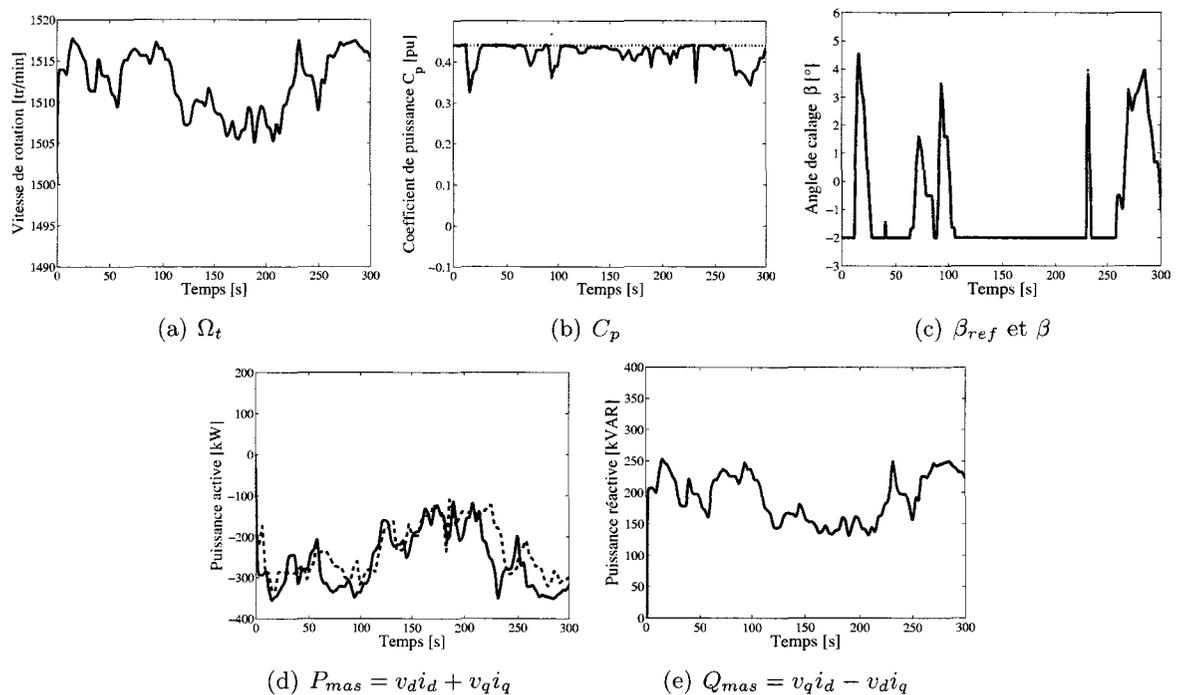


FIG. 1.21 – Simulation d’une éolienne à vitesse fixe basée sur une génératrice asynchrone : vitesse de rotation de la génératrice, coefficient de puissance, angle de calage, puissance active générée et puissance réactive consommée avec la turbine par vent fort.

1.3.3 Éolienne à vitesse variable avec machine synchrone à aimants permanents

On s'intéresse à un fonctionnement de la turbine à vitesse variable permettant d'optimiser la capture de puissance extraite du vent avec machine à attaque directe comme représenté à la figure 1.22. Le convertisseur électromécanique est une machine synchrone à aimants permanents dont le modèle est développé en annexe. On fera l'hypothèse d'être en présence d'une machine à aimantation de type radiale (aimants montés en surface) et par conséquent le modèle de la machine sera équivalent à celui d'une machine à pôles lisses ($L_d = L_q$). Cette machine possède 42 paires de poles et peut être directement couplée à la turbine éolienne.

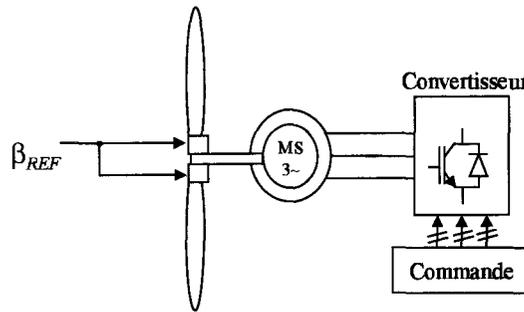


FIG. 1.22 – Éolienne à vitesse variable avec machine synchrone à aimants permanents.

La figure 1.23 montre la REM de l'éolienne à vitesse variable qui possède une entrée de réglage supplémentaire par rapport à la REM de l'éolienne à vitesse fixe représentée à la figure 1.10.

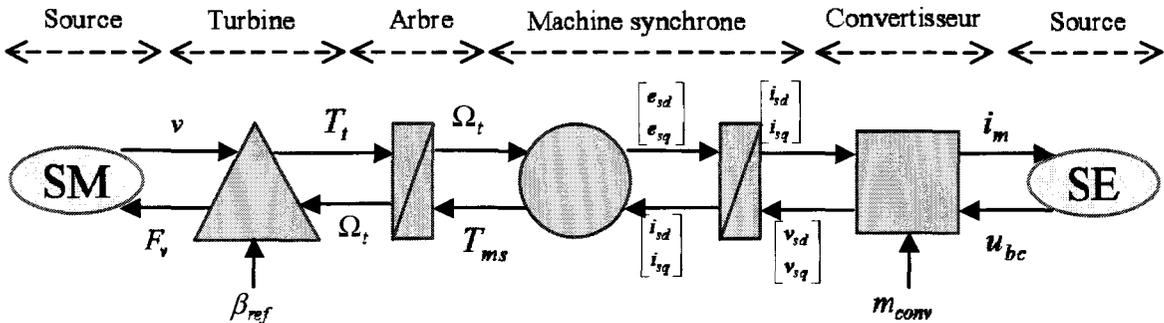


FIG. 1.23 – REM de l'éolienne à vitesse variable.

L'arbre mécanique

En l'absence d'un multiplicateur de vitesse, la turbine est directement reliée à la génératrice. On parle alors de génératrice à attaque directe. La modélisation de la transmission mécanique se résume donc à l'équation fondamentale de la dynamique pour un arbre rigide :

$$\frac{d\Omega_t}{dt} = \frac{1}{J_t} (T_{ms} + T_t + T_p(\Omega_t)) \quad (1.21)$$

Avec :

- J_t : inertie totale de l'arbre de transmission comprenant l'inertie de la génératrice et de la turbine,

- T_{ms} : couple électromagnétique développé par la machine synchrone à aimants permanents,
- T_t : couple développé par la turbine éolienne sous l'action du vent,
- $T_p(\Omega_t)$: couple de pertes lié aux frottements secs et visqueux.

Étant donné la faible vitesse de rotation de l'arbre, on pourra négliger le couple de frottements dynamiques. En revanche, il faudra tenir compte d'un couple de frottement sec.

Contrôle au maximum de puissance

Pour contrôler la puissance électrique de la génératrice, il suffit de contrôler le couple électromagnétique par régulation des courants statoriques et de connaître la vitesse de rotation de l'arbre. La commande en couple de la machine synchrone à aimants permanents est détaillée en annexe. Le système de limitation de vitesse par orientation des pales reste le même que pour une éolienne à vitesse fixe. Une telle commande se retrouve dans [4]. La figure 1.24 montre la structure de la commande maximale de l'éolienne à vitesse variable.

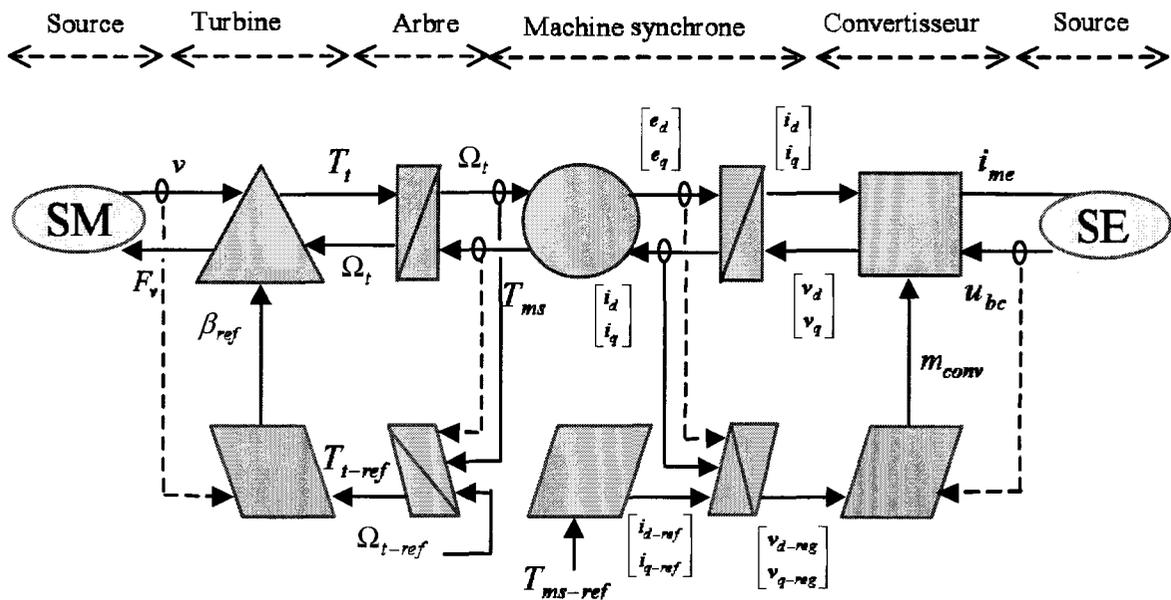


FIG. 1.24 – Structure de la commande maximale du couple de la machine synchrone.

Le couple électromagnétique de référence peut être élaboré de deux manières différentes : l'une pour un fonctionnement au maximum de puissance, visant à améliorer le rendement aérodynamique de la turbine afin d'extraire le maximum d'énergie, et l'autre pour un fonctionnement à puissance constante qui est de toutes façons utilisée pour limiter la puissance de la génératrice à sa valeur nominale. La figure 1.25 représente la stratégie de commande en puissance décrite ci-dessus. Le sous-système représenté en trait épais comprends la machine synchrone, le convertisseur et la structure de la commande en couple.

Limitation en vitesse

Le mécanisme d'orientation des pales est activé à partir de la vitesse nominale de la machine électrique. C'est en réduisant le couple de la turbine T_t par variation de l'angle de calage β que

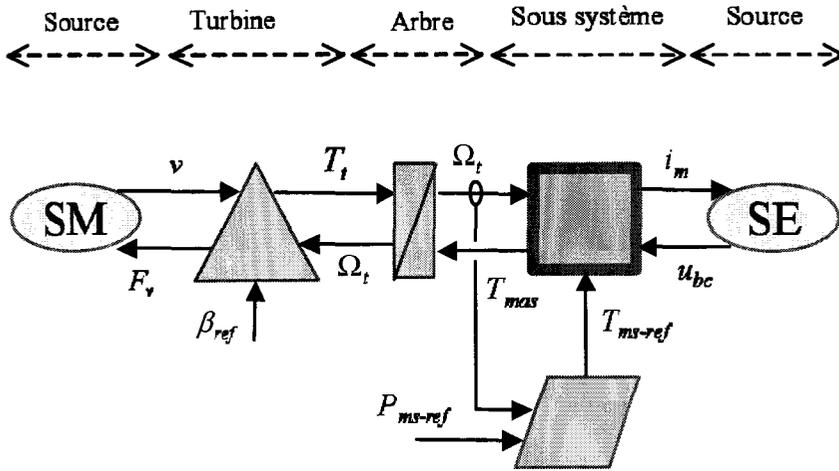


FIG. 1.25 – Principe du contrôle de la puissance.

la vitesse de l'arbre est limitée.

Limitation en puissance

La limitation en puissance se fait donc naturellement par décroissance du couple électromagnétique qui devient alors inversement proportionnel à la vitesse de l'arbre.

Il est alors possible, avec cette stratégie de commande, d'extraire n'importe quelle puissance tant que le vent le permet. Dans le cas contraire, il faudra extraire le maximum de la puissance éolienne afin d'obtenir la valeur maximum du coefficient de puissance (C_{pMAX}).

Pour un fonctionnement au maximum de la puissance, le couple électromagnétique de référence doit être proportionnel au carré de la vitesse mécanique de l'arbre [8], [42], [34], [41] :

$$T_{ms-ref} = \frac{\rho\pi R_t^5 C_{pmax}}{\lambda_{OPT}^3} \Omega_t^2 = k\Omega_t^2 \tag{1.22}$$

La stratégie de commande en puissance "tant qu'il y a du vent" est illustrée par le tableau suivant :

Condition	$P_{ms-ref} \leq k\Omega_t^3$	$P_{ms-ref} > k\Omega_t^3$
T_{ms-ref}	$\frac{P_{ms-ref}}{\Omega_t}$	$k\Omega_t^2$

La puissance maximale est calculée en permanence ($k\Omega_t^3$) et est comparée avec la puissance de référence (P_{ms-ref}). Ainsi, si la puissance de référence est inférieure à la puissance maximale récupérable alors cela veut dire que l'éolienne est capable de générer ce que l'on demande donc l'éolienne fournira P_{ms-ref} . A l'inverse, si la puissance de référence est supérieure à la puissance maximale, cela veut dire que l'éolienne ne peut pas générer cette puissance et la commande bascule alors sur le fonctionnement à puissance maximale. Le générateur éolien est alors commandable en puissance aux pertes près et à condition que le vent le permet.

Simulation

Pour montrer le principe de la commande en puissance de l'éolienne à vitesse variable, plusieurs simulations ont été considérées par vent faible, moyen et fort et pour deux puissances de références différentes : d'une part une puissance de référence fixée à 750 kW, ce qui correspond à la puissance active nominale de la machine synchrone et d'autre part une puissance de référence fixée à 300 kW sous les mêmes conditions pour montrer que l'on peut extraire n'importe quelle puissance tant que le vent le permet.

Paramètres de la simulation

Paramètres de la machine asynchrone :

- Puissance nominale : 800 kVA,
- Inductance statorique : 7,8 mH,
- Résistance statorique : 6,3 mΩ,
- Coefficient d'aimantation : 6 Nm/A,
- Nombre de paire de pôles : 42.

Conditions initiales

Pour toutes les simulations, la machine synchrone est à l'arrêt et les courants sont nuls.

Résultats

Les figures 1.26 à 1.28 montrent des résultats de simulation lorsque la puissance de référence de l'éolienne à vitesse variable est fixée à 750 kW. Les figures 1.29 à 1.31 montrent des résultats de simulation lorsque la puissance de référence de l'éolienne à vitesse variable est fixée à 300 kW.

Les figures 1.26(a), 1.27(a), 1.28(a), 1.29(a), 1.30(a) et 1.31(a) représentent la puissance fournie par la génératrice et la puissance maximale ($P_{max} = \frac{1}{2} \rho S_t C_{p_{max}} v^3$) que l'on peut extraire de l'énergie du vent.

Les figures 1.26(b), 1.27(b), 1.28(b), 1.29(b), 1.30(b) et 1.31(b) représentent la vitesse de rotation de la turbine éolienne Ω_t en tr/min.

Les figures 1.26(c), 1.27(c), 1.28(c), 1.29(c), 1.30(c) et 1.31(c) représentent le coefficient de puissance C_p .

Les figures 1.26(d), 1.27(d), 1.28(d), 1.29(d), 1.30(d) et 1.31(d) représentent l'angle de calage β des pales avec la consigne à suivre β_{ref} .

Interprétation

Par vent faible, que la puissance de référence soit fixée à 300 kW ou à 750 kW, les résultats de simulation sont identiques car la puissance maximum que l'on peut extraire du vent est inférieure à la puissance de référence (la puissance que l'on souhaiterait donc obtenir). Dans l'incapacité de fournir les 300 ou 750 kW, c'est donc un fonctionnement au maximum de puissance qui est montré sur les figures 1.26 et 1.29. Les pales sont à leur angle de calage optimum ($\beta = -2^\circ$) et le coefficient de puissance est alors maximum.

Ce fonctionnement au maximum de puissance est encore observé sur la figure 1.27 par vent moyen alors que la puissance souhaitée est de 750 kW. En revanche, si la consigne en puissance

est fixée à 300 kW comme le montre la figure 1.30, la puissance du vent étant suffisante, on observe un fonctionnement à puissance constante à 300 kW. Dans ce cas, l'angle de calage des pales varie pour éviter l'emballement de la turbine (qui n'est plus suffisamment freinée par la génératrice) et le coefficient de puissance n'est plus à son maximum. On notera au passage la vitesse de rotation effectivement limitée à 25 tr/min.

Par vent fort, les constatations sont les mêmes et c'est donc un fonctionnement à puissance réglable "tant que le vent le permet" qui a été développé et simulé.

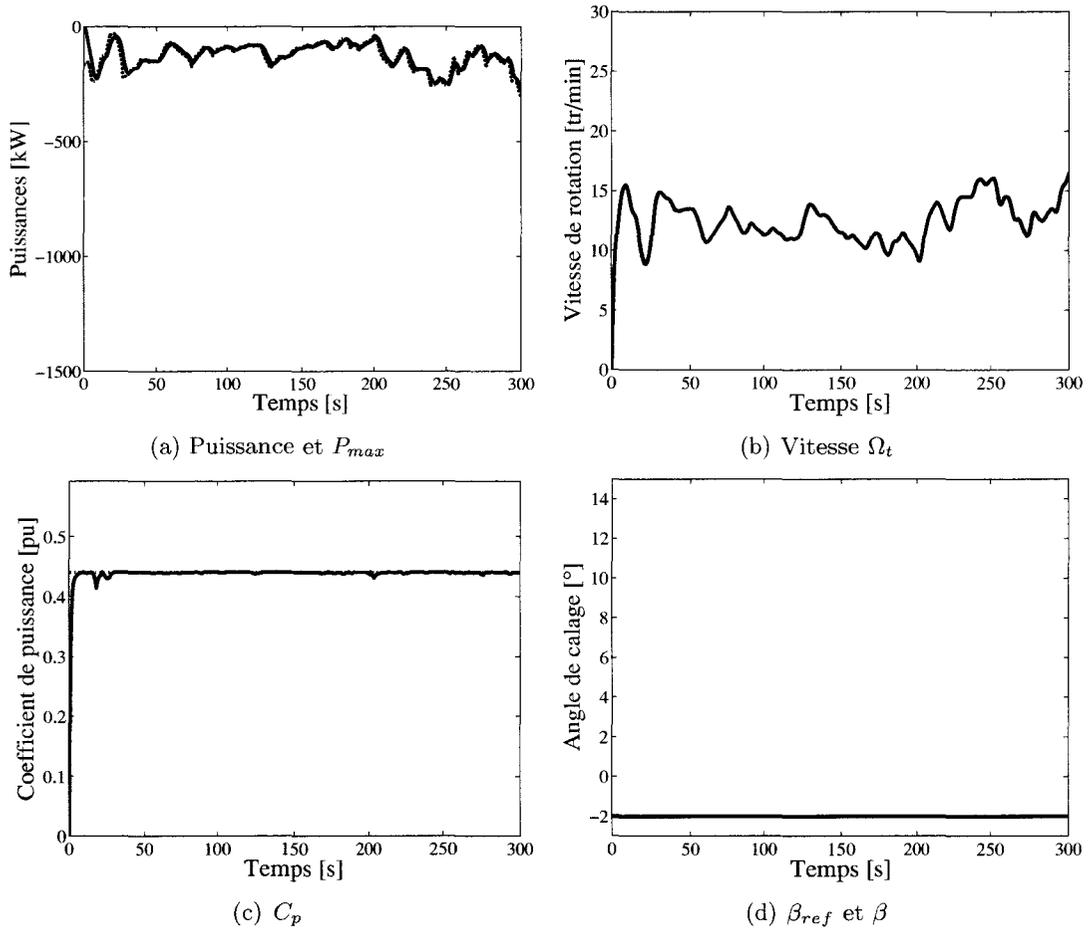


FIG. 1.26 – Simulation d'une éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents : puissance générée, vitesse de rotation de la turbine, coefficient de puissance et angle de calage sous un vent faible et avec $P_{ms-ref} = 750$ kW.

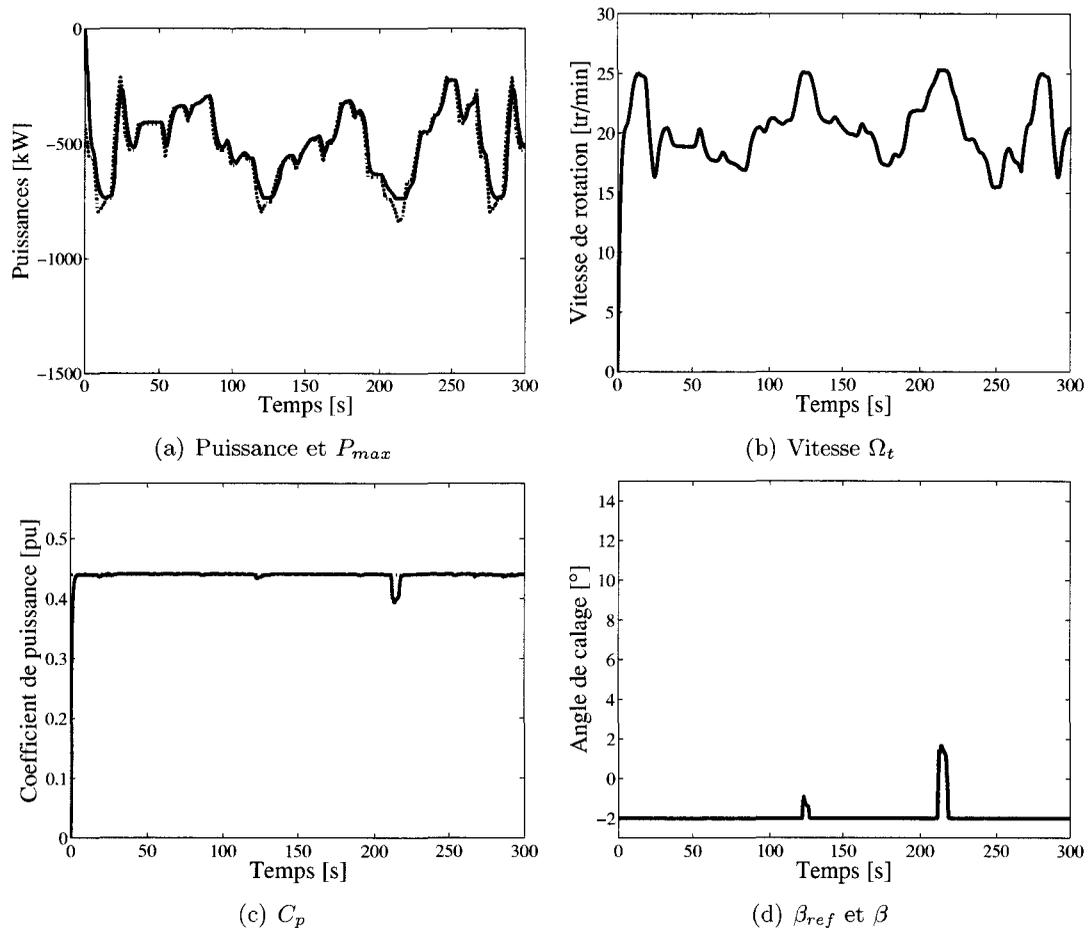


FIG. 1.27 – Simulation d’une éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents : puissance générée, vitesse de rotation de la turbine, coefficient de puissance et angle de calage sous un vent moyen et avec $P_{ms-ref} = 750$ kW.

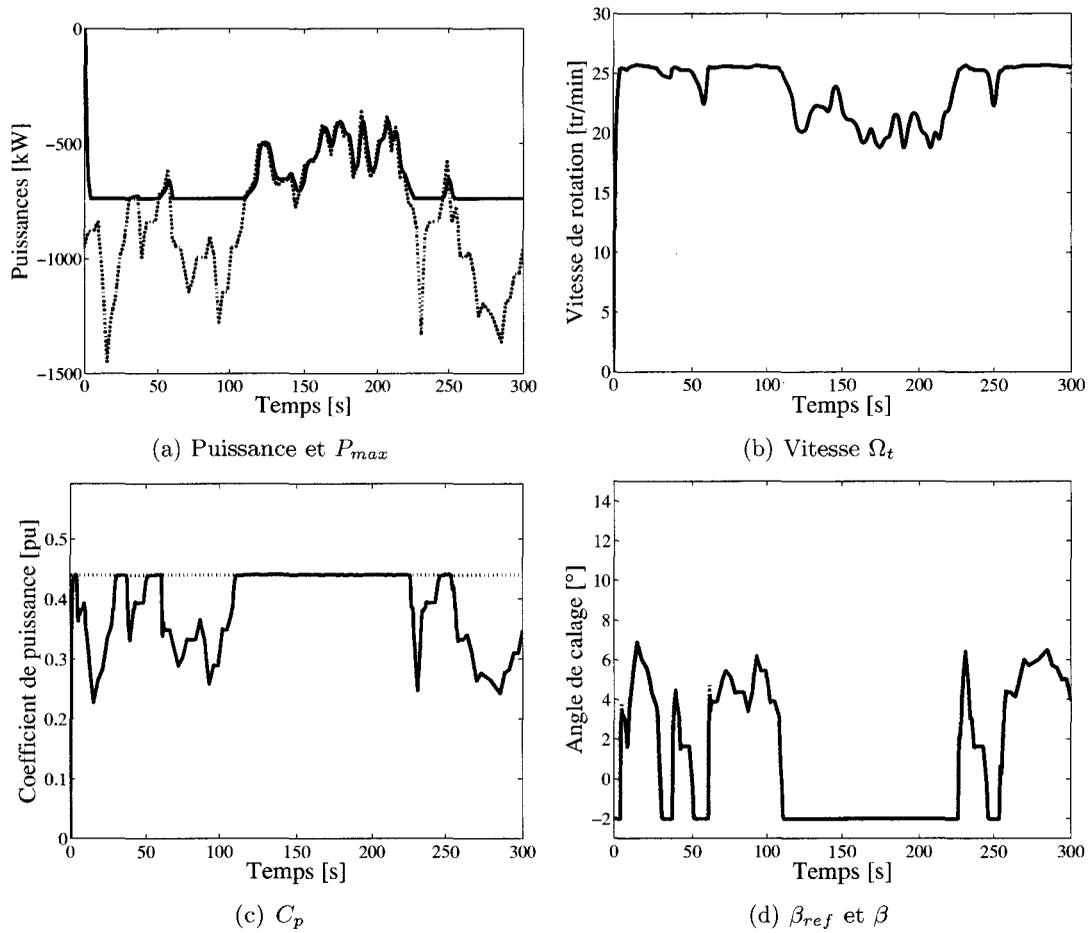


FIG. 1.28 – Simulation d’une éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents : puissance générée, vitesse de rotation de la turbine, coefficient de puissance et angle de calage sous un vent fort et avec $P_{ms-ref} = 750$ kW.

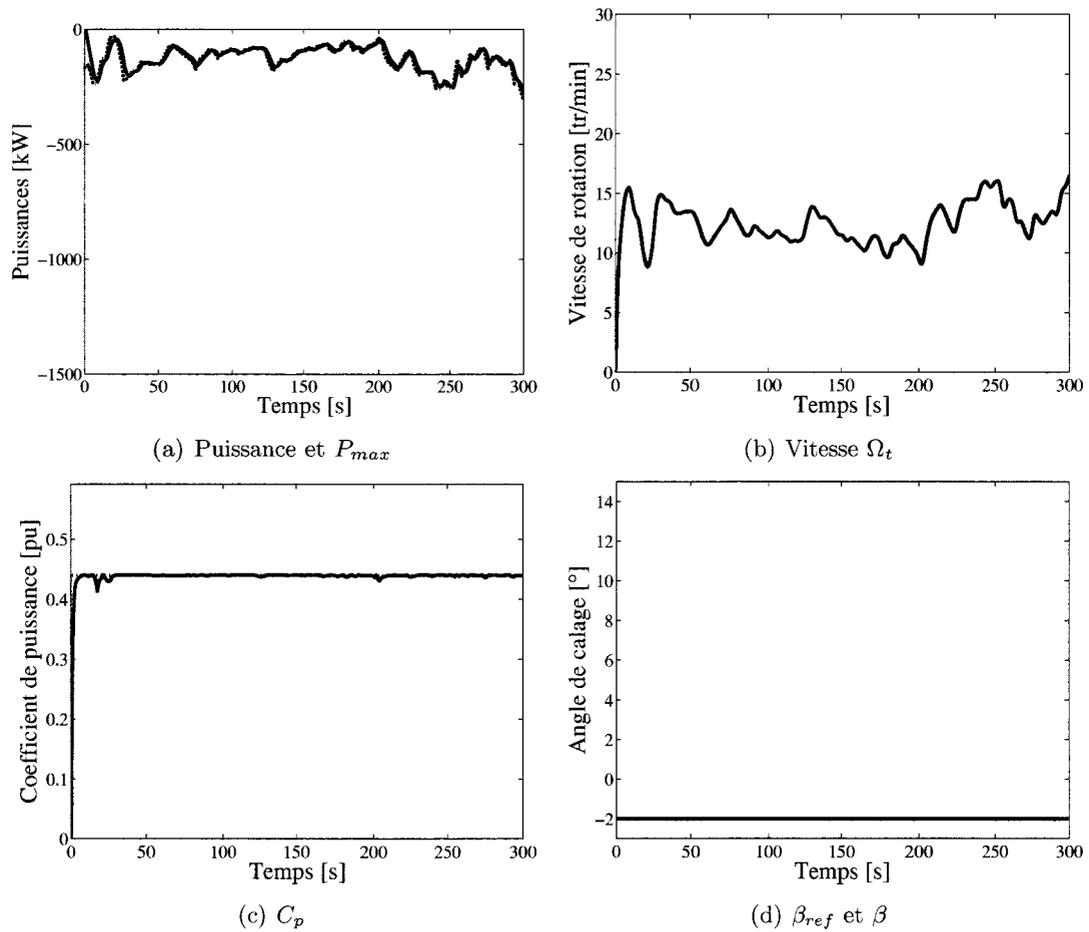


FIG. 1.29 – Simulation d’une éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents : puissance générée, vitesse de rotation de la turbine, coefficient de puissance et angle de calage sous un vent faible et avec $P_{ms-ref} = 300$ kW.

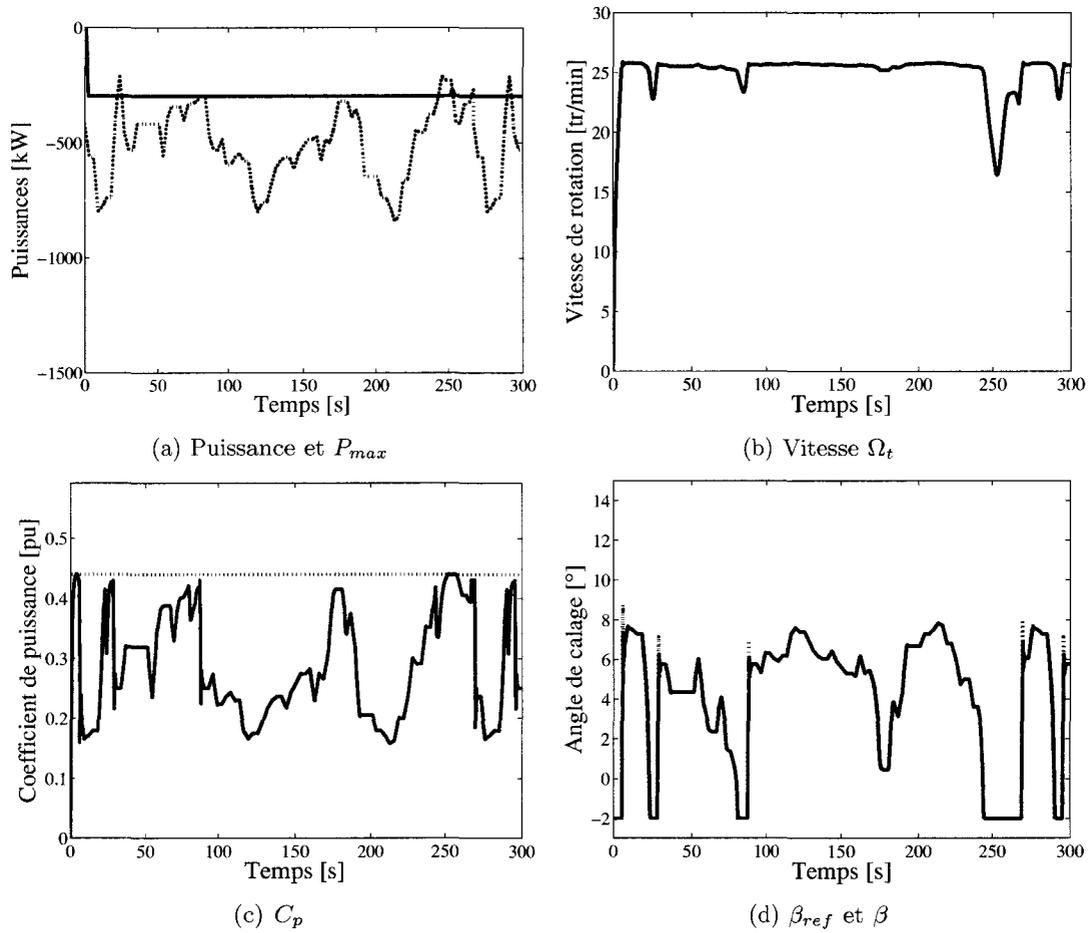


FIG. 1.30 – Simulation d’une éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents : puissance générée, vitesse de rotation de la turbine, coefficient de puissance et angle de calage sous un vent moyen et avec $P_{ms-ref} = 300$ kW.

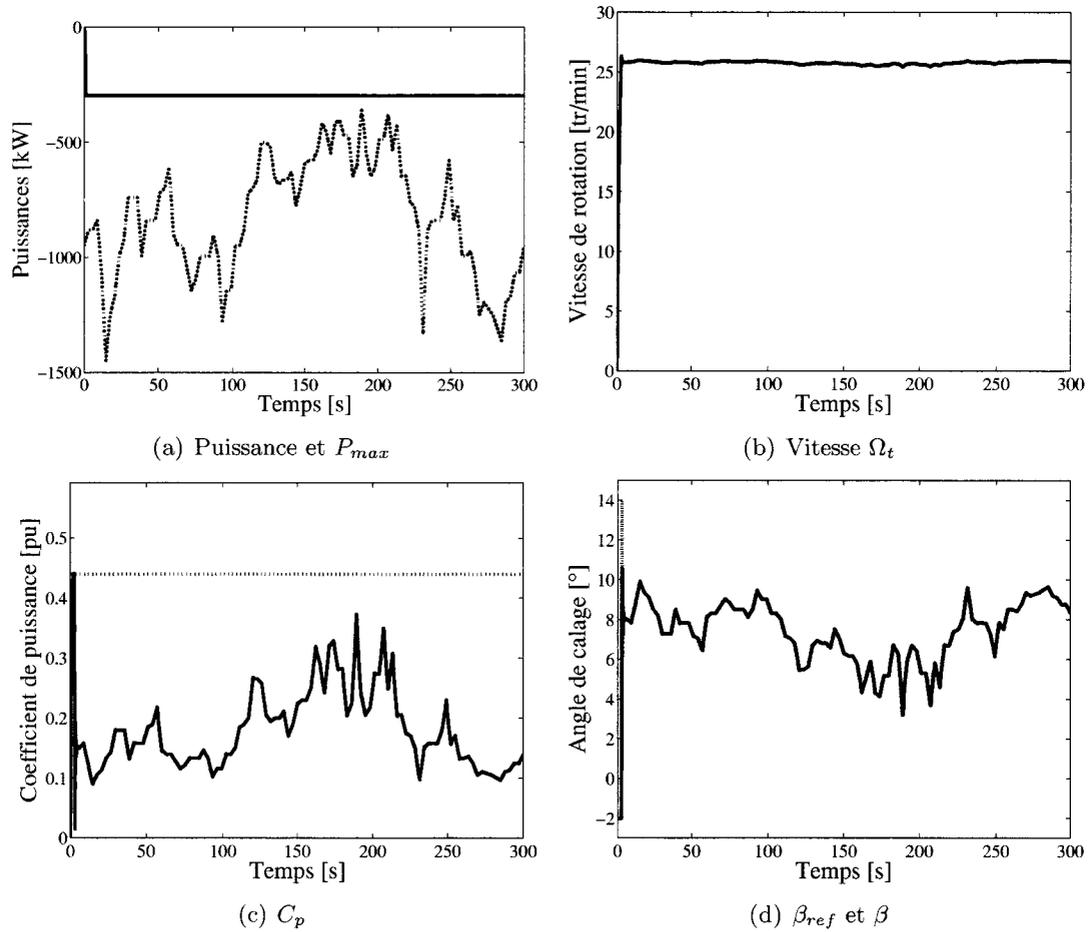


FIG. 1.31 – Simulation d’une éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents : puissance générée, vitesse de rotation de la turbine, coefficient de puissance et angle de calage sous un vent fort et avec $P_{ms-ref} = 300$ kW.

1.4 Conclusion

Ce chapitre a présenté les éoliennes de manière générale ainsi que la modélisation de la turbine éolienne. Le modèle associé à un système de limitation de vitesse par orientation des pales a été comparé avec des mesures effectuées sur une éolienne à vitesse fixe de 300 kW située à Dunkerque, validant ainsi le modèle. Le modèle ainsi validé a pu être utilisé pour modéliser la chaîne de conversion d'énergie d'une éolienne à vitesse variable. La stratégie de commande développée permet d'extraire le maximum de la puissance sans mesure de la vitesse du vent. Seules les caractéristiques nominales de la turbine sont utiles pour élaborer la stratégie de commande en couple. Aussi, il a été montré qu'il est possible d'extraire n'importe quelle puissance tant que le vent le permet en partie grâce au système de limitation de vitesse qui empêche alors l'emballement de la turbine sous l'action d'un vent trop fort. Le modèle développé reflète le comportement dynamique global d'une éolienne à vitesse variable. Ce modèle sera donc utilisé pour la suite de l'étude.

Chapitre 2

Le Système de stockage inertiel

2.1 Introduction

Ce chapitre présente le stockage d'énergie par masse tournante que l'on appelle couramment volant d'inertie. L'ensemble convertisseur, machine électrique et volant d'inertie est appelé système de stockage inertiel. Dans l'objectif de faire participer une éolienne à vitesse variable aux services systèmes, le stockage d'énergie de type inertiel est envisagé sous deux formes (voir figure 2.1) :

- L'utilisation d'une turbine éolienne en tant que système de stockage en y adjoignant éventuellement un volant d'inertie couplé mécaniquement à une machine asynchrone pilotée par un onduleur de tension comme représenté à la figure 2.1(a),
- un volant d'inertie couplé mécaniquement à une machine asynchrone et pilotée par un convertisseur de puissance type onduleur de tension comme représenté à la figure 2.1(b).

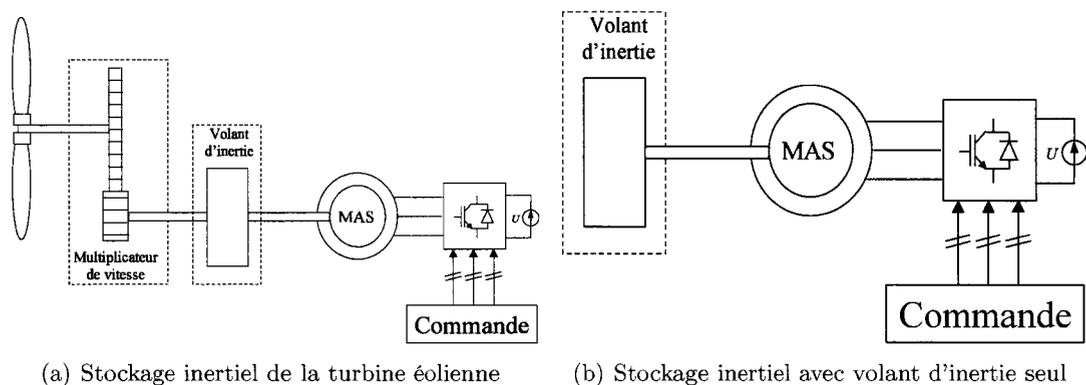


FIG. 2.1 – Les deux systèmes de stockage considérés.

Le but de ce chapitre est de développer les stratégies de commande permettant d'extraire une puissance désirée en stockant ou restituant de l'énergie. C'est du point de vue de l'utilisateur et non du concepteur que l'on se place dans cette étude, l'objectif n'étant pas de trouver une solution technologique mais de répondre à un besoin.

2.2 Généralités

Le stockage de l'électricité passe le plus souvent par une forme intermédiaire (gravitaire, de compression, chimique, cinétique, thermique...) [37]. Parmi toutes ces formes, on distingue deux types de stockage d'énergie [5] :

- le stockage de type capacitif (condensateur électrique, réservoir hydraulique ou pneumatique, ressort, accumulateur de chaleur...) où l'énergie stockée est de type potentielle,
- le stockage d'énergie de type inertiel (inductance électrique, fluide en mouvement, masse en rotation, masse en translation...) où l'énergie stockée est de type cinétique.

Dans le cadre d'une production décentralisée à partir d'énergies renouvelables, on peut envisager un stockage pour assurer un secours ou pour une régulation locale des flux d'énergie. Ainsi, le volant d'inertie est particulièrement bien adapté pour la production par énergies renouvelables qui nécessite, dans le cas de l'éolien, une capacité de stockage de quelques minutes [37]. Ceci permettrait, par exemple, de démarrer des groupes de production auxiliaires au cas d'absence de vent durant le temps de déchargement des systèmes de stockage constituant ainsi une "réserve tournante" pour des réseaux insulaire ou le taux de pénétration de l'éolien est important [37]. Pour des capacités de stockage moindre, le volant d'inertie trouvera ainsi sa place lorsqu'il s'agira de lisser la puissance de charges fluctuantes [37].

2.2.1 Les machines électriques

Les machines électriques utilisées pour le stockage inertiel sont toutes alternatives, sans balais et à rotor robuste avec soit une architecture cylindrique ou discoïde. On retrouve alors les machines à aimants, à réluctance variable et asynchrone.

2.2.2 Les paliers

On distingue principalement 2 types de paliers :

- les paliers à billes, fiables mais introduisent beaucoup de pertes et ne permettent pas des vitesses élevées,
- les paliers magnétiques, actifs, passifs ou supra-conducteurs qui permettent des vitesses élevées mais pour une complexité supérieure.

2.2.3 Énergie stockée

L'énergie E_v stockée dans le volant d'inertie J_v a pour expression :

$$E_v = \frac{1}{2} J_v \Omega_v^2 \quad (2.1)$$

Cette équation montre que pour une même énergie, un fonctionnement à vitesse élevée réduit considérablement la valeur du coefficient d'inertie.

2.2.4 Les matériaux et la forme du volant

Les matériaux utilisés doivent avoir une haute résistance à la traction (σ_{max}) due à la force centrifuge pour permettre des vitesses périphériques élevées.

L'énergie massique vaut :

$$\frac{E_v}{M} = K \frac{\sigma_{max}}{\rho} \quad (2.2)$$

avec :

- ρ , masse volumique du matériau utilisé,
- M , la masse du volant,
- K , dépendant de la forme du volant d'inertie.

L'équation 2.2 permet de voir que le matériau a son importance dans la conception du système de stockage de part son dimensionnement. Les meilleurs matériaux sont les composites à fibres de carbone de part leur légèreté et leur résistance à la traction. On peut donc dire que pour une masse identique, la capacité de stockage maximale sera plus importante pour les matériaux composites.

2.3 Principe du stockage inertiel avec machine asynchrone

La machine asynchrone est choisie en fonction de ces avantages en terme de simplicité et de robustesse des parties tournantes.

2.3.1 Zone de fonctionnement utile

La figure 2.2 représente le couple et la puissance d'une machine asynchrone en contrôle de couple en fonction de la vitesse. On remarque que :

- pour $0 \leq \Omega_v \leq \Omega_{vN}$, le couple peut être maximum donnant ainsi une puissance proportionnelle à la vitesse de rotation ($P_{mas} = k\Omega_v$),
- pour $\Omega > \Omega_N$, la puissance est maximum et correspond à la puissance nominale de la machine, le couple électromagnétique est alors inversement proportionnel à la vitesse de rotation ($T_{mas} = \frac{k}{\Omega_v}$).

Donc, si l'on souhaite disposer de la puissance nominale de la machine, il est indispensable de l'utiliser au delà de sa vitesse nominale. On suppose que l'on puisse monter jusqu'au double de la vitesse nominale, ce qui nous laisse considérer la vitesse nominale comme étant la limite basse du stockage inertiel et le double de celle-ci comme étant la limite haute. Le stockage inertiel avec machine asynchrone sera donc utilisé dans la plage de vitesse suivante : $\Omega_{vN} \leq \Omega_v \leq 2\Omega_{vN}$ permettant ainsi un fonctionnement à puissance nominale constante si besoin.

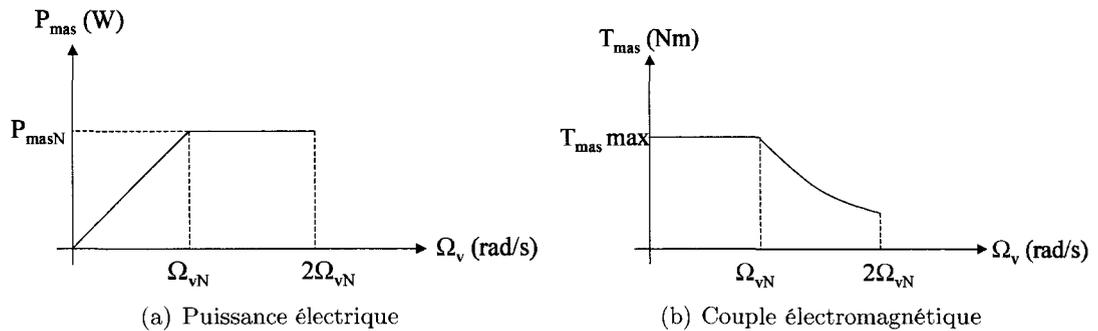


FIG. 2.2 – Allures de la puissance et du couple en fonction de la vitesse.

2.3.2 Cahier des charges : calcul de l'inertie du volant

Pour calculer l'inertie du volant, on se base sur une puissance à fournir durant un temps Δt : on souhaite que le stockage inertiel fournisse la puissance nominale P_{masN} durant un temps Δt . L'énergie nécessaire vaut alors $\Delta E_v = P_{masN} \Delta t$. Sachant que $\Delta E_v = \frac{1}{2} J_v \Delta \Omega_v^2$ et que $\Delta \Omega_v^2 = \Omega_{vMAX}^2 - \Omega_{vMIN}^2$, il vient :

$$J_v = \frac{2P_{masN} \Delta t}{\Omega_{vMAX}^2 - \Omega_{vMIN}^2} \quad (2.3)$$

2.3.3 Commande : contrôle de la puissance

On souhaite contrôler la puissance de la machine asynchrone couplée au volant d'inertie. La figure 2.3 montre le contrôle en puissance élaboré à partir de la commande en couple développée pour une machine asynchrone (voir annexe B.1). Le sous système représenté est représentatif de l'ensemble convertisseur-machine asynchrone-commande en couple.

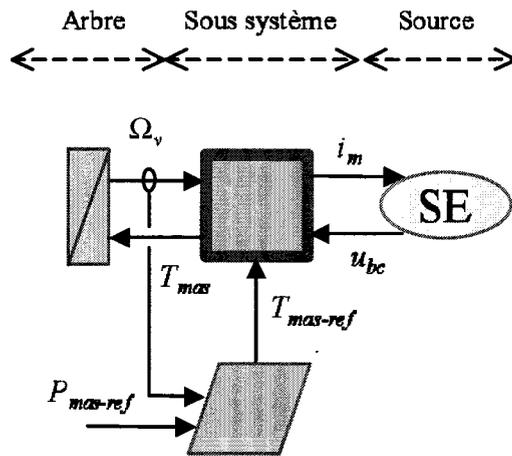


FIG. 2.3 – Contrôle de la puissance du système de stockage.

Comme le montre la figure 2.3, à partir d'une puissance de référence, on peut déduire le couple électromagnétique de référence de la machine entraînant le volant d'inertie par une mesure de la vitesse de rotation :

$$T_{mas-ref} = \frac{P_{mas-ref}}{\Omega_{v-mes}} \quad (2.4)$$

Le couple électromagnétique de référence $T_{mas-ref}$ devra être limité au couple nominal pour la plage de vitesse comprise entre 0 et la vitesse nominale en évitant la discontinuité de l'équation 2.4 à l'arrêt du volant.

2.4 Stockage inertiel avec turbine éolienne et volant d'inertie

2.4.1 Principe

On souhaite utiliser l'inertie d'une turbine éolienne pour stocker de l'énergie [22]. L'éolienne devient alors un système de stockage et au besoin, on peut lui ajouter un volant d'inertie en complément. L'originalité de cette partie tient dans le fait que l'énergie éolienne capté par la turbine représente une source d'énergie non négligeable permettant une recharge permanente du système de stockage. Cependant, suivant le cahier des charges, l'ajout d'un volant d'inertie sur l'arbre en haut d'un mat d'une turbine de quelques MW peut s'avérer être un problème technologique majeur, ceci même en envisageant un système de transmission mécanique poulies-courroie qui laisserai le volant au sol car cela supposerait qu'il tourne en même temps que la nacelle qui cherche alors à s'orienter en permanence dans la direction du vent. C'est sans doutes dans les éoliennes de faible et moyenne puissance que cette application serait susceptible d'être intéressante. La figure 2.4 montre l'association d'une éolienne avec un volant d'inertie telle qu'elle est considérée dans cette section.

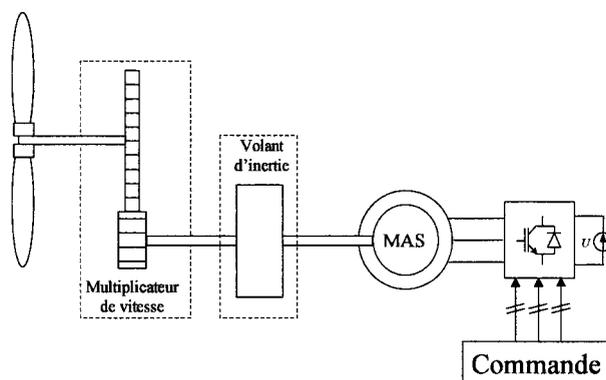


FIG. 2.4 – Turbine éolienne avec volant d'inertie.

2.4.2 Simulation

Caractéristiques des éléments simulés

La simulation a été faite pour les 3 vents différents (vents faible, moyen et fort).

Conditions initiales

Initialement, le volant d'inertie tourne à 1500 tr/min. La machine asynchrone est fluxée.

La machine asynchrone

- Puissance nominale : 720 kW,
- Inductance cyclique statorique : 3,5 mH,
- Inductance cyclique rotorique : 3,2 mH,
- Résistance statorique : 6 mΩ,
- Résistance rotorique : 1,7 mΩ,
- Mutuelle inductance : 3,2 mH,

- Nombre de paire de pôles : 2.

La loi de défluxage qui a été introduite dans la simulation est la suivante :

$$\psi_{rdREF} = \frac{P_{eNOM} L_r}{M i_{sq}} \frac{1}{\Omega_v} \approx \frac{393}{\Omega_v}$$

La transmission mécanique

- Coefficient d'inertie : $1167,2 \text{ kg.m}^2$
- Coefficient de frottement dynamiques : $6,4.10^{-3} \text{ kg.m}^2\text{s}^{-1}$

Résultats

Les figures 2.5(a), 2.6(a) et 2.7(a) représentent la puissance absorbée ou fournie par la machine asynchrone respectivement par vents faible, moyen et fort. Les traits en pointillés représentent la puissance nominale de la machine asynchrone et les traits discontinus la puissance de référence. Les figures 2.5(b), 2.6(b) et 2.7(b) représentent la vitesse de rotation de la machine asynchrone respectivement par vents faible, moyen et fort.

Interprétation

La puissance de référence des figures 2.5(a), 2.6(a) et 2.7(a) est inversée à chaque fois que la vitesse du volant atteint une limite haute ou basse (voir les figures 2.5(b), 2.6(b) et 2.7(b)). On demande donc à la machine asynchrone de fournir ou de consommer sa puissance nominale qui est de 720 kW. Une puissance positive correspond à une puissance consommée par la machine et une puissance négative correspond à une puissance fournie par la machine.

Au regard des figures 2.5, 2.6 et 2.7, on constate que plus le vent est fort, plus le temps de décharge augmente. Le rapport entre l'énergie stockée et l'énergie restituée augmente alors considérablement palliant le problème des pertes dans le système de stockage.

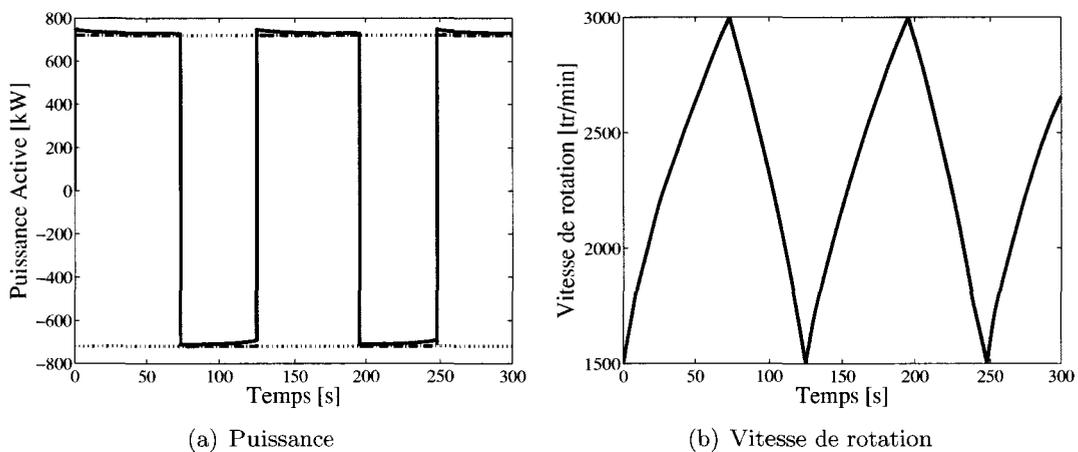


FIG. 2.5 – Simulation de la turbine éolienne couplée mécaniquement avec un volant d'inertie par vent faible et $P_{mas-ref} = \pm 720 \text{ kW}$.

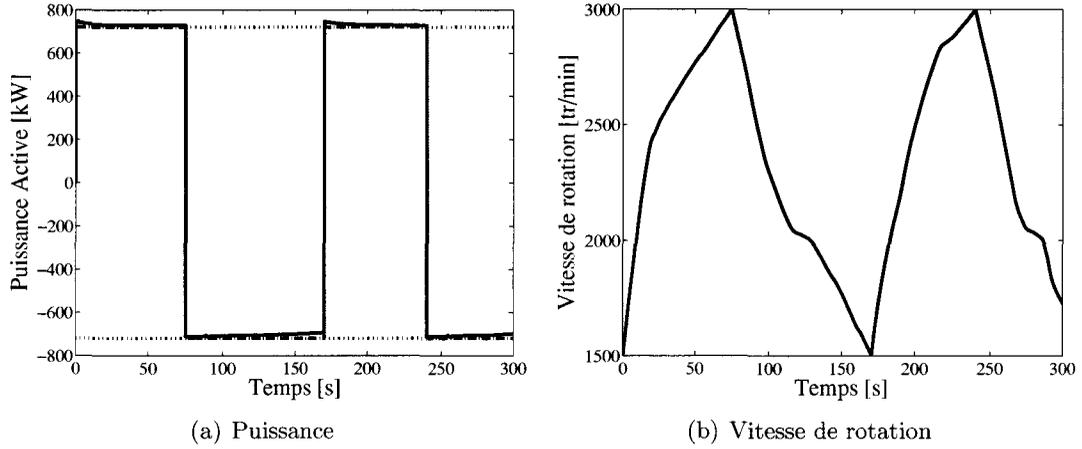


FIG. 2.6 – Simulation de la turbine éolienne couplée mécaniquement avec un volant d'inertie par vent moyen et $P_{mas-ref} = \pm 720$ kW.

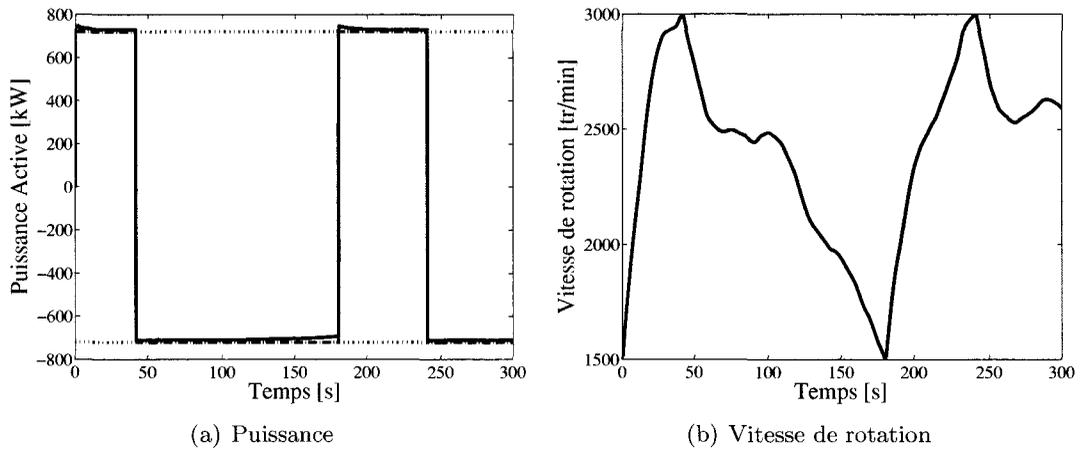


FIG. 2.7 – Simulation de la turbine éolienne couplée mécaniquement avec un volant d'inertie par vent fort et $P_{mas-ref} = \pm 720$ kW.

2.5 Stockage inertiel avec volant d'inertie uniquement

2.5.1 Principe

En supposant que la première forme de stockage pose problème quand à la réalisation technique, on s'intéresse alors à une solution courante avec uniquement un volant d'inertie entraînée par une machine asynchrone. La structure de la commande reste la même : on contrôle la puissance du système de stockage.

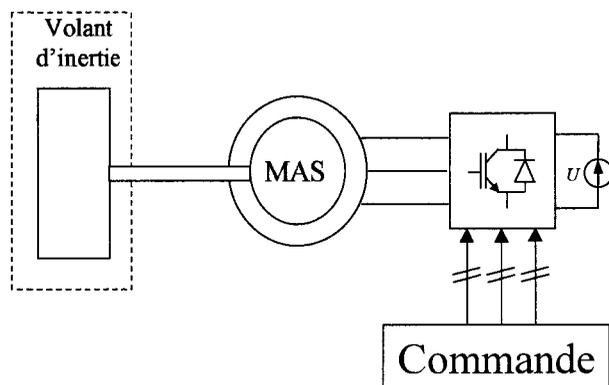


FIG. 2.8 – Premier système de stockage inertiel.

2.5.2 Simulation

Dans cette simulation, la réponse en puissance du système de stockage inertiel est observée.

Caractéristique des éléments simulés

Conditions initiales

Initialement, le volant d'inertie tourne à 1500 tr/min. La machine asynchrone est fluxée.

La machine asynchrone

- Puissance nominale : 720 kW,
- Inductance cyclique statorique : 3,5 mH,
- Inductance cyclique rotorique : 3,2 mH,
- Résistance statorique : 6 mΩ,
- Résistance rotorique : 1,7 mΩ,
- Mutuelle inductance : 3,2 mH,
- Nombre de paire de pôles : 2.

La loi de défluxage qui a été introduite dans la simulation est la suivante :

$$\psi_{rdREF} = \frac{P_{eNOM} L_r}{M i_{sq}} \frac{1}{\Omega_v} \approx \frac{393}{\Omega_v}$$

La transmission mécanique

- Coefficient d'inertie : $1167,2 \text{ kg.m}^2$
- Coefficient de frottement dynamiques : $6,4.10^{-3} \text{ kg.m}^2\text{s}^{-1}$

La valeur du coefficient d'inertie a été calculée pour une plage de vitesse comprise entre 1500 et 3000 tr/min, une puissance nominale de 720 kW durant un temps correspondant à 1 minute :

$$J = \frac{2 \times 720000 \times 60}{(3000 \times \pi/30)^2 - (1500 \times \pi/30)^2} \approx 1167,2 \text{ kg.m}^2$$

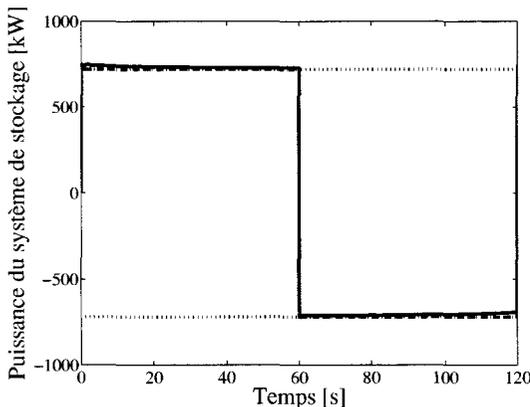
Résultats

Puissance du système de stockage

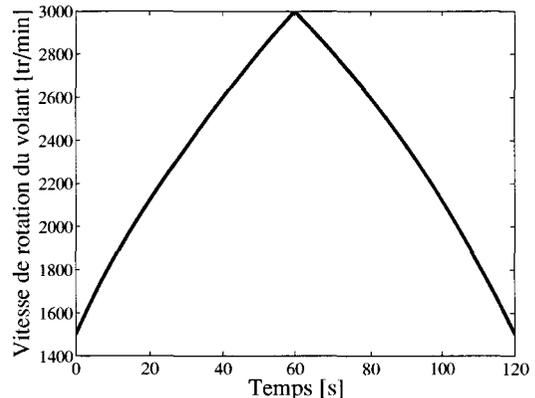
La puissance du système de stockage est représentée à la figure 2.9(a). Il est demandé dans cette simulation de stocker 720 kW durant les 60 premières secondes et de restituer 720 kW dans les 60 secondes restantes. On constate au regard de la figure 2.9(a) que la puissance de référence est bien suivie aux pertes près. En effet, les pertes ne sont pas prises en compte et on verra plus loin qu'il n'est pas nécessaire de les estimer pour cette régulation en puissance. Sur cette figure, la courbe en traits discontinus représente la puissance de référence qui doit être inférieure ou égale en valeur absolue à la puissance nominale de la machine asynchrone (traits en tirets). La courbe en continu représente la puissance obtenue. Les pointillés correspondent à la puissance nominale de la machine asynchrone.

Vitesse de rotation du volant

La vitesse de rotation du volant est représentée à la figure 2.9(b). La vitesse de rotation du volant d'inertie passe de 1500 à 3000 tr/min en 60 secondes conformément au cahier des charges (calcul de l'inertie permettant de fournir la puissance nominale durant une minute). Ce cas correspond bien au stockage. Ensuite, la vitesse passe de 3000 à 1500 tr/min en 60 secondes pour restituer 720 kW. Il est à noter qu'il est techniquement possible qu'une machine asynchrone de cette puissance tourne à 3000 tr/min avec des paliers d'une machine à une seule paire de poles de puissance identique.



(a) Puissance



(b) Vitesse de rotation

FIG. 2.9 - Simulation du système de stockage inertiel avec $P_{mas-ref} = \pm 720 \text{ kW}$.

2.6 Systèmes de stockage en parallèle

L'inertie calculée précédemment peut paraître grande donc non réalisable techniquement. On montre ici que l'on peut coupler en parallèle plusieurs systèmes de stockage du même type mais de puissance plus petite, ceci pour un même cahier des charges. Autrement dit, pour fournir 750 kW pendant une minute, il faudrait disposer d'un volant d'inertie de 1215 $kg.m^2$. La figure 2.10 montre son équivalence avec 3 systèmes de stockage de 250 kW chacun. L'inertie de chaque système se trouve alors trois fois plus petite que pour avec une machine de 750 kW. Aussi, pour des plus petites puissances, on pourrait utiliser des machine asynchrones à une seule paire de pole qui permettrait de diviser l'inertie par quatre dans la mesure où les paliers sont techniquement réalisables.

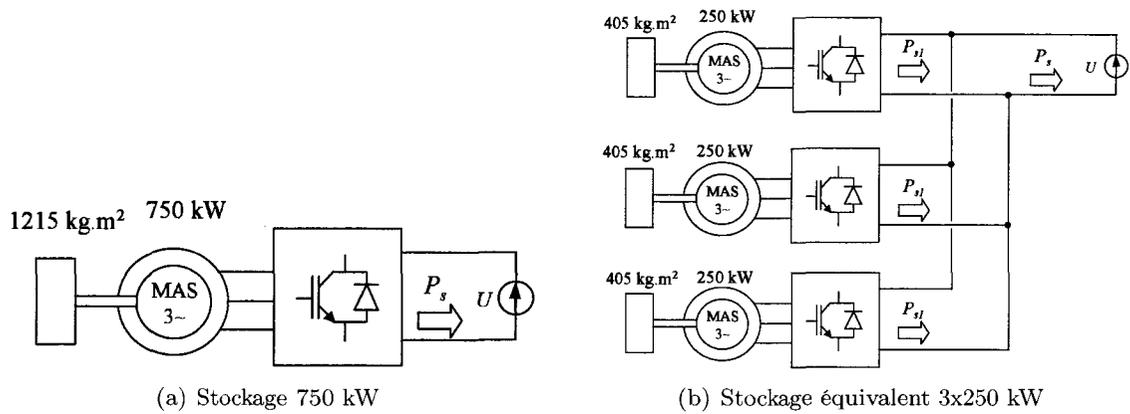


FIG. 2.10 – Equivalence énergétique.

Mais pour avoir une équivalence totale entre les deux solutions, il faut qu'ils réagissent de la même manière du point de vue de la commande. La puissance de référence peut être distribuée équitablement pour chaque machine à condition qu'elles aient même vitesse de rotation. Or, en réalité, les arbres mécaniques auront des frottements secs et visqueux légèrement différents qui introduiront des écarts de vitesse dans le temps. Afin de garder tous les volants d'inertie à la même vitesse, on propose une pseudo commande en vitesse basée sur la différence d'énergie entre deux points de fonctionnement :

$$\Delta E_n = \frac{1}{2} J (\Omega_{cible}^2 - \Omega_n^2) \quad (2.5)$$

Où Ω_n est la vitesse du volant d'inertie n et Ω_{cible} la vitesse que les n volants doivent avoir. La puissance de référence de n systèmes de stockage peut alors s'écrire :

$$P_{snref} = \frac{P_{sref}}{n} + \frac{J}{2T} (\Omega_{cible}^2 - \Omega_n^2) \quad (2.6)$$

Avec T , intervalle de temps fixant la dynamique de la réponse. On peut facilement montrer que le temps de réponse $t_r = 3T$.

Afin de garder une bonne répartition de puissance entre chaque système il faut garder la condition :

$$P_{s1ref} + P_{s2ref} + P_{s3ref} = P_{sref} \quad (2.7)$$

Ce qui permet de déterminer la vitesse que tous les volants doivent avoir :

$$\Omega_{cible}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Omega_i^2 \quad (2.8)$$

2.6.1 Simulation

Caractéristiques des éléments simulés

Conditions initiales

Initialement les machines sont fluxées et tournent respectivement à 1900, 2000 et 1800 tr/min. La puissance de référence des trois systèmes de stockage est initialement de 250 kW. L'algorithme d'égalisation des vitesses est enclenché dès le début de la simulation avec un temps de réponse fixé à 15 secondes ($T = 5$ s.). Au bout de 30 secondes, la puissance de référence passe de 250 à 750 kW.

La machine asynchrone

- Puissance nominale : 250 kW,
- Inductance cyclique statorique : 11,6 mH,
- Inductance cyclique rotorique : 10,8 mH,
- Résistance statorique : 6 m Ω ,
- Résistance rotorique : 17,2 m Ω ,
- Mutuelle inductance : 10,8 mH,
- Nombre de paire de pôles : 2.

La loi de défluxage qui a été introduite dans la simulation est la suivante :

$$\psi_{rdREF} = \frac{P_{eNOM} L_r}{M i_{sq}} \frac{1}{\Omega_v} \approx \frac{393}{\Omega_v}$$

La transmission mécanique

- Coefficient d'inertie : 405 kg.m²
- Coefficient de frottement dynamiques : 6,4.10⁻³ kg.m²s⁻¹

Résultats

Les résultats de simulation sont représentés à la figure 2.11. La puissance de chaque système est représentée à la figure 2.11(a). La vitesse de rotation de chaque volant d'inertie est représentée à la figure 2.11(b). La puissance des trois systèmes de stockage est représentée à la figure 2.11(c).

Interprétation

Les vitesses de rotation des trois systèmes

au regard de la figure 2.11(b), les trois volants ont des vitesses de rotation différentes telles qu'elles ont été imposées comme conditions initiales. L'algorithme de commande rattrape alors les écarts de vitesse entre la vitesse de chaque volant et la vitesse cible.

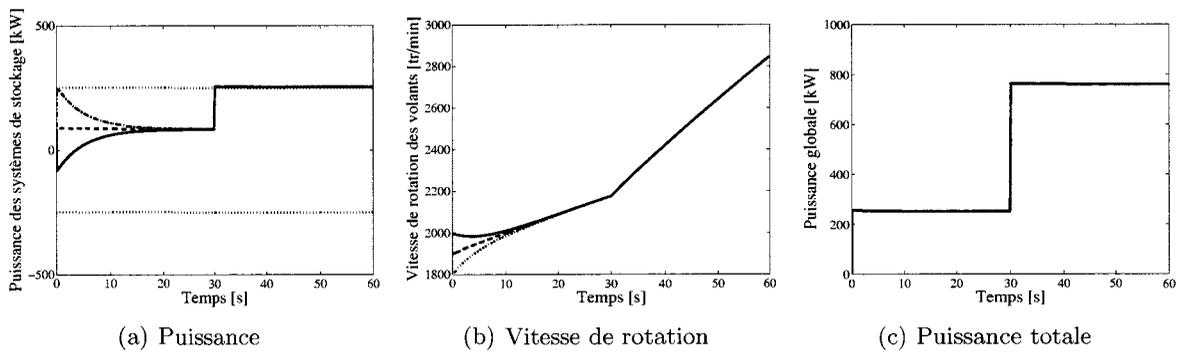


FIG. 2.11 – Simulation de trois systèmes de stockage en parallèle de 250 kW chacun : puissances actives consommées par chaque système, vitesse de rotation de chaque volant et puissance totale consommée.

Les puissances des trois systèmes

Les puissances des trois systèmes de stockage sont différentes dès le départ en regardant la figure 2.11(a), l’algorithme de commande agissant de sorte à ce que l’erreur entre la vitesse de chaque volant et la vitesse cible soit nulle.

La puissance globale

Transitoirement, en regardant la figure 2.11(a) les puissances des trois systèmes de stockage sont différentes dans le but de rattraper la vitesse de référence et on constate que la somme des trois est bien constante et égale à la référence souhaitée (250 kW) comme le montre la figure 2.11(c). Le critère imposé par l’équation 2.8 est donc bien respecté. La figure 2.11(b) montre que les trois volants atteignent à peu près la même vitesse aux alentours de 15 secondes, temps de réponse effectivement imposé ($T = 5$ s).

2.7 Conclusion

Le modèle développé répond bien aux objectifs fixés. Les résultats de simulation montrent clairement le stockage et la restitution d’énergie. Ces systèmes sont donc validés pour la suite de l’étude bien que l’on pourrait considérer des systèmes de stockage composés d’autres machines (machine à réluctance variable par exemple). Car l’emploi d’une autre machine électrique capable de monter plus haut en vitesse permettrait de diminuer l’inertie pour une même énergie stockée et donc de diminuer la masse tournante. Bien que techniquement difficilement réalisable pour des applications de grande puissance, l’utilisation de l’inertie de la turbine éolienne comme forme de stockage reste néanmoins intéressante. Cependant, d’après le cahier des charges fixé pour un système de stockage composé uniquement d’un volant d’inertie, il apparaît que l’inertie nécessaire est trop grande pour être techniquement réalisable. C’est donc par l’association en parallèle de plusieurs petits systèmes de stockage que l’on pourra répondre à ce cahier des charges. Pour la suite de l’étude, on considérera donc un seul système de stockage, mettant de côté l’aspect technique qui peut être contourné d’une certaine manière.

Chapitre 3

Onduleur de tension sur un réseau

3.1 Introduction

La participation aux services systèmes doit se faire sur un réseau alternatif triphasé. Il est alors nécessaire d'utiliser un onduleur de tension pour la conversion continu-alternatif dans la chaîne de conversion d'énergie éolienne. Dans ce chapitre est présentée une structure de raccordement d'un onduleur de tension sur un réseau qui peut être passif ou actif. Deux types de stratégie de commande sont étudiés, l'une permettant d'alimenter des charges isolées, idéale pour un fonctionnement sur un réseau passif, et l'autre permettant de renvoyer la puissance désirée à un réseau sous tension susceptible d'absorber. On verra que la première stratégie est mieux adaptée pour l'objectif services systèmes.

3.2 Structure de raccordement

Dans le cas où l'onduleur est l'unique générateur (cas des alimentations de secours ou de sécurité), on doit interposer entre l'onduleur et le récepteur (quelque soit sa nature) un filtre LC, pour obtenir une tension quasi sinusoïdale à ses bornes [17]. Le filtrage LC de sortie est principalement utilisé dans les générateurs devant se substituer aux réseaux industriels [27].

Dans la majorité des éoliennes à vitesse variable directement reliées à un réseau sous tension, seule une inductance L suffit. On peut néanmoins utiliser des éléments LCL comme dans [16], [47], [25], par soucis de qualité de fourniture d'énergie [40].

La structure de raccordement proposée est représentée à la figure 3.1. L'inductance L_{res} est ajoutée pour respecter l'alternance des sources et peut correspondre à l'inductance de fuite d'un transformateur par exemple. L'onduleur de tension est connecté via un élément LCL à un réseau électrique. Deux types de réseaux électriques peuvent être considérés :

- un réseau comportant au moins une source parfaite de tension triphasée, que l'on appellera réseau actif,
- et un réseau composé uniquement de charges isolées raccordées entre-elles électriquement sans source d'énergie, que l'on appellera réseau passif.

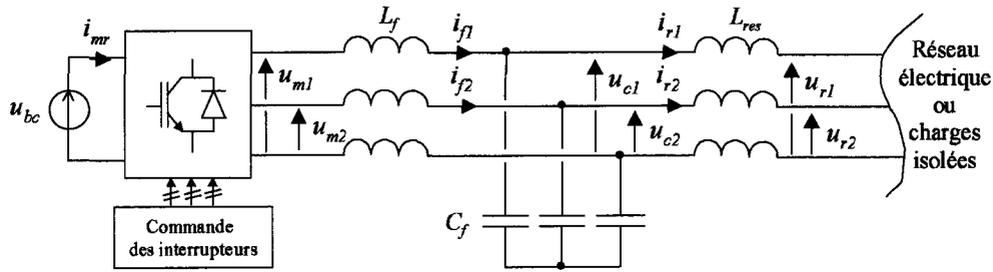


FIG. 3.1 – Structure de raccordement avec un élément LCL.

3.2.1 Modélisation du filtre LC

Le modèle de l'onduleur de tension est détaillé en Annexe A.5. Le filtre LC représenté à la figure 3.1 est modélisé suivant l'équation suivante :

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{f1} \\ i_{f2} \\ u_{c1} \\ u_{c2} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{3L_f} & 0 & -\frac{2}{3L_f} & \frac{1}{3L_f} \\ 0 & -\frac{R_f}{3L_f} & \frac{1}{3L_f} & -\frac{2}{3L_f} \\ \frac{2}{3C_f} & \frac{1}{3C_f} & -\frac{1}{3R_{cf}C_f} & 0 \\ \frac{1}{3C_f} & \frac{2}{3C_f} & 0 & -\frac{1}{3R_{cf}C_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f1} \\ i_{f2} \\ u_{c1} \\ u_{c2} \end{bmatrix} + \\
 &+ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{2}{3C_f} & -\frac{1}{3C_f} \\ -\frac{1}{3C_f} & -\frac{2}{3C_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{r1} \\ i_{r2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2}{3L_f} & -\frac{1}{3L_f} \\ -\frac{1}{3L_f} & \frac{2}{3L_f} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{m1} \\ u_{m2} \end{bmatrix} \quad (3.1)
 \end{aligned}$$

Avec :

- u_{m1} et u_{m2} , tensions modulées en sortie de l'onduleur,
- u_{c1} et u_{c2} , tensions aux bornes des condensateurs,
- i_{f1} et i_{f2} , courants coté convertisseur,
- i_{r1} et i_{r2} , courants coté réseau,
- L_f , inductance de la self coté convertisseur,
- R_f , résistance de la self coté convertisseur,
- C_f , capacité du condensateur,
- R_{cf} , résistance parallèle du condensateur,
- L'_f , inductance de la self coté réseau,
- R'_f , résistance de la self coté réseau.

Le figure 3.2 montre la REM de l'onduleur de tension raccordé au réseau via l'élément LCL.

3.2.2 Stratégies de commande

Il existe deux stratégies de commande pour les onduleurs de tension : l'une permettant de fonctionner en source de courant et l'autre en source de tension. On rencontre surtout la première lorsqu'il s'agit d'un onduleur connecté à un réseau électrique puissant dont le principal rôle de l'onduleur est de renvoyer de la puissance en se calant sur le réseau via une boucle à verrouillage de phase [23]. On régule alors le courant dans une self. La deuxième stratégie de commande, qui consiste à réguler la tension aux bornes des condensateurs de l'élément LCL, est surtout utilisée dans le cadre d'alimentations de charges isolées telles les Alimentations Sans Interruption (ASI).

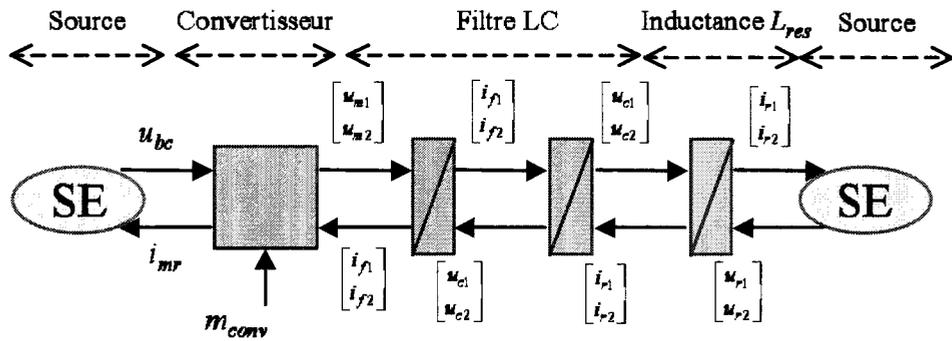


FIG. 3.2 – REM de la connexion réseau.

Dans ce dernier cas, on verra que le comportement d'un alternateur peut être imité et qu'il est possible d'effectuer une répartition de charge dans le cas de connexion de plusieurs onduleurs sur le réseau isolé alternatif. La complexité de la commande lors de ce fonctionnement est fonction de la nature de la charge à alimenter, qui peut être non linéaire et/ou déséquilibrée [39], [10], [7], [55].

3.3 Fonctionnement en source de tension sur réseaux passif et actif

3.3.1 Structure de la commande

Dans le cas d'une connexion à un réseau composé uniquement de charges isolées, l'onduleur doit se comporter comme une source de tension triphasée appliquant de ce fait une onde de tension sinusoïdale d'amplitude U et de fréquence f aux bornes de chaque charge. Le rôle du filtre LC est donc double puisqu'en plus d'atténuer les harmoniques engendrés par le convertisseur, il permettra à l'onduleur de réaliser la source de tension triphasée grâce aux condensateurs en asservissant les tensions à leurs bornes. La figure 3.3 montre la structure de la commande maximale de la REM pour la régulation des tensions aux bornes des condensateurs. Elle propose une commande cascade qui suppose quatre mesures (i_{f1} , i_{f2} , u_{c1} , u_{c2}) et quatre correcteurs (deux correcteurs de courant et deux correcteurs de tension).

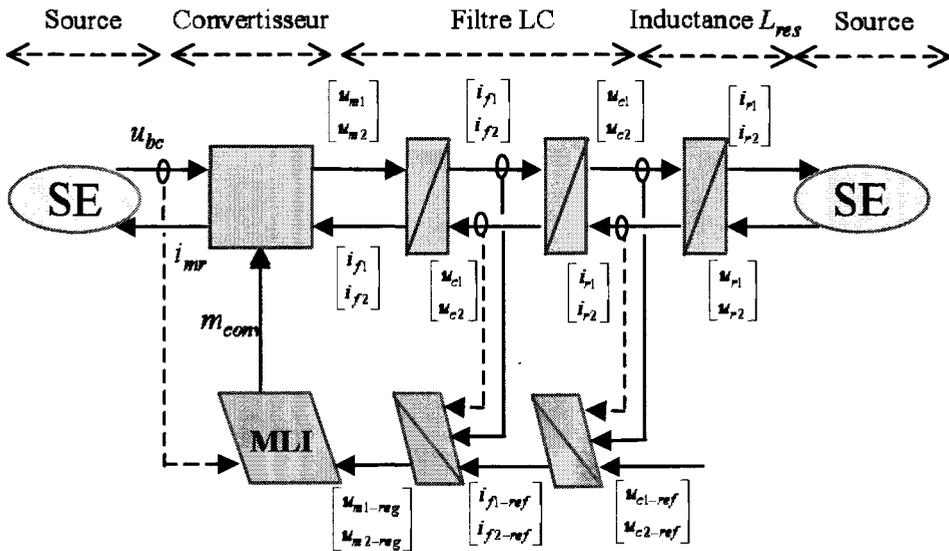


FIG. 3.3 – Structure de la commande maximale.

A partir de la structure de la commande maximale de la figure 3.3, on établit un schéma bloc de la commande comme représenté à la figure 3.4. Les correcteurs $C_i(s)$ et $C_u(s)$ doivent assurer un bon suivi de la consigne.

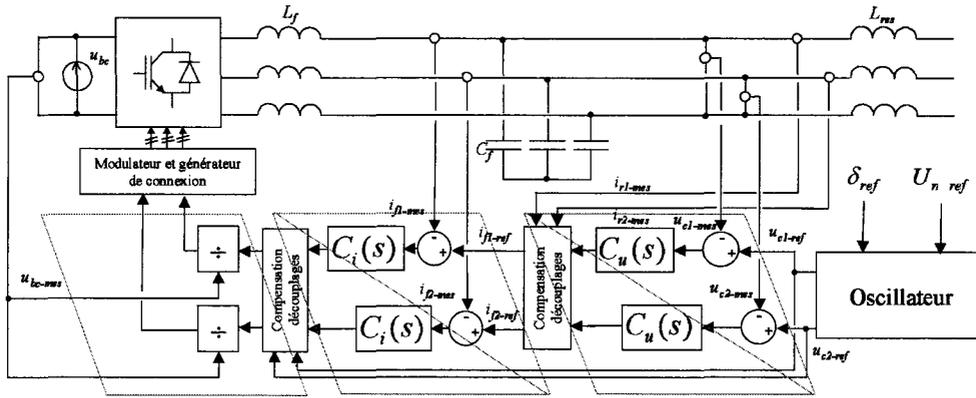


FIG. 3.4 – Structure de la commande coté réseau dans le cas de la commande maximale.

Dans le cas où la constante de temps de la self est très inférieure à la constante de temps du condensateur ($L_f/R_{Lf} < R_{Cf}C_f$), on peut contrôler directement les tensions sans réguler les courants, par analogie avec une commande en vitesse de machine à courant continu sans régulation du courant d'induit (le correcteur de vitesse est alors de type PID). Les correcteurs $C_{ui}(s)$ doivent permettre un bon suivi de la consigne. La figure 3.5 montre le schéma bloc de la commande directe des tensions condensateurs.

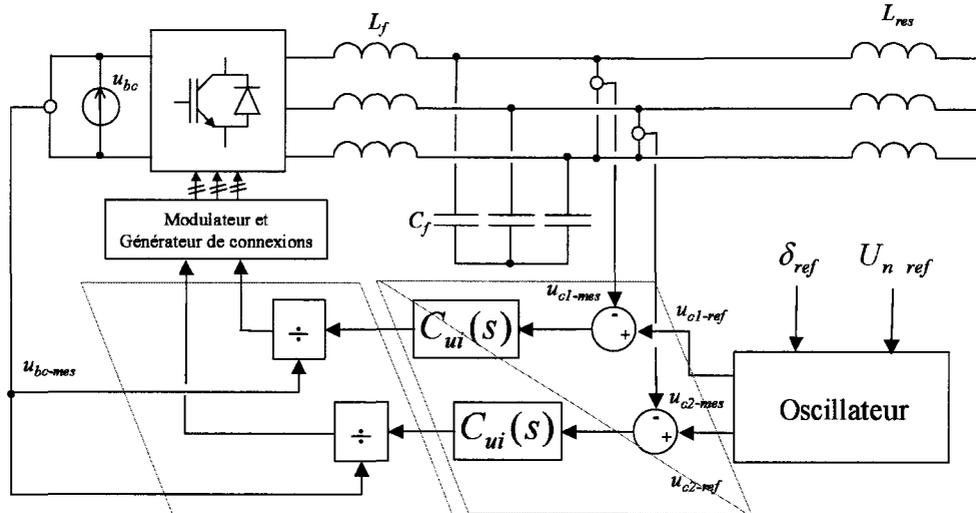


FIG. 3.5 – Structure de la commande coté réseau sans réguler les courants dans la bobine triphasée d'inductance L_f .

Les tensions de référence sont élaborées à partir de l'oscillateur de fréquence centrale 50 Hz ($\omega_0 = 100 \pi$) suivant :

$$\begin{aligned} u_{c1-ref} &= U_{n-ref} \sqrt{2} \sin(\omega_0 t - \frac{\pi}{6} + \delta_{ref}) \\ u_{c2-ref} &= U_{n-ref} \sqrt{2} \sin(\omega_0 t - \frac{\pi}{2} + \delta_{ref}) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Avec U_{n-ref} valeur efficace de la tension composée et δ_{ref} angle de déphasage pouvant servir à faire varier la fréquence.

3.3.2 Fonctionnement sur réseau passif

Principe

La stratégie de commande utilisée dans le cas d'un réseau passif reprends la stratégie de régulation des tensions aux bornes des condensateurs en fixant $\delta_{ref} = 0$ et $U_{n-ref} = 690$ V.

Nature du réseau passif

La figure 3.6 montre les deux types de charges triphasées considérées représentatives du réseau passif : une première charge résistive et inductive équilibrée puis une deuxième charge purement résistive mais déséquilibrée. Pour les modéliser, on tient compte uniquement de leurs puissances nominales active P_n et réactive Q_n sous tension nominale V_n et pulsation nominale ω_n .

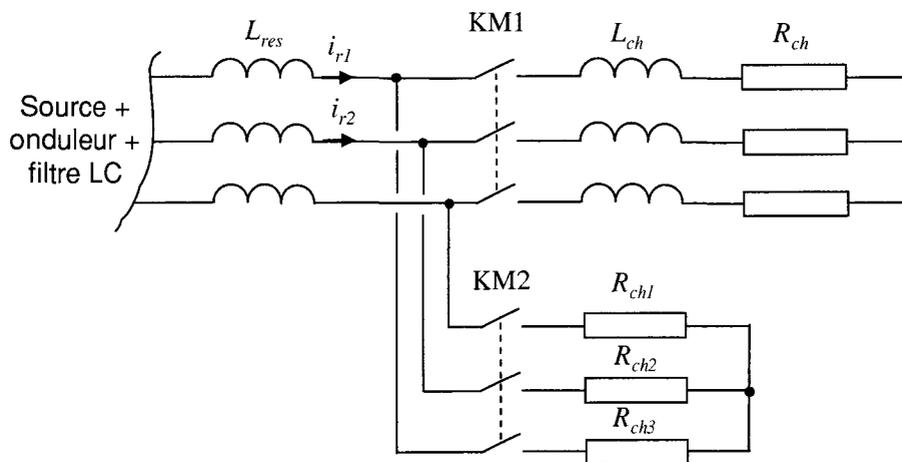
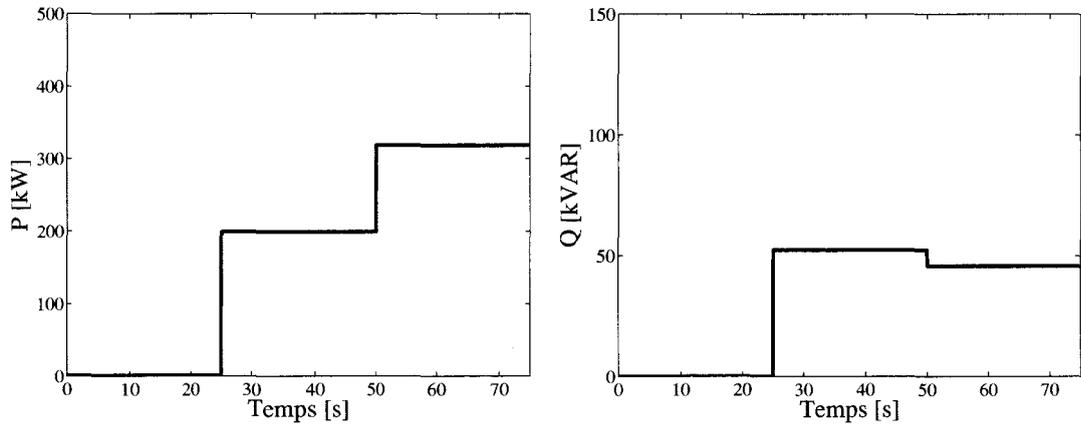


FIG. 3.6 – Nature du réseau passif.

Simulation

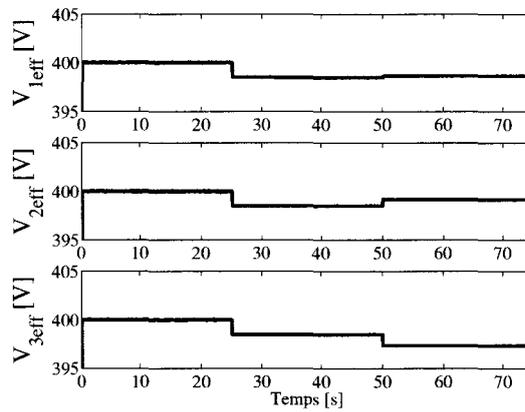
Les figures 3.7 et 3.8 montre un résultat de simulation dans le cas d'une commande directe (sans régulation des courants dans L_f). La simulation dure 75 secondes. A $t = 25$ s, une charge triphasée équilibrée résistive et inductive ($P = 200$ kW et $Q = 50$ kVAR) est connectée aux bornes de l'élément LCL. A $t = 50$ s, une charge triphasée déséquilibrée et purement résistive ($P_1 = 10$ kW, $P_2 = 60$ kW et $P_3 = 30$ kW) est connectée. Les figures 3.7(a) et 3.7(b) montrent les puissances active et réactive. La figure 3.7(c) montre les valeurs efficaces des tensions simples après l'inductance L_{res} , reconstituées à partir d'un neutre artificiel. La figure 3.8(a) montre les tensions régulées u_{c1} et u_{c2} aux bornes des condensateurs lors de l'enclenchement des deux charges. La figure 3.8(b) montre l'évolution des courants i_{r1} et i_{r2} appelés par les charges lors des enclenchements.

On constate que les tensions aux bornes des condensateurs sont bien régulées malgré les enclenchement brutaux, le coté inductif de la première charge et le déséquilibre de la deuxième. On constate cependant une chute de tension due à l'inductance L_{res} .



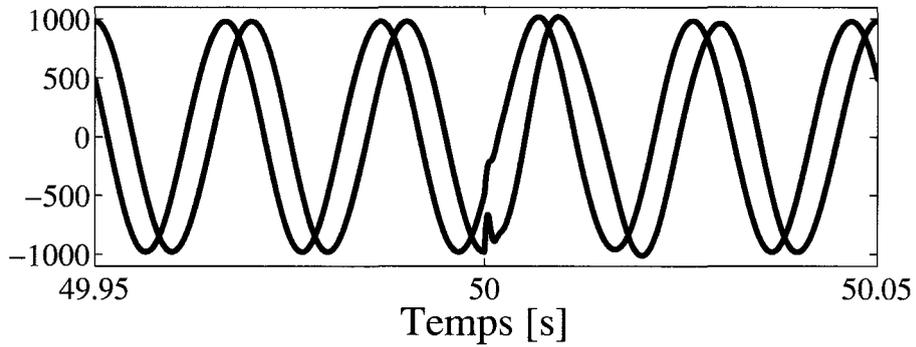
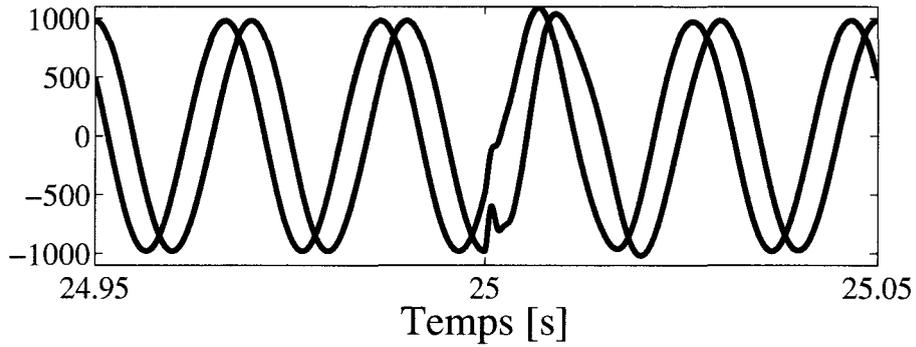
(a) Puissance active

(b) Puissance réactive

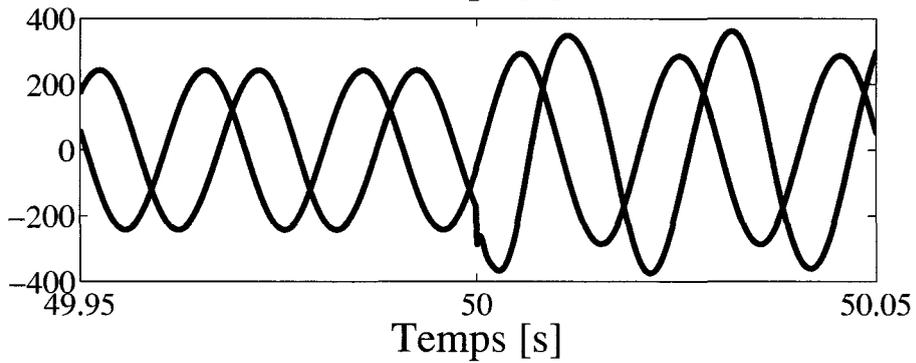
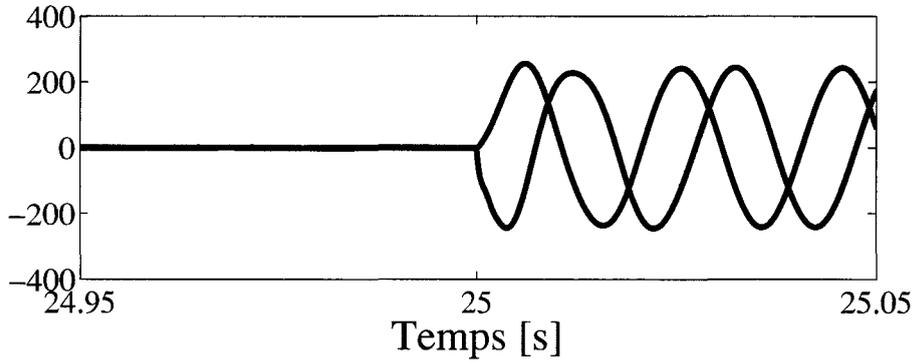


(c) Valeurs efficaces des tensions simples

FIG. 3.7 – Simulation d'un onduleur de tension triphasé fonctionnant en source de tension avec la commande directe sur un réseau passif : puissances active et réactive appelées par la charge et valeurs efficaces des tensions simples après l'inductance L_{res} .



(a) Tensions composées u_{c1} et u_{c2}



(b) Courants i_{r1} et i_{r2}

FIG. 3.8 – Simulation d'un onduleur de tension triphasé fonctionnant en source de tension avec la commande directe sur un réseau passif : tensions composées aux bornes des condensateurs et courants circulant dans L_{res} lors des deux enclenchements de charge.

3.3.3 Fonctionnement sur réseau actif

Principe

On rappelle que les tensions de référence des condensateurs sont déterminées par un oscillateur de fréquence centrale 50 Hz :

$$\begin{aligned} u_{c1-ref} &= U_{n-ref} \sqrt{2} \sin(\omega_0 t - \frac{\pi}{6} + \delta_{ref}) \\ u_{c2-ref} &= U_{n-ref} \sqrt{2} \sin(\omega_0 t - \frac{\pi}{2} + \delta_{ref}) \end{aligned} \quad (3.3)$$

On peut, dans un premier temps, garder la référence tension U_{n-ref} constante. Le principe d'injection de la puissance est élaboré à partir du transit de puissance dans une ligne essentiellement inductive : c'est le rôle de la deuxième inductance L_{res} du filtre LCL. On rappelle l'expression de la puissance transitant dans une inductance :

$$P_{transit} = \frac{3VV'}{L\omega} \sin \delta \quad (3.4)$$

V et V' sont les tensions de part et d'autre de l'inductance L , ω est la pulsation des grandeurs et δ le déphasage entre les tensions V et V' . On peut montrer suivant les valeurs de l'inductance qu'il suffit d'une faible variation de l'angle δ pour faire transiter une puissance donnée. On peut donc considérer que la puissance transitée est directement proportionnelle à cet angle. Pour des amplitudes de tension V et V' identiques, la puissance transitant dans l'inductance vaut :

$$P_{transit} \approx \frac{3V^2}{L\omega} \delta \quad (3.5)$$

Il faut donc agir sur la fréquence du signal de référence pour faire varier l'angle δ et donc la puissance transitée. On va donc s'inspirer de la caractéristique pulsation-puissance représentée à la figure 3.9, reproduisant ainsi le comportement d'un alternateur : un appel de puissance se traduira par une baisse de fréquence.

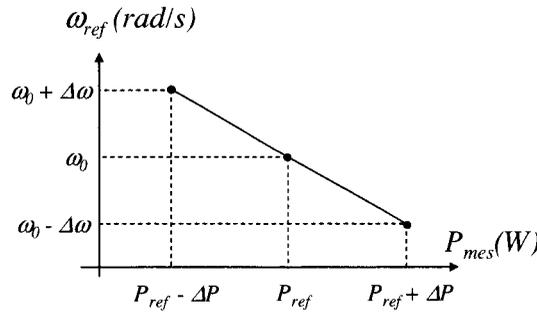


FIG. 3.9 – Caractéristique pulsation-puissance.

C'est donc en fonction des puissances mesurée (P_{mes}) et de référence (P_{ref}) que l'on détermine la fréquence de référence :

$$\omega_{ref} = \frac{\Delta\omega}{\Delta P} (P_{ref} - P_{mes}) + \omega_0 \quad (3.6)$$

Avec :

- ω_0 , pulsation centrale de l'oscillateur,
- $\frac{\Delta\omega}{\Delta P} = 2\pi \frac{\Delta f}{\Delta P} = 2\pi k$, pente de la caractéristique pulsation-puissance.

La puissance de transit peut donc être contrôlée par un correcteur proportionnel car l'écart de fréquence est liée à l'angle par un intégrateur pur. La figure 3.10 montre le principe du calcul de l'angle de référence sous forme de schéma bloc. La présence d'un filtre passe-bas est justifiée pour l'atténuation des composantes à 2ω dues à un éventuel déséquilibre en triphasé ou à fonctionnement monophasé car la puissance mesurée est instantanée.

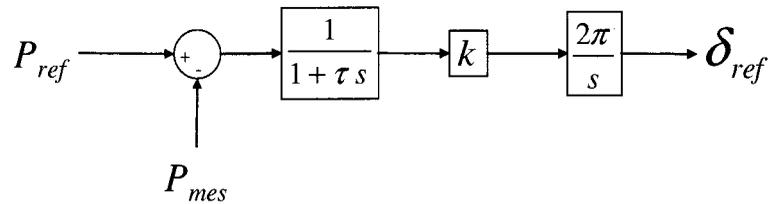


FIG. 3.10 – Principe du calcul de l'angle de référence.

La figure 3.11 montre la structure de la commande complète dans le cas d'un fonctionnement d'un réseau actif.

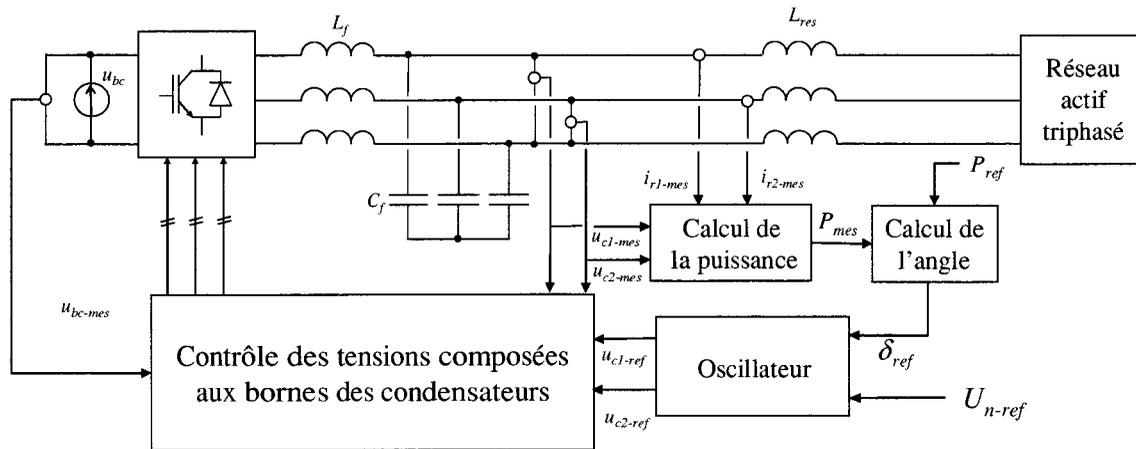


FIG. 3.11 – Schéma bloc du contrôle de l'onduleur en puissance lors d'un fonctionnement sur un réseau actif.

Réglage

Pour déterminer la dynamique de la boucle de réglage de la puissance de transit, il faut boucler le système représenté à la figure 3.10. En utilisant la relation 3.5, on peut boucler le système comme représenté à la figure 3.12. Le fait d'avoir placé le filtre passe-bas après le sommateur élimine le zéro introduit par ce dernier s'il aurait été placé uniquement dans le retour de la mesure. On retrouve alors un schéma bloc dual à celui d'une boucle à verrouillage de phase [23]. La présence du filtre ne permet pas de régler le temps de réponse qui est alors fonction de la bande passante choisie pour le filtrage.

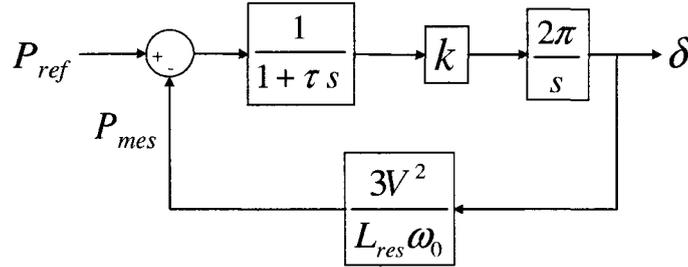


FIG. 3.12 – Schéma bloc du contrôle de la puissance, déterminant l'angle de déphasage.

La fonction de transfert en boucle fermée du système est :

$$H_{bf}(s) = \frac{P_{mes}}{P_{ref}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{L_{res}\omega_0}{3V^2 2\pi k}\right)s + \left(\frac{L_{res}\omega_0\tau}{3V^2 2\pi k}\right)s^2} \quad (3.7)$$

La figure 3.13 montre la réponse du système à un échelon lorsque le temps de réponse est fixé à 5 s pour un amortissement $\xi = 1$. Ces valeurs correspondent à $\tau = 0,5$ s et $k = 8,33 \cdot 10^{-8}$ Hz/W. L'ordre de grandeur du coefficient k dépend de la valeur de l'inductance L_{res} qui vaut 0,1 mH, donc de la puissance maximum transmissible (pour $\sin \delta = 1$).

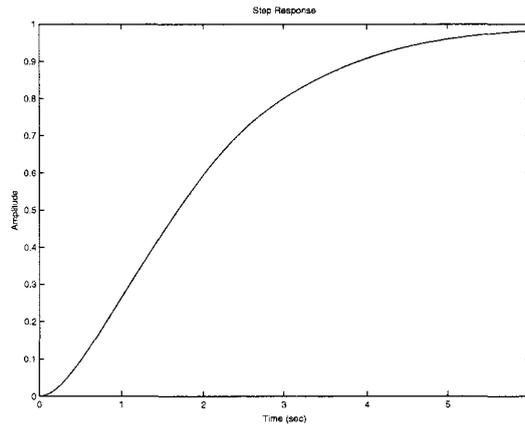


FIG. 3.13 – Réponse du système $H_{bf}(s)$ à un échelon.

Simulation

La figure 3.14 montre les résultats de simulation sur 10 secondes. U_{n-ref} est fixé à 690 V et P_{ref} à 100 kW pour un réseau actif composé d'une source de tension triphasée parfaite. Les paramètres de la boucle de régulation de puissance déterminant l'angle de déphasage de référence à appliquer sont identiques ($\xi = 1$ et $tr = 5$ s.). La valeur de l'inductance L_{res} est de 0,1 mH. La figure 3.14(a) montre l'évolution de la puissance active transitant dans l'inductance L_{res} . La puissance est fidèle au calcul de la boucle de régulation et le résultat est similaire à la figure 3.13. La figure 3.14(b) montre l'évolution de l'angle de déphasage de référence en degré entre les tensions régulées aux bornes des condensateurs et les tensions du réseau actif. On constate que l'angle se stabilise vers la fin du régime transitoire et que les valeurs sont très faibles. La figure 3.14(c) montre l'écart de fréquence entre l'onduleur et le réseau actif. La différence de fréquence durant le régime transitoire est représentative de l'accélération des tensions régulées par l'onduleur pour créer le déphasage souhaité.

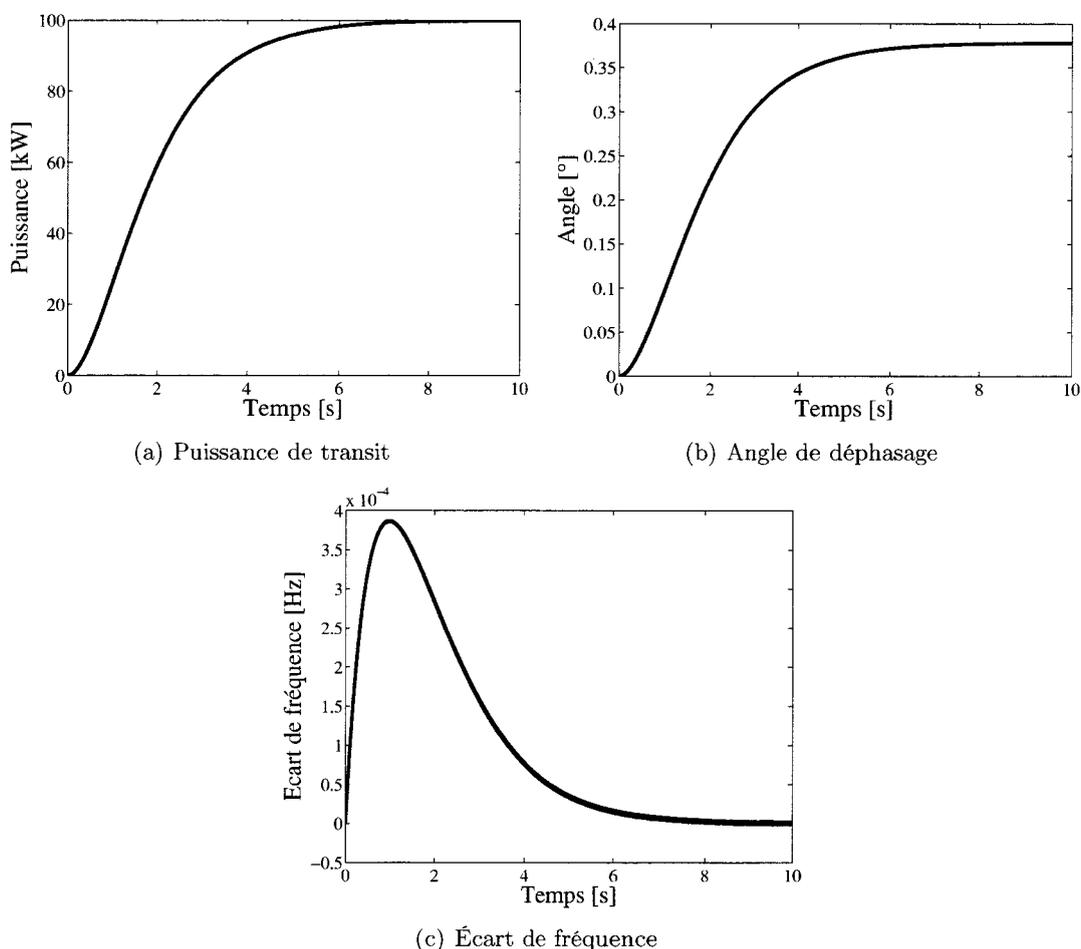


FIG. 3.14 – Simulation d'un onduleur de tension triphasé fonctionnant en source de tension avec la commande directe sur un réseau actif : puissance transitant dans L_{res} , angle de déphasage de référence δ_{ref} et l'écart de fréquence entre l'onduleur et le réseau actif pour une puissance de référence de 100 kW.

3.3.4 Connexion en parallèle

L'interconnexion de plusieurs onduleurs en parallèle fonctionnant en source de tension et se répartissant la charge est possible en imitant le comportement des alternateurs [14], [3], [6], [54]. Cette section de chapitre porte son intérêt dans le cadre du raccordement de plusieurs éoliennes (on parlera alors de ferme éolienne), mais aussi dans l'interconnexion de fermes éoliennes. La commande de l'onduleur est la même que dans le cas d'un fonctionnement sur un réseau actif. La structure de la commande est donc celle représentée à la figure 3.11.

Deux onduleurs, une charge

On s'intéresse ici au cas d'une charge alimentée par deux onduleurs en parallèle comme représenté à la figure 3.15. La stratégie de commande développée pour la connexion au réseau permet une répartition de la charge entre les deux onduleurs.

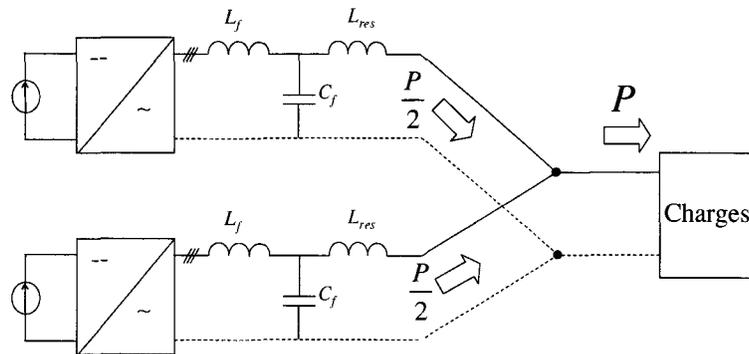


FIG. 3.15 – Connexion de deux onduleurs pour alimenter une charge

La figure 3.16 montre les résultats de simulation dans le cas d'une charge de 200 kW, 50 kVAR. Le temps de la simulation est de 100 secondes et un des deux onduleurs est déconnecté à $t = 50$ s. La figure 3.16(a) montre les puissances actives fournies par les onduleurs. On constate bien une répartition de la charge puisque les deux onduleurs fournissent chacun 100 kW soit la moitié de la puissance de la charge. La figure 3.16(b) montre que la puissance réactive est également répartie sur les deux onduleurs. La figure 3.16(c) montre les fréquences des tensions régulées aux bornes des condensateurs de chaque élément LCL. La fréquence, légèrement différente du 50 Hz, est identique pour les deux onduleurs jusqu'à ce que l'un d'eux se déconnecte. La figure 3.16(d) montre la valeur efficace de la tension simple après l'inductance L_{res} .

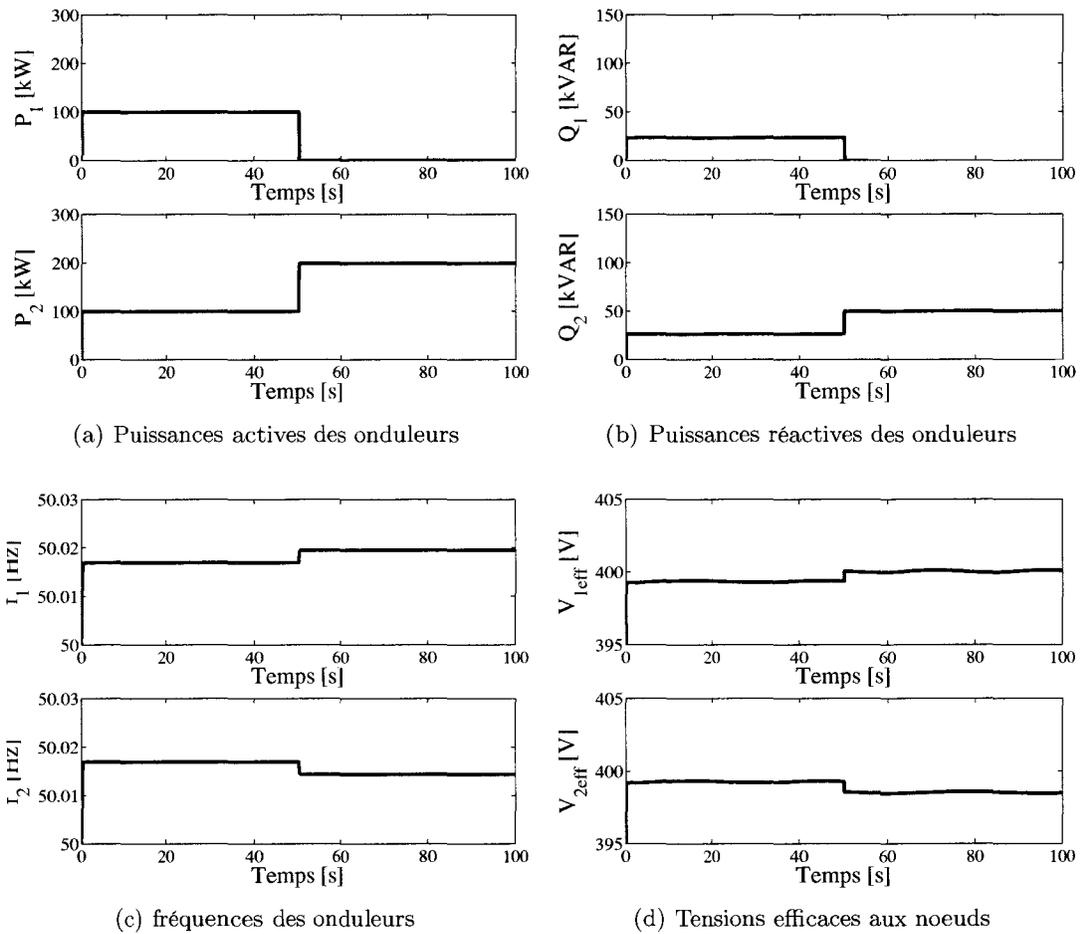


FIG. 3.16 – Simulation de deux onduleurs en parallèle alimentant une charge : puissances active et réactive fournies, fréquences et valeurs efficaces des tensions simples pour chaque onduleur.

Deux onduleurs interconnectés

On s'intéresse ici à deux onduleurs alimentant chacun des charges et interconnectés par un ligne électrique comme représenté à la figure 3.17. Le but est de montrer un échange d'énergie entre les deux onduleurs via la ligne électrique afin de répartir la puissance de la charge sur chaque onduleur.

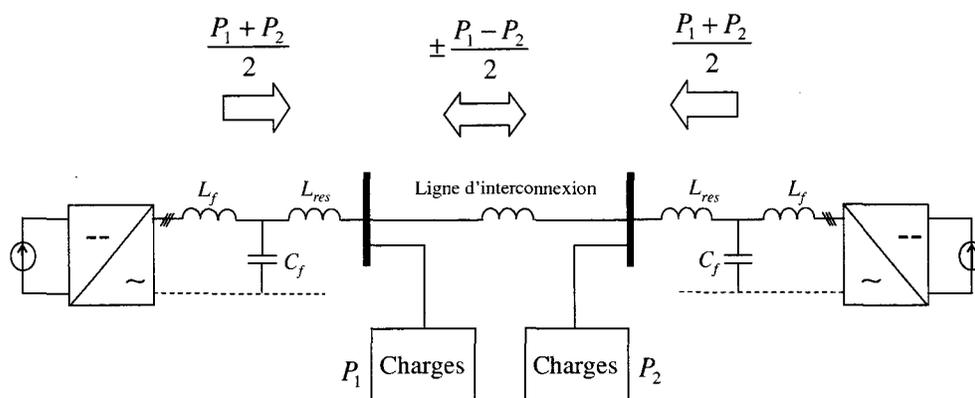


FIG. 3.17 – Connexion de deux onduleurs pour alimenter une charge

Simulation sans compensation de la chute de tension dans L_{res}

La figure 3.18 montre les résultats de simulation sur 100 secondes. Les deux onduleurs se répartissent la charge ($P_2 = 100$ kW) durant 50 secondes puis à $t = 50$ s, une deuxième charge est connectée ($P_1 = 200$ kW). La puissance totale de la charge étant de 300 kW, les deux onduleurs se la partagent équitablement à hauteur de 150 kW suivant un temps de réponse lié à la constante de temps τ du filtre passe-bas. Cette lenteur est volontaire pour montrer les écarts de fréquence (voir la figure 3.18(c)) entre les deux onduleurs durant le régime transitoire.

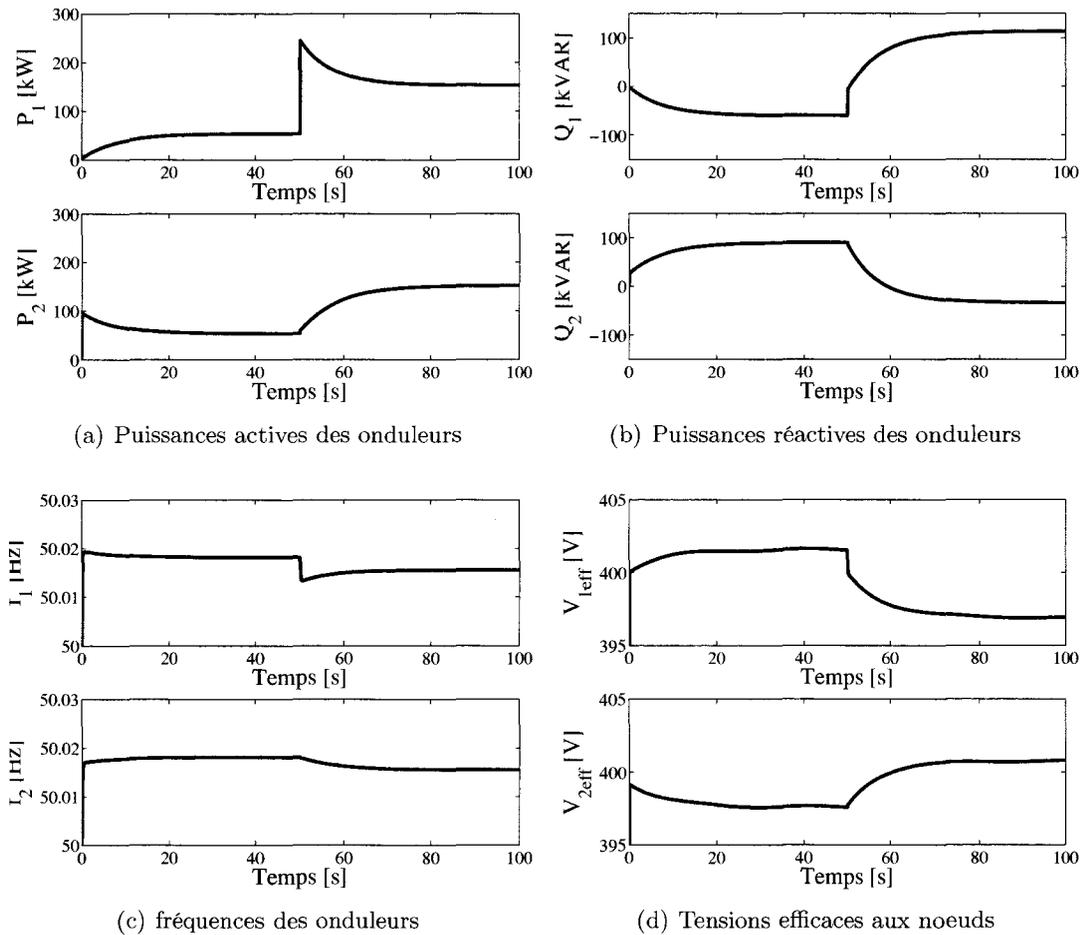


FIG. 3.18 – Simulation de deux onduleurs connectés via une ligne sans compensation de la chute de tension : puissances active et réactive fournies, fréquences et valeurs efficaces des tensions simples pour chaque onduleur.

Simulation avec compensation de la chute de tension dans L_{res}

On rappelle l'expression de la puissance réactive transiting dans une inductance L :

$$Q = \frac{3V'(V \cos \delta - V')}{L\omega} \quad (3.8)$$

Pour de faibles variations de l'angle δ , cette expression devient :

$$Q \approx \frac{3V'}{L\omega}(V - V') \quad (3.9)$$

On peut alors compenser la chute de tension dans la bobine L_{res} via l'expression suivante :

$$U_{n-ref} = U_0 + \frac{L_{res}\omega_0}{U_0} Q_{mes} \quad (3.10)$$

La figure 3.19 montre les résultats de simulation avec cet algorithme. La tension efficace reste alors très proche des 400 V aux bornes de la charge.

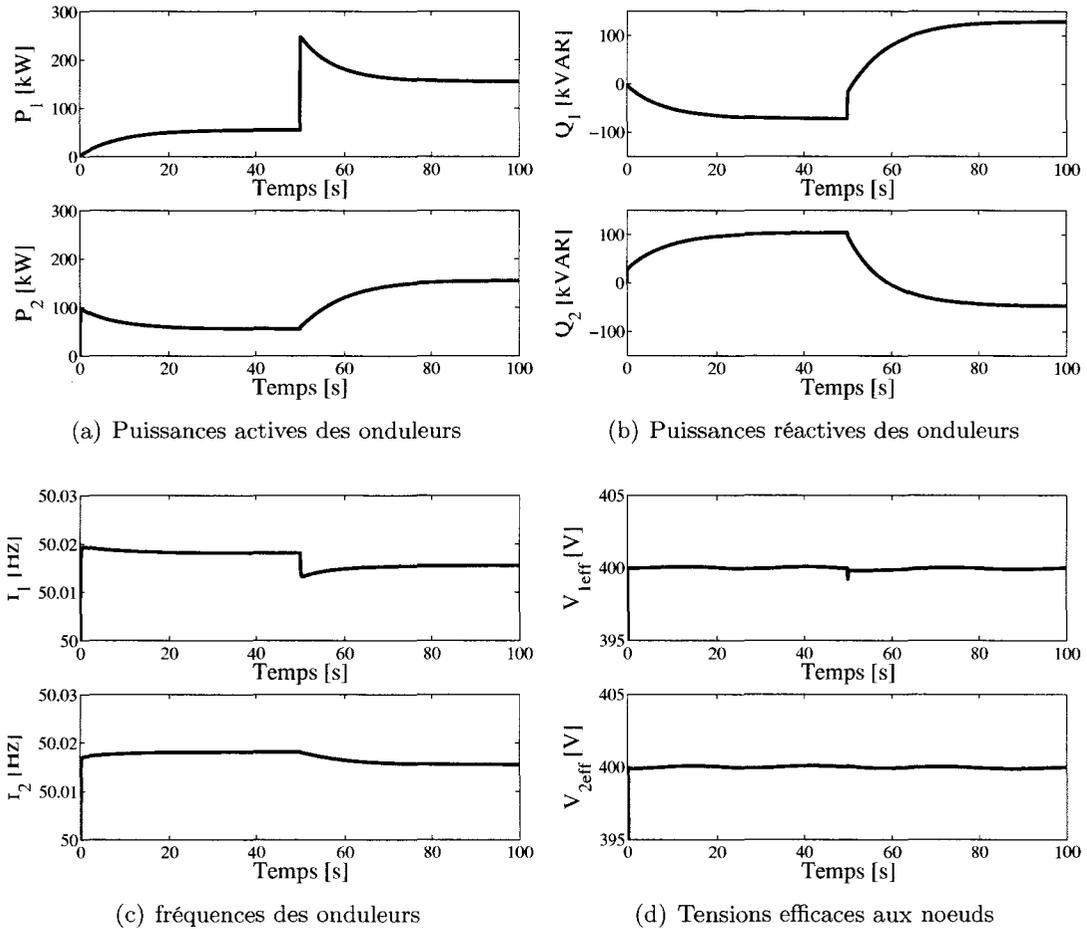


FIG. 3.19 – Simulation de deux onduleurs connectés via une ligne avec compensation de la chute de tension : puissances active et réactive fournies, fréquences et valeurs efficaces des tensions simples pour chaque onduleur.

Analogie avec un alternateur

La figure 3.20 représente un alternateur sur lequel la réactance synchrone X serait analogue la réactance $L_{res}\omega$ et la f.e.m. E à la tension régulée aux bornes des condensateurs du filtre LCL.

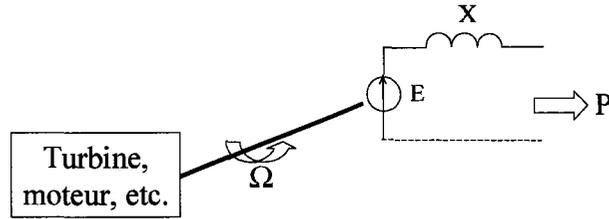


FIG. 3.20 – Analogie avec un alternateur.

La vitesse de rotation, donc la fréquence, baisse lorsque l'on charge électriquement un alternateur. Les alternateurs interconnectés disposent d'un régulateur de vitesse de type proportionnel qui détermine la puissance de référence des turbines d'entraînement. Un tel régulateur est représenté à la figure 3.21(a). La caractéristique puissance-fréquence du régulateur de vitesse est montrée à la figure 3.21(b).

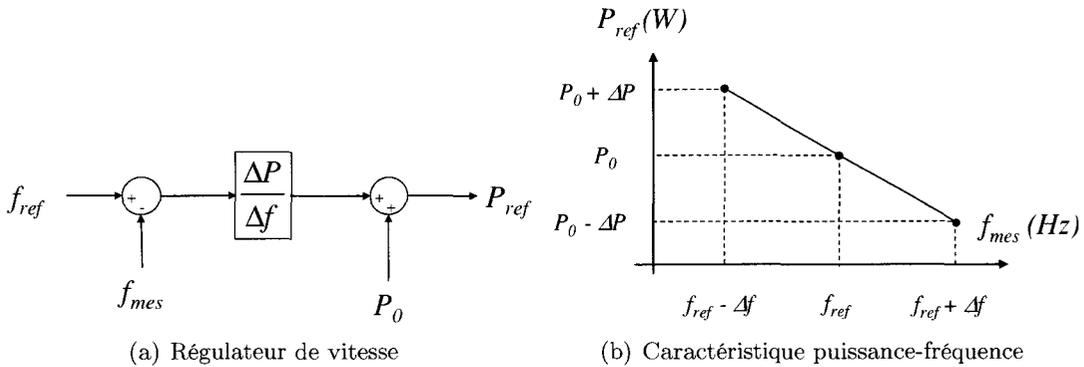


FIG. 3.21 – Structure d'un régulateur de vitesse d'un alternateur interconnecté et caractéristique puissance-fréquence du régulateur de vitesse.

Le régulateur de vitesse, de part son ordre, va introduire une erreur statique : c'est le réglage primaire. Le rôle du réglage primaire est d'une part de remonter la fréquence et d'autre part de permettre une répartition de la charge sur tous les alternateurs connectés au réseau [3]. Pour revenir à la fréquence nominale, il suffit d'ajuster la puissance P_0 à la puissance consommée par la charge : c'est le réglage secondaire.

Le fonctionnement de l'onduleur (fonctionnement en source de tension) tel qu'il a été développé est similaire à celui d'un alternateur disposant d'un régulateur de vitesse permettant un réglage primaire et secondaire.

3.4 Fonctionnement en source de courant sur réseau actif

3.4.1 Structure de la commande

Dans le cas d'une connection à un réseau actif, l'onduleur peut se "caler" sur ce dernier en adoptant une stratégie de commande en source de courant. La figure 3.22 montre la structure de la commande maximale pour la régulation dans L_f .

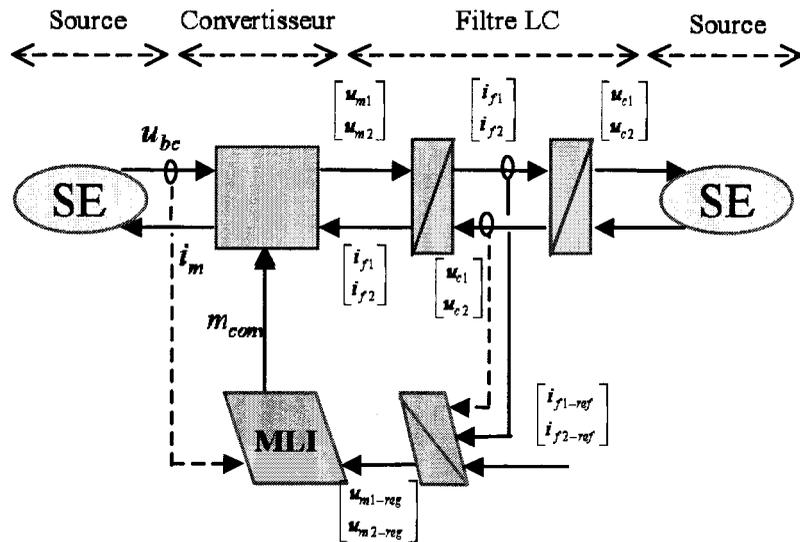


FIG. 3.22 – Structure de la commande maximale pour la régulation du courant dans L_f .

A partir de la figure 3.22, on déduit le schéma bloc de la commande comme représenté à la figure 3.23. Les correcteurs $C(s)$ doivent permettre une bonne régulation des courants.

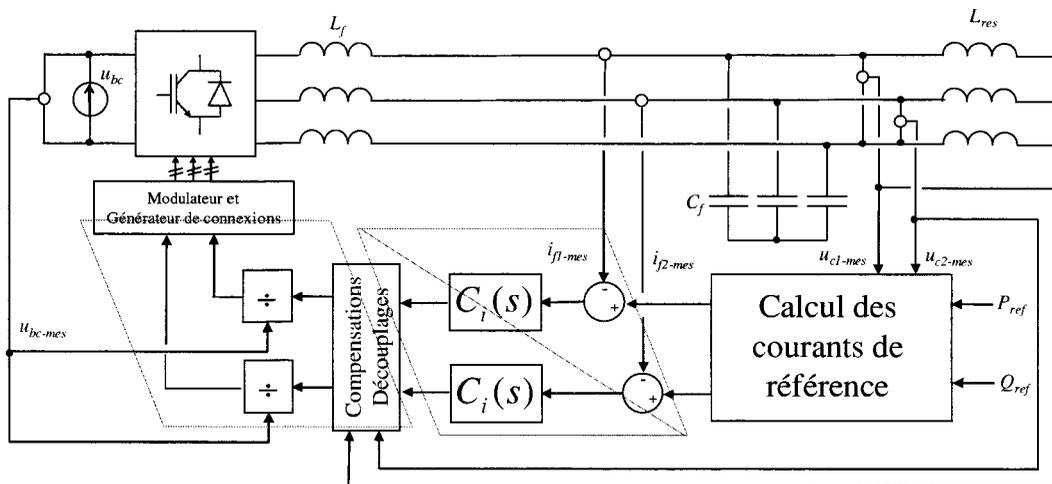


FIG. 3.23 – Structure de la commande coté réseau en source de courant.

3.4.2 Contrôle des puissances active et réactive

Les puissances instantanées active p et réactive q s'écrivent [50] [36] :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{c1} & u_{c2} \\ \frac{2u_{c2}-u_{c1}}{\sqrt{3}} & \frac{u_{c2}-2u_{c1}}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f1} \\ i_{f2} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

L'inversion de l'équation 3.11 pour l'élaboration des courants de référence implique une inversion de matrice de déterminant :

$$\det = \frac{2(u_{c1}u_{c2} - u_{c1}^2 - u_{c2}^2)}{\sqrt{3}} \quad (3.12)$$

Le déterminant ainsi calculé pose problème de discontinuité en cas de déséquilibre. Pour les tensions composées u_{c1} et u_{c2} de valeur efficace U_{eff} égale du type :

$$\begin{aligned} u_{c1} &= U_{eff}\sqrt{2}\sin(\omega t - \frac{\pi}{6}) \\ u_{c2} &= U_{eff}\sqrt{2}\sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \end{aligned} \quad (3.13)$$

Les courants de référence sont alors élaborés suivant l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} i_{f1-ref} \\ i_{f2-ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{3U_{eff}^2} \begin{bmatrix} 2u_{c1} - u_{c2} & \sqrt{3}u_{c2} \\ 2u_{c2} - u_{c1} & -\sqrt{3}u_{c1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{ref} \\ Q_{ref} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Il sera utile à l'avenir de tester la validité de cette équation en cas de déséquilibre (valeur efficace des tensions différentes) et d'en voir l'impact sur le renvoi de puissance.

3.4.3 Simulation avec référence puissance réactive nulle

La figure 3.24 montre les résultats de simulation pour une puissance réactive de référence nulle. La figure 3.24(a) montre les puissances actives de référence et mesurée. La figure 3.24(b) montre les puissances réactives de référence et mesurées. La figure 3.24(c) montre la valeur efficace de la tension composée aux bornes des condensateurs.

Initialement, l'onduleur est connecté synchrone au réseau et il ne débite ou consomme aucune puissance. La puissance active de référence est une rampe jusque 500 kW et la puissance réactive de référence est maintenue nulle. les consignes sont parfaitement suivies. Cependant, la tension aux bornes des condensateurs monte en fonction de la puissance active renvoyée et dépasse alors les 700 V. Il serait alors intéressant de déterminer une référence pour la puissance réactive afin de garder un niveau de tension correct.

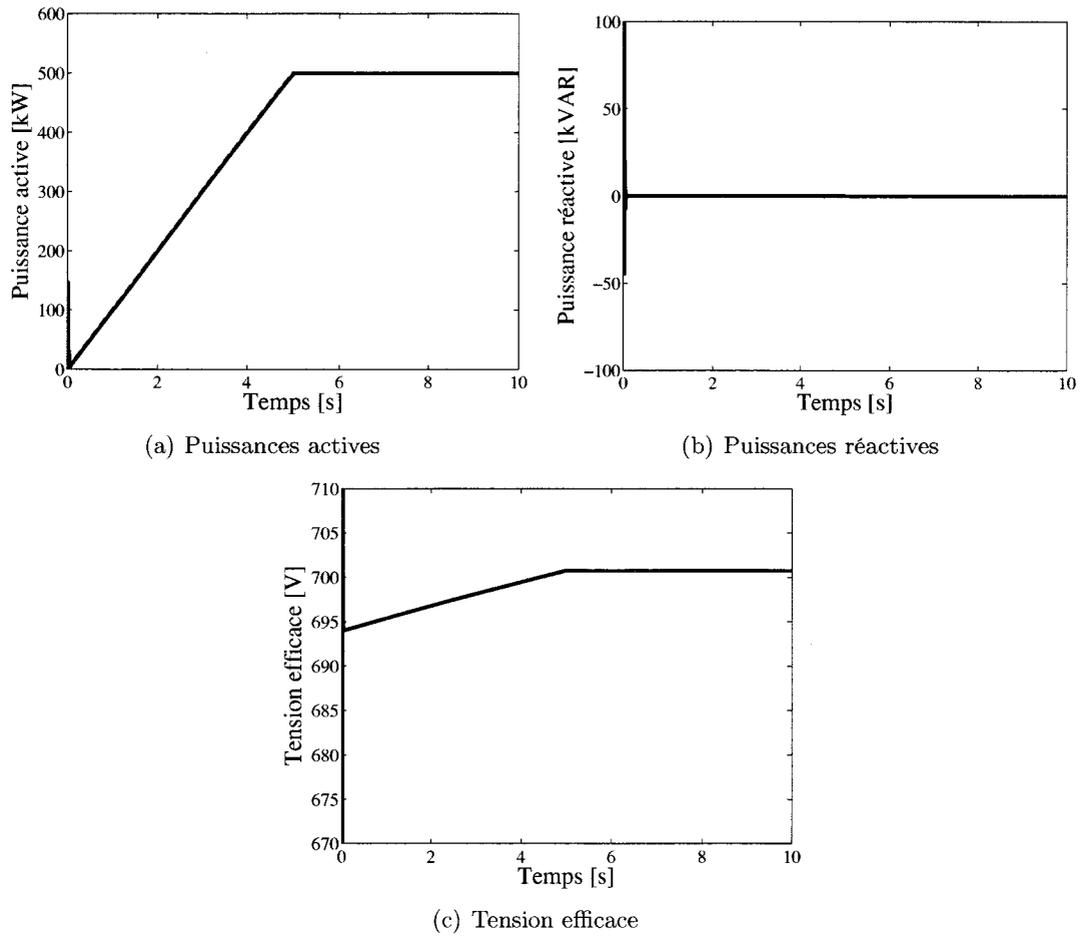


FIG. 3.24 – Simulation d’un onduleur de tension fonctionnant en source de courant et connecté à un réseau actif : puissances active et réactives renvoyées par l’onduleur et tension efficace aux bornes des condensateurs pour une puissance réactive de référence nulle.

3.4.4 Simulation avec référence puissance réactive déterminée

La figure 3.25 représente une analogie avec l'élément LCL. Deux conduites de section différentes sont reliées par un réservoir de section S . On comprend alors aisément que pour $S_2 \ll S_1$, un échelon de débit supplémentaire sur q_1 entraînera une augmentation de la hauteur h du réservoir jusqu'à un nouveau point d'équilibre.

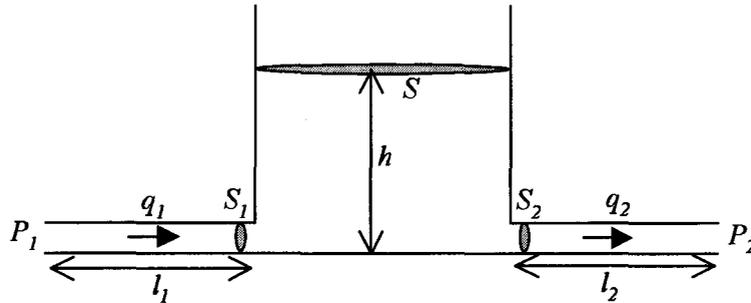


FIG. 3.25 – Analogie hydraulique de l'élément LCL.

La figure 3.26 montre les résultats de simulation pour une puissance réactive de référence nulle. La figure 3.26(a) montre les puissances actives de référence et mesurée. La figure 3.26(b) montre les puissances réactives de référence et mesurée. La figure 3.26(c) montre la valeur efficace de la tension composée aux bornes des condensateurs.

La référence de la puissance active reste la même par rapport à la précédente simulation. La puissance réactive est déterminée en fonction de la valeur efficace de la tension sur seuils. L'onduleur va alors consommer de la puissance réactive si la valeur efficace de la tension est supérieure à 692 V et inversement l'onduleur va fournir au réseau de la puissance réactive si la tension est inférieure à 688 V. On constate alors que la tension reste proche des 690 V grâce à cet algorithme.

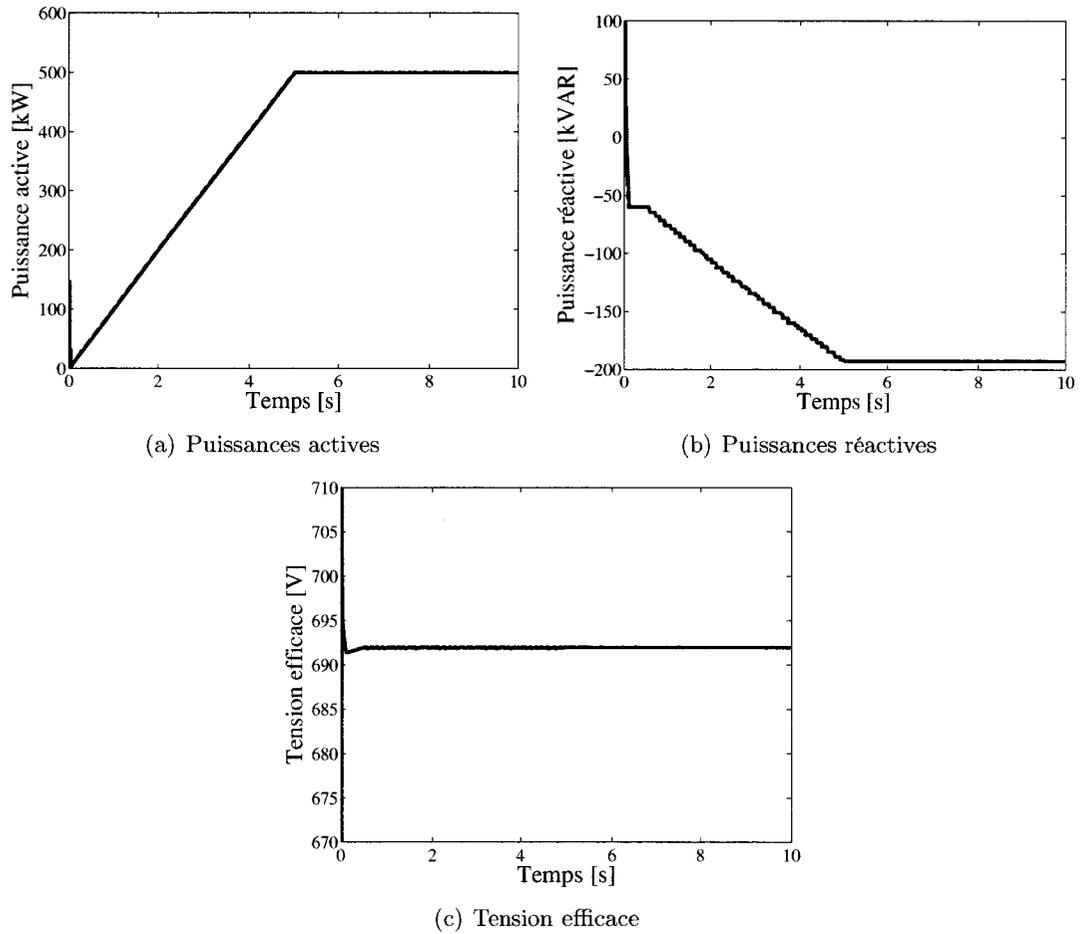


FIG. 3.26 – Simulation d'un onduleur de tension fonctionnant en source de courant et connecté à un réseau actif : puissances active et réactives renvoyées par l'onduleur et tension efficace aux bornes des condensateurs pour une puissance réactive de référence déterminée.

3.5 Conclusion

Il a été vu dans ce chapitre une structure de raccordement d'un onduleur de tension sur base d'un élément LCL. Les stratégies de commande développées ont montré que l'onduleur pouvait créer soit une source de tension soit une source de courant. Il apparaît que le fonctionnement en source de courant est idéal pour un raccordement à un réseau puissant et que le fonctionnement en source de tension est idéal pour l'alimentation de charges isolées. Cependant, nous avons vu qu'il était possible d'utiliser le fonctionnement en source de tension sur un réseau puissant et même de coupler plusieurs onduleurs en parallèle afin qu'ils se répartissent la charge. Ce dernier point semble important pour répondre à l'objectif services systèmes.

Conclusion de la première partie

L'objectif de cette première partie était de présenter la modélisation et les stratégies de commande développées dans le cadre de trois systèmes électrotechniques sur base d'électronique de puissance qui ont fait chacun l'objet d'un chapitre :

- Le premier chapitre a traité du générateur éolien. Le modèle de la turbine utilisé a été présenté après un bref état de l'art de l'énergie éolienne. Les résultats obtenus ont été comparés avec les mesures d'une éolienne à vitesse fixe située sur le site de Dunkerque dans le nord de la France. Le modèle de la turbine a ensuite été utilisé pour la chaîne de conversion d'une éolienne à vitesse variable et une stratégie de commande a été présentée.
- Le deuxième chapitre a traité du système de stockage inertiel avec machine asynchrone, d'abord en utilisant l'inertie de la turbine et en ajoutant un volant si besoin puis en considérant uniquement un volant pour une question de réalisation technique. Les stratégies de commande qui ont été développées ont montré la faisabilité d'un tel système de stockage et l'intérêt qu'il apporterait pour une association avec une éolienne.
- Le troisième chapitre a traité de la connexion au réseau triphasé d'un onduleur de tension via un élément LCL. Le réseau considéré a été susceptible d'être actif ou passif. Deux stratégies de commande ont été distinguées, l'une permettant de fonctionner en source de courant et l'autre en source de tension.

La manière dont fonctionne ces trois systèmes sera utile pour déterminer un dispositif permettant de faciliter l'intégration au réseau d'éoliennes existantes ou pour l'élaboration d'un système de génération autonome d'énergie pouvant répondre à l'objectif services systèmes. Mais comment assembler ces systèmes et comment créer la source de tension continue qui a été considérée comme parfaite jusque maintenant ? Quelles seront les stratégies de commande à mettre en oeuvre ? La deuxième partie de ce mémoire réponds à ces questions.

Deuxième partie

Améliorer l'intégration d'éoliennes dans
un réseau actif et assurer des services
systèmes

Introduction de la deuxième partie

Le premier chapitre traite des différentes associations possibles entre les systèmes développés dans la première partie. On verra que la création d'une source de tension continue à son importance et qu'elle ne peut pas être créée par n'importe quel système. C'est dans ce chapitre qu'est proposé une REM de niveau hiérarchique supérieur afin de formaliser la création d'une source de tension continue via ces systèmes. La finalité de ce chapitre est de proposer dans un premier temps un système permettant d'améliorer l'intégration d'éoliennes dans un réseau actif et dans un deuxième temps de proposer un système de génération autonome susceptible de participer à la gestion du réseau.

Le deuxième chapitre traite donc d'un système de stockage inertiel utilisé pour lisser une puissance fluctuante qu'elle soit positive ou négative. Autrement dit, le système de stockage sera capable de lisser la puissance d'une charge variable ou encore la puissance fluctuante d'une source à énergie renouvelable. L'exemple d'application montrera le lissage de la puissance d'une éolienne à vitesse fixe. La stratégie de commande développée lors de mon stage de DEA [29] permet alors de tenir compte dans le même temps du niveau du stockage et évite ainsi une saturation du système. Aussi, cette stratégie de commande permet de ré-équilibrer une charge éventuellement déséquilibrée, reformant de ce fait un système triphasé équilibré. Enfin, cette stratégie de commande appliquée au stockage de type inertiel mécanique par masse tournante peut être adapté à d'autres formes de stockage puisque l'ensemble a été généralisé.

Le troisième et dernier chapitre de cette deuxième partie présente un système de génération autonome d'énergie susceptible de participer à la gestion du réseau. Ce système, appelé également source, est capable d'alimenter des charges isolées et constitue donc une étape pour répondre aux objectifs services systèmes définis pour la thèse. L'interconnexion de plusieurs de ces sources apporte un gain en terme de sécurité d'alimentation et permet une meilleure gestion du niveau de stockage grâce à la répartition de la charge. Il se posera alors la question de la centralisation de telles sources, qui sont naturellement décentralisées, ceci pour une meilleur gestion des flux d'énergie.

Chapitre 4

Couplages

4.1 Introduction

Ce chapitre a pour but de déterminer des chaînes de conversion d'énergie qui seraient susceptibles, pour l'une, d'améliorer l'intégration des éoliennes au sein d'un réseau actif et, pour l'autre, de participer à la gestion du réseau voir d'assurer les services systèmes. Aussi, un formalisme REM de niveau hiérarchique supérieur est présenté pour représenter la régulation de la tension aux bornes d'un condensateur du point de vue énergétique d'une part et d'assurer le transit de puissance entre les différents systèmes couplés d'autre part.

4.2 Les systèmes étudiés dans la première partie

Il a été montré dans la première partie de ce travail que les systèmes développés peuvent être commandés en puissance sous certaines conditions et aux pertes près. Ces systèmes, au nombre de 5, sont représentés à la figure 4.1. On retrouve dans l'ordre :

- l'éolienne à vitesse variable représentée à la figure 4.1(a). La stratégie de commande développée permet un suivi de consigne en puissance tant que le vent le permet. Dans le cas où la consigne en puissance ne peut être suivie, la commande bascule sur un fonctionnement à puissance maximale optimisant alors le rendement de la turbine.
- le système de stockage inertiel représenté à la figure 4.1(b). La stratégie de commande développée permet de suivre une consigne en puissance dans la plage prévue. La puissance de référence devra être élaborée de sorte à maintenir la variable de flux (ici la vitesse de rotation) dans la plage définie afin d'éviter une saturation du système de stockage.
- le stockage inertiel avec turbine éolienne représenté à la figure 4.1(c). La stratégie de commande développée permet de suivre une consigne en puissance dans la plage prévue à cet effet. La puissance de référence devra être élaborée de sorte à maintenir la variable de flux (ici la vitesse de rotation) dans la plage définie. L'intérêt de l'association avec une turbine éolienne est qu'elle permet une recharge d'énergie "gratuite" quasi permanente.
- l'onduleur de tension raccordé à un réseau triphasé fonctionnant en source de tension représenté à la figure 4.1(d). La stratégie de commande développée permet de suivre une consigne en puissance tant que l'onduleur est raccordé à réseau actif capable d'absorber la puissance excédentaire. Dans le cas d'une connexion sur un réseau passif, la consigne ne peut être suivie car la puissance est imposée par la charge.
- l'onduleur de tension raccordé à un réseau triphasé fonctionnant en source de courant représenté à la figure 4.1(e). La stratégie de commande développée permet de suivre une

consigne en puissance. Ce fonctionnement n'est envisagé que pour un raccordement de l'onduleur de tension sur un réseau actif.

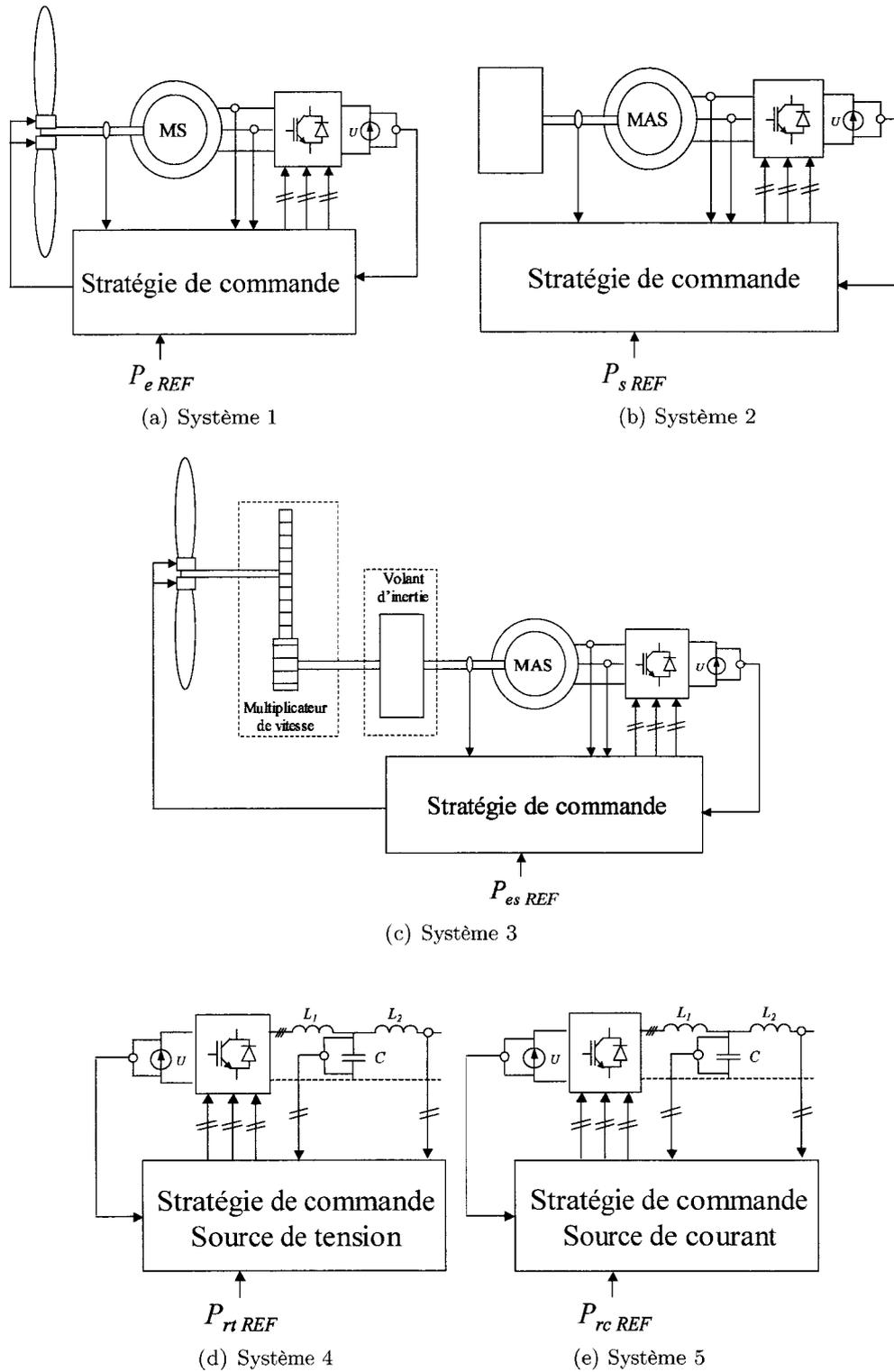


FIG. 4.1 – Systèmes commandables en puissance.

4.3 Niveau hiérarchique supérieur du formalisme REM

Chacun des systèmes représentés à la figure 4.1 peut être représenté par un graphe montrant le transit de la puissance et les niveaux énergétiques. On prend l'exemple de l'éolienne à vitesse variable raccordée de manière classique à un réseau actif, représentée par les systèmes 1 et 5 comme le montre la figure 4.2 : Le convertisseur du système 1 contrôle la puissance de l'éolienne et le convertisseur du système 5 contrôle la puissance coté réseau électrique.

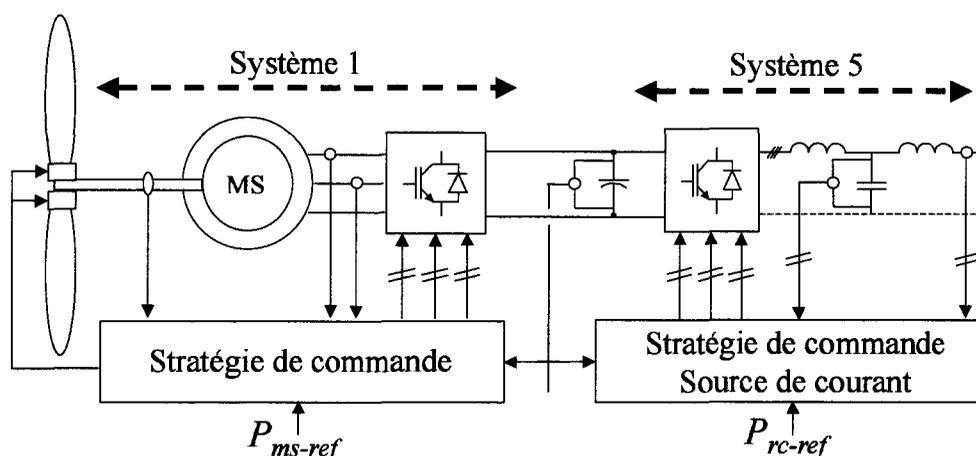


FIG. 4.2 – Éolienne à vitesse variable.

Une REM de l'ensemble a permis de déterminer la structure de la commande maximale comme représenté à la figure 4.3 permettant de contrôler d'une part le couple électromagnétique de la machine synchrone et d'autre part les courants injectés au réseau.

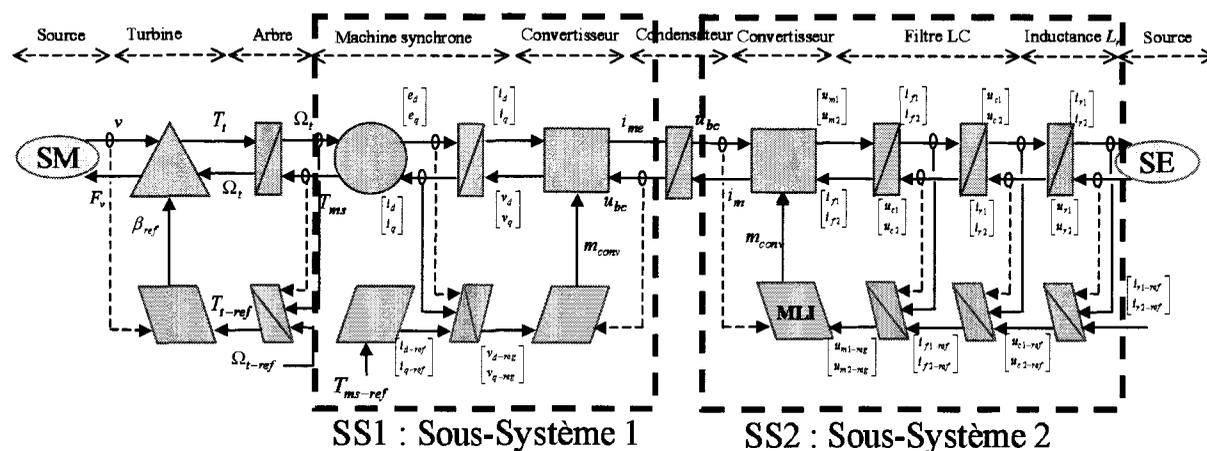


FIG. 4.3 – REM de l'éolienne à vitesse variable.

Ce schéma peut être représenté de manière simplifiée en créant des "sous-systèmes" comprenant le modèle et sa commande comme le montre la figure 4.4. Il est alors possible de contrôler la puissance par mesure du flux ou de l'effort associé à la grandeur contrôlée (mesure de la vitesse de rotation pour le contrôle du couple électromagnétique de la machine synchrone et mesure des tensions réseau pour le contrôle des courants renvoyés au réseau).

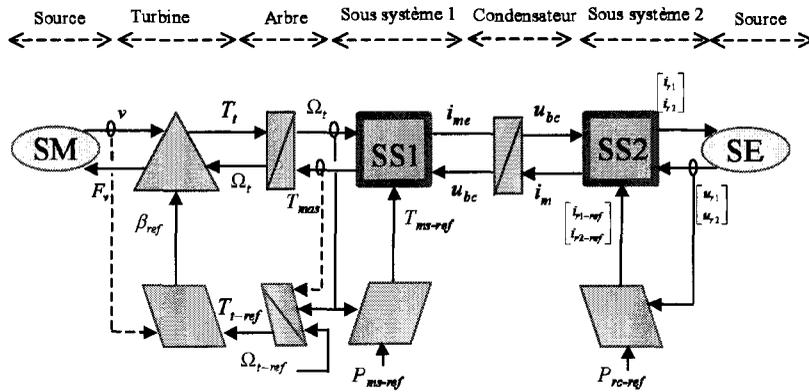


FIG. 4.4 – REM de l'éolienne à vitesse variable en contrôlant la puissance.

La figure 4.5 montre un formalisme REM de niveau hiérarchique supérieur qui peut être représenté dès lors que la chaîne de conversion possède des éléments de contrôle de la puissance : Les énergies E_Ω et E_u sont représentatives des variables Ω_t (vitesse de rotation de l'arbre mécanique) et u_{bc} (tension du bus continu). De gauche à droite, on retrouve les puissances, représentées par une double flèche épaisse, symbolisant la réversibilité du sens de la puissance :

- P_t , la puissance fournie par la turbine : $P_t = \frac{1}{2}\rho SC_p v^3$,
- P_{ms} , la puissance électrique de la machine synchrone : $P_{ms} = T_{ms}\Omega_t$,
- P_1 , la puissance renvoyée par l'éolienne sur le bus continu : $P_1 = u_{bc}i_{me}$,
- P_2 , la puissance renvoyée du bus continu au réseau : $P_2 = u_{bc}i_{mr}$
- P_{rc} , la puissance renvoyée au réseau électrique : $P_{rc} = u_{r1}i_{r1} + u_{r2}i_{r2}$.

Les flèches pointant vers le haut indiquent les pertes présentes dans chaque bloc qui symbolisent les pertes joules, par frottement, etc....

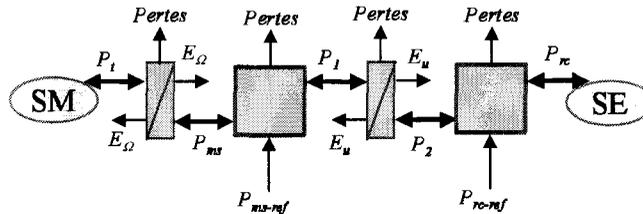


FIG. 4.5 – REM de niveau hiérarchique supérieur de l'éolienne à vitesse variable.

Chaque énergie peut donc être contrôlée par inversion des blocs causaux, elles sont représentatives des variables d'état du système. Les puissance deviennent alors des grandeurs de commande sur lesquelles on doit agir pour contrôler le niveau d'énergie.

4.4 Création d'une source de tension continue

Ces systèmes ont été développés en considérant une source de tension continue parfaite. En règle générale, cette source de tension continue est réalisée par régulation de la tension aux bornes d'un condensateur. Le système chargé de réaliser cette source de tension doit être capable de contrôler la puissance sans contraintes assurant de ce fait une bonne régulation. Par exemple, il n'est pas souhaitable de réaliser cette source de tension avec le système représenté à la figure 4.1(a) car on sait que la puissance de référence de l'éolienne à vitesse variable ne sera plus suivi en cas d'insuffisance de vent. Il en est de même pour le système de la figure 4.1(d) raccordé uniquement sur des charges isolées.

Si on reprends l'exemple de l'éolienne à vitesse variable classique représentée à la figure 4.2, l'inversion de la nouvelle représentation de la figure 4.5 est montré à la figure 4.6. Dans ce cas, c'est le convertisseur coté réseau qui se chargera de réguler le niveau de tension du bus continu. On sait que le système 1 n'en sera pas capable s'il n'y a plus de vent.

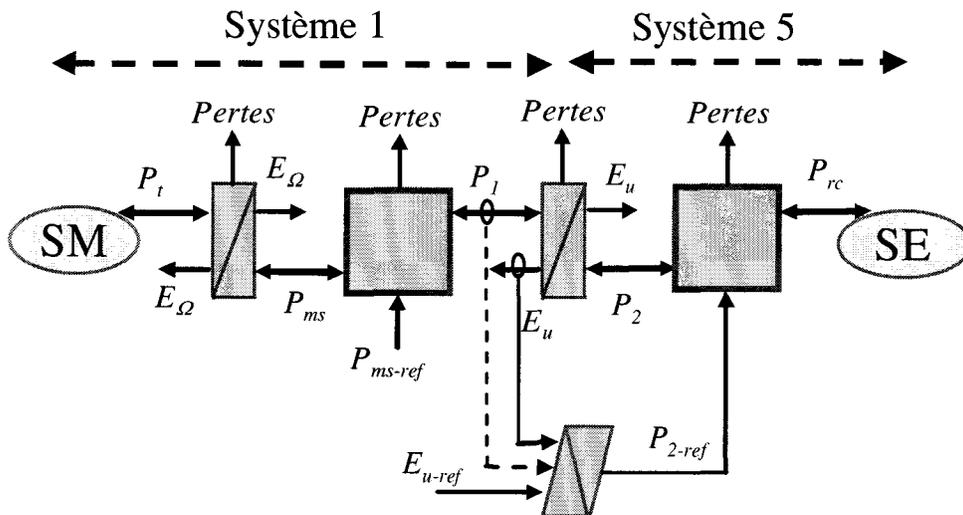


FIG. 4.6 – Régulation de la tension du bus continu par l'énergie.

Pour réguler la tension aux bornes des condensateurs, on utilise la structure représentée à la figure 4.7. Les tensions sont au carré pour reconstituer les énergies [48]. A la sortie du correcteur vient s'ajouter P_{comp} , puissance de compensation qui peut être la somme de plusieurs puissances de référence de systèmes différents. Dans le cas de l'exemple avec l'éolienne à vitesse variable (association des systèmes 1 et 5), $P_{comp} = P_1$. en règle générale, on néglige les pertes dans les convertisseurs et on utilise la puissance P_{ms-ref} en compensation par anticipation.

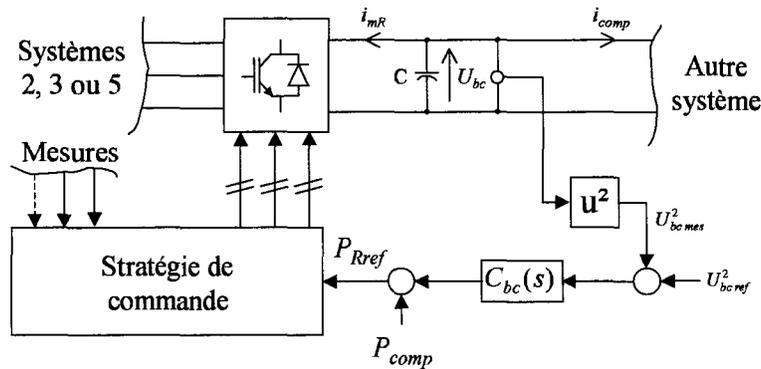


FIG. 4.7 – Schéma bloc de la régulation du bus continu.

4.5 Récapitulatif

Le tableau 4.1 fait un récapitulatif des différents systèmes étudiés dans la première partie qui sont représentés à la figure 4.1. Trois systèmes sont adaptés pour la création d'une source de tension continue et trois disposent d'une source d'énergie.

Systèmes	Adapté pour la création d'une source de tension continue	Dispose d'une source d'énergie
Système 1	NON car s'il n'y a plus assez de vent on ne pourra plus suivre la consigne de puissance	OUI l'énergie éolienne
Système 2	OUI dans la plage de fonctionnement à puissance constante	NON pas de source
Système 3	OUI dans la plage de fonctionnement à puissance constante	OUI l'énergie éolienne
Système 4	NON car on ne peut imposer une puissance à une charge	NON car on ne peut garantir d'être connecté à un réseau
Système 5	OUI dans la mesure ou le réseau absorbe	OUI le réseau lui même

TAB. 4.1 – Tableau récapitulatif de chaque système.

4.6 Réalisation d'une chaîne de conversion d'énergie

Pour réaliser une chaîne de conversion d'énergie, il faut disposer au moins d'une source d'énergie et au moins avoir un système qui soit adapté à la création d'une source de tension continue. On indiquera par "R" un système adapté pour la création d'une source de tension continue et on indiquera par "S" un système disposant d'une source d'énergie.

Le tableau 4.2 montre les différentes possibilités de couplages entre les 5 systèmes. Lorsque les conditions "R" et "S" sont réunies pour réaliser une chaîne de conversion, il est indiqué "ok". Dans le cas contraire, il est indiqué "insuffisant" ce qui signifie qu'il manque au moins une condition pour réaliser la chaîne de conversion.

	Système 1 S	Système 2 R	Système 3 RS	Système 4 -	Système 5 RS
Système 1 S	insuffisant	ok	ok	insuffisant	ok
Système 2 R	*	insuffisant	ok	insuffisant	ok
Système 3 RS	*	*	ok	ok	ok
Système 4 -	*	*	*	insuffisant	ok
Système 5 RS	*	*	*	*	ok

TAB. 4.2 – Table récapitulative de couplages.

Avant de traiter chaque couplage, on remarque que deux systèmes ne nécessitent pas d'être couplés, il s'agit des systèmes 3 et 5 car ils disposent d'une source d'énergie et sont adaptés pour la création d'une source de tension continue.

Système 3 uniquement : ok

Ce système peut être envisagé pour l'alimentation de charges isolées directement sur le bus continu. Le démarrage d'une telle source, n'étant pas traité ici, devra être effectué avec l'aide d'une source auxiliaire (batterie, etc.) afin de magnétiser la machine asynchrone.

Système 5 uniquement : ok

Ce système peut-être envisagé, comme le système 3, pour l'alimentation de charges isolées directement sur le bus continu. On reconnaîtra néanmoins un STATCOM (STATic synchronous COMPensator) au travers de ce système.

Couplage systèmes 1 et 1 : insuffisant

Cette association est insuffisante car rien ne garantit une bonne régulation de la tension du bus continu. Ce couplage en parallèle d'éolienne à vitesse variable sur le bus continu doit être associé à un autre système disposant d'une étiquette "R".

Couplage systèmes 1 et 2 : ok

Cette association peut-être envisagée, comme le système 3, pour l'alimentation de charges isolées directement sur le bus continu. Le système 2 assurant de ce fait l'équilibre production - consommation.

Couplage systèmes 1 et 3 : ok

C'est le système 3 qui régule la tension aux bornes du condensateur. Ce couplage ne présente que peu d'intérêt.

Couplage systèmes 1 et 4 : insuffisant

Cette association est insuffisante dans la mesure où aucun système n'est correctement adapté pour la création d'une source de tension continue. Il suffirait alors d'associer un élément disposant d'une étiquette "R".

Couplage systèmes 1 et 5 : ok

Il s'agit ici d'une éolienne à vitesse variable classiquement raccordée à un réseau de puissance.

Couplage systèmes 2 et 2 : insuffisant

Cette association ne convient pas puisqu'elle ne dispose pas de source d'énergie. Il suffirait d'ajouter un système disposant d'une étiquette "S".

Couplage systèmes 2 et 3 : ok

Peut être envisagé pour l'alimentation de charges isolées directement sur le bus continu. Les deux systèmes sont capables de réguler le niveau de tension du bus continu.

Couplage systèmes 2 et 4 : insuffisant

Cette association est insuffisante dans la mesure où il n'y a pas de source d'énergie. L'alimentation de charges isolées par exemple n'est donc pas envisageable. Il suffirait d'ajouter un système disposant d'une étiquette "S".

Couplage systèmes 2 et 5 : ok

Il s'agit ici du système de stockage inertielle étudié lors de mon stage de DEA [29].

Couplage systèmes 3 et 3 : ok

Ce couplage peut être envisagé pour l'alimentation de charges isolées directement sur le bus continu.

Couplage systèmes 3 et 4 : ok

Cette association est capable d'alimenter des charges isolées mais n'est pas capable de répondre aux objectifs services-systèmes dans la mesure où il est nécessaire de disposer d'une alimentation auxiliaire pour assurer le démarrage.

Couplage systèmes 3 et 5 : ok

Les deux systèmes possèdent tous deux une source d'énergie et sont tous deux capables de réguler le bus continu. Cette association est donc possible.

Couplage systèmes 4 et 4 : insuffisant

Cette association est insuffisante dans la mesure où il n'y a pas de source d'énergie. L'alimentation de charges isolées par exemple n'est donc pas envisageable. Il suffirait d'ajouter un système disposant d'une étiquette "S".

Couplage systèmes 4 et 5 : ok

Ce couplage pourrait servir à alimenter des charges isolées mais fonctionnant sous fréquence différente par exemple.

Couplage systèmes 5 et 5 : ok

On retrouve ici un UPFC (United Power Flow Controller).

4.7 Améliorer l'intégration d'éoliennes dans un réseau actif

La nature fluctuante aléatoire des sources à énergie renouvelable est préoccupante pour une bonne gestion du réseau [15]. On propose d'utiliser l'association des systèmes 2 et 5 en vue de lisser la puissance d'une éolienne. La figure 4.8 montre la structure proposée utilisée dans le cadre d'Alimentations Sans Interruption (ASI) [28]. Cet ensemble sera raccordé sur un réseau actif triphasé comportant des éoliennes. C'est le système 5 qui est chargé de créer la source de tension en contrôlant la tension du bus continu. La seule grandeur de commande disponible devient alors la puissance $P_{sto-ref}$. La détermination de cette dernière fait l'objet du chapitre 5.

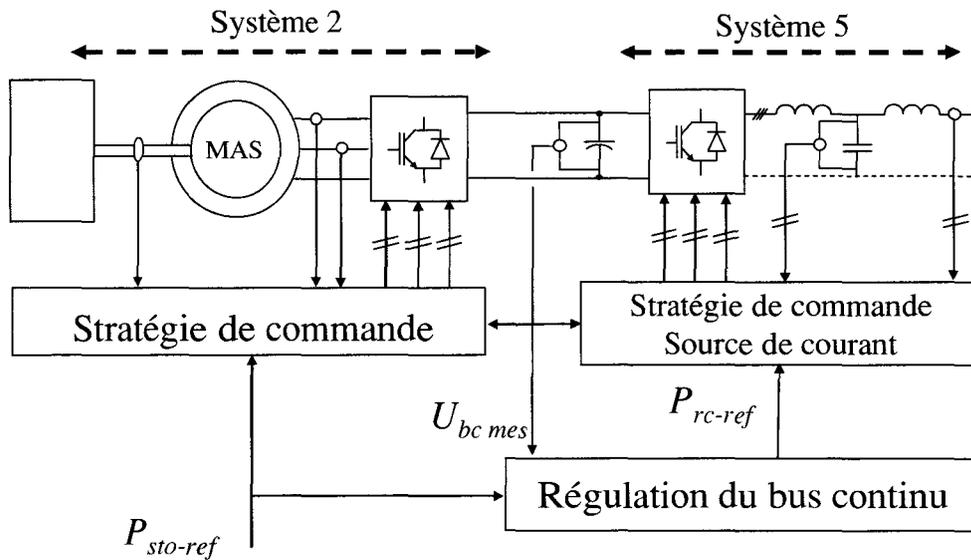


FIG. 4.8 – Schéma du système de stockage inertiel prévu pour améliorer l'intégration d'éoliennes dans un réseau actif.

4.8 Source de génération autonome susceptible d'assurer les services systèmes

Pour pouvoir alimenter des charges isolées en triphasé alternatif, sans démarrage au moyen d'une source auxiliaire, il faudrait associer les systèmes 1, 2 et 4 comme le montre la figure 4.9. La source d'énergie serait l'éolienne à vitesse variable et le système de stockage inertiel créerait la source de tension continue nécessaire au bon fonctionnement de l'ensemble. C'est donc le système 2 qui est chargé de réguler la tension du bus continu. Avec cette association, il reste deux grandeurs de commande à déterminer : P_{ms-ref} et P_{rc-ref} et ceci fera l'objet du dernier chapitre de cette deuxième partie.

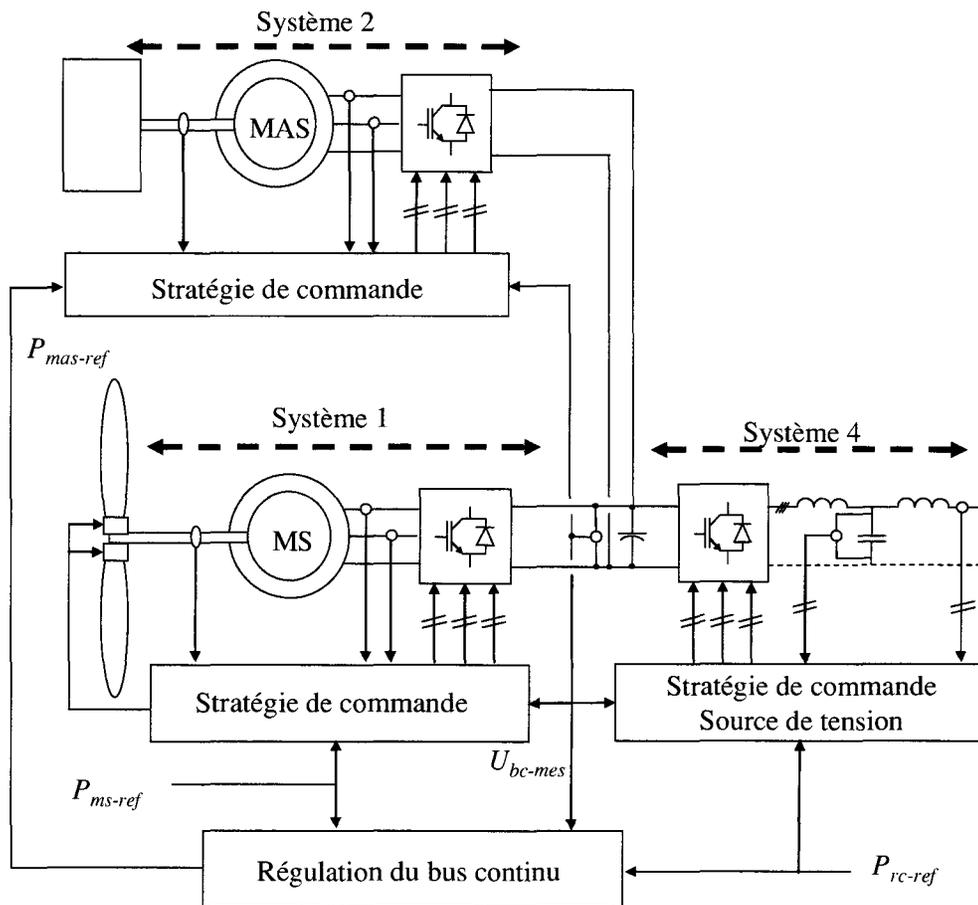


FIG. 4.9 – Schéma de la source de génération autonome.

4.9 Conclusion

Il a été présenté dans ce chapitre deux chaînes de conversion d'énergie, l'une, destinée à améliorer l'intégration d'éoliennes, et l'autre, susceptible d'assurer des services systèmes. La démarche qui a permis d'aboutir à ces choix propose un formalisme REM de niveau hiérarchique supérieur qui permet de déterminer la structure de la commande pour créer la source de tension, autrement dit de réguler la tension aux bornes du condensateur du bus continu suivant son niveau d'énergie. La régulation du bus continu permet également, par une compensation, d'assurer le transit de puissance d'un système à l'autre.

Chapitre 5

Lissage de puissance variable

5.1 Introduction

Ce chapitre traite du lissage d'une puissance variable, quelle soit positive ou négative, en vue d'améliorer l'intégration d'éoliennes dans des réseaux actifs. La stratégie de commande développée est généralisée pour n'importe quel système de stockage et permet également de dépolluer et de ré-équilibrer une charge variable déséquilibrée non-linéaire. La variable de flux, renseignant sur l'état du niveau de stockage, est pris en compte dans les algorithmes de commande afin d'éviter une saturation du système de stockage.

5.2 Principe

Le principe de lissage de puissance variable est illustré à la figure 5.1. La puissance d'une source ou d'une charge de nature variable est lissée par un système de stockage qui stocke ou restitue de l'énergie afin que l'ensemble se comporte comme une source ou une charge de puissance constante ou lentement variable du point de vue du réseau électrique.

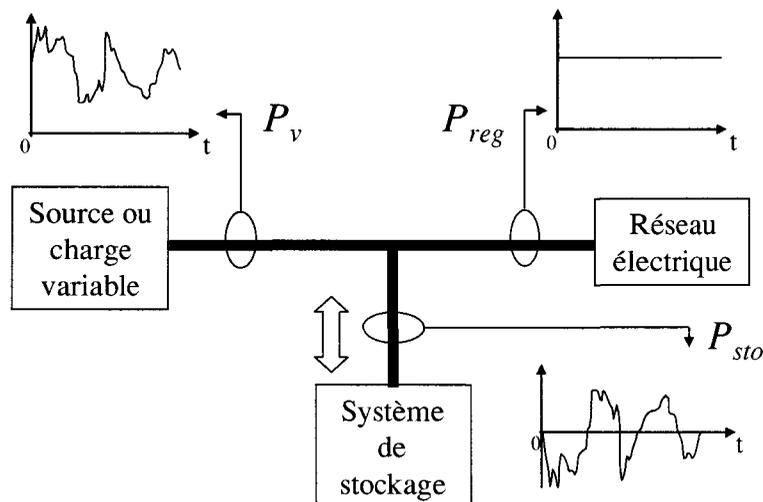


FIG. 5.1 – Application du système de stockage d'énergie.

Pour lisser la puissance variable, un filtre passe-bas est utilisé. La puissance de la source ou charge variable est calculée en fonction des courants mesurés.

La constante de temps de ce filtre est liée à la capacité de stockage. La figure 5.2 montre la réponse du filtre passe-bas utilisé à un échelon de puissance P_N , le temps de réponse valant 3τ pour environ 95% de P_N . La réponse temporelle est de la forme :

$$P(t) = P_N \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (5.1)$$

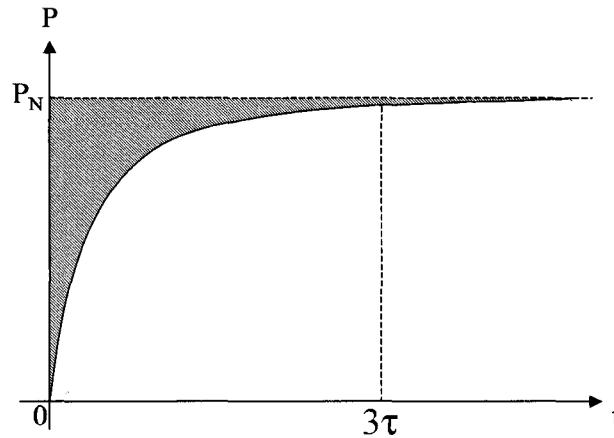


FIG. 5.2 – Réponse du filtre à un échelon de puissance.

Dans le cas la plus défavorable, P_N pourrait correspondre à la puissance nominale du système de stockage. La partie hachurée représentée à la figure 5.2 correspond à l'énergie que devra absorber le système de stockage. Cette énergie est égale à :

$$\Delta E_{sto} = \int_0^{\infty} (P_N - P(t)) dt = \tau P_N \quad (5.2)$$

Toujours dans le cas le plus défavorable, cette énergie correspond à l'énergie stockable dans la plage du flux f correspondant au stockage :

$$\Delta E_{sto} = \frac{1}{2} C (f_{max}^2 - f_{min}^2) \quad (5.3)$$

Dans le cas du système inertiel :

- $C = J$
- $f_{max} = 2\Omega_s$
- $f_{min} = \Omega_s$
- $\Delta E_{sto} = \frac{3}{2} J \Omega_s^2$

Pour notre étude on pourra donc considérer :

$$2\tau P_N = 3J\Omega_s^2 \quad (5.4)$$

Note sur la valeur de P_N : Ici, P_N correspond à la valeur de la puissance nominale du système de stockage ce qui dans notre cas représente la puissance nominale de la machine asynchrone. Comme le montre les figures 5.4(a) et 5.4(b), cette puissance nominale dépend de l'endroit où est connecté le système de stockage dans le réseau électrique car l'effet de foisonnement de charges ou sources variables peut contribuer à la réduction du dimensionnement de l'élément de stockage donc à une diminution de la puissance nominale [37].

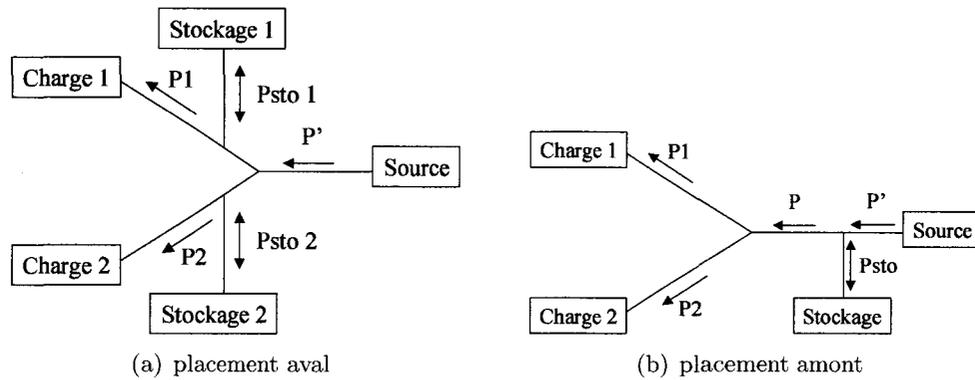


FIG. 5.3 – Placement des systèmes de stockage.

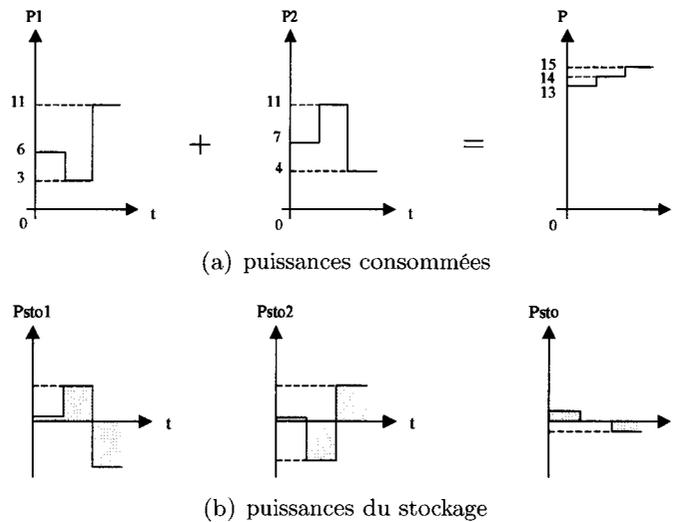


FIG. 5.4 – Puissances.

5.3 Gestion de la variable de flux

La quantité d'énergie stockable est limitée non pas par la capacité de stockage mais par la plage de variation du flux :

- pression maximum d'un réservoir limité par sa hauteur,
- vitesse limite de rotation due aux contraintes mécaniques.

Pour un bon fonctionnement, il est donc important d'éviter une saturation du système de stockage en évitant qu'il atteigne ses propres limites.

On définit donc une plage de variation de flux pour laquelle le système de stockage assure ses fonction correctement :

- f_{min} : limite basse du système de stockage,
- f_{max} : limite haute du système de stockage.

Il faudra donc agir sur la puissance de réglage tout en assurant la fonction de lissage de puissance variable de sorte à ce que l'on stocke davantage d'énergie lorsque la variable de flux rapproche de la limite basse f_{min} et que l'on restitue davantage d'énergie lorsque la variable de flux se rapproche de la limite haute f_{max} .

Ce problème traité lors de mon stage de recherche de DEA [29] avec l'aide de la logique floue à mis en évidence une surface 3D non linéaire qui a pu être approximée par l'équation suivante [31] :

$$p_{reglage} = \frac{2}{3}p_{variable} + \frac{1}{3(f_{max} - f_{min})}(f - f_{min}) \quad (5.5)$$

Avec :

- $p_{reglage} = \frac{P_{reglage}}{P_0}$: puissance relative de réglage,
- $p_{variable} = \frac{P_{variable}}{P_0}$: puissance relative variable.

5.4 Filtrage actif et Lissage de puissance variable

5.4.1 Principe

La figure 5.5 montre l'architecture de la commande en vue d'élaborer la puissance de référence du système de stockage. Les puissances calculées p_v et q_v sont les puissances instantanées de l'élément de puissance variable calculées à partir de la mesure des tensions composées du réseau (u_{13} et u_{23}) et des courants de l'élément. Cet élément de puissance variable peut être, par exemple, soit une éolienne à vitesse fixe, soit une charge variable. Dans le cas d'un système équilibré, la puissance instantanée triphasée est égale à sa valeur moyenne ($p_v = P_v$). Dans le cas d'un système déséquilibré en courant (cas par exemple de charges monophasées mal réparties sur le réseau triphasé), la puissance instantanée se voit apparaître une composante alternative de pulsation double appelée "puissance fluctuante". L'intérêt du filtre passe bas est qu'il atténue cette puissance jusqu'à la rendre quasiment nulle de sorte que l'on se rapproche de la valeur moyenne à la constante de temps τ près, obtenant alors $P_f \approx P_v$ [13]. $P_{reg-ref}$ est la puissance que l'on souhaite obtenir de l'association système de stockage-élément de puissance variable. Afin d'éliminer l'éventuel déséquilibre de l'élément variable (ce qui peut être le cas d'un groupement de charges monophasées), la puissance de référence du système de stockage ($p_{sto-ref}$) est déterminée par la différence entre la valeur de la puissance instantanée de l'élément variable (p_v) et la puissance que l'on souhaite obtenir ($P_{reg-ref}$). Au regard de la figure 5.5, la puissance fluctuante apparaît alors sur la référence du système de stockage, qui sera donc chargé de ré-équilibrer la charge. De plus, on peut rendre le $\cos \varphi$ de la charge unitaire en compensant sa puissance réactive de sorte que $q_v = q_{sto-ref}$.

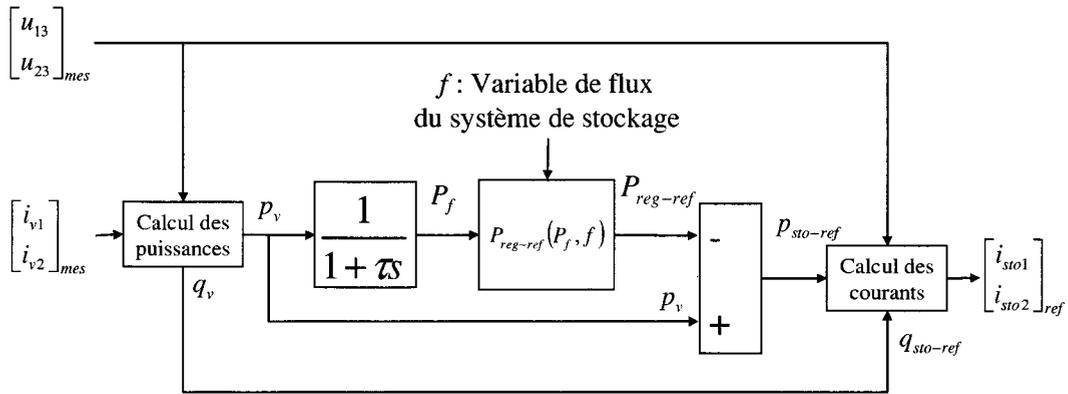
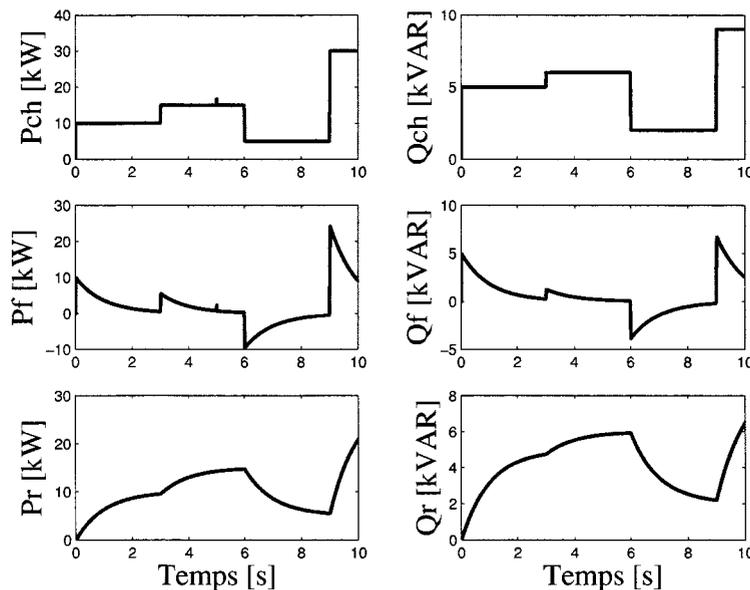


FIG. 5.5 – Stratégie d'élaboration des courants de référence.

5.4.2 Simulation

Les figures 5.6 et 5.7 montrent les résultats de la simulation sur 10 secondes en utilisant l'algorithme de commande de la figure 5.5 dans le cadre d'une charge variable. La valeur de la constante de temps du filtre passe bas est fixée à $\tau = 1$ s. De haut en bas, la figure 5.6 montre les puissances active et réactive de la charge (notées P_{ch} et Q_{ch}), les puissances active et réactive que consomme ou génère le système de stockage (notées P_f et Q_f) et enfin, les puissances active et réactive vues par le réseau. La puissance active de la charge (P_{ch}) passe de 10 kW à 15 kW à $t = 3$ s, de 15 kW à 5 kW à $t = 6$ s et de 5 kW à 30 kW à $t = 9$ s. La puissance réactive de la charge (Q_{ch}) passe de 5 kVAR à 6 kVAR à $t = 3$ s, de 6 kVAR à 2 kVAR à $t = 6$ s et de 2 kVAR à 9 kVAR à $t = 9$ s. On montre au travers des puissances active et réactive vues par le réseau (P_r et Q_r) l'effet du lissage de la puissance de la charge variable.


 FIG. 5.6 – Simulation de l'algorithme de commande dans le cas d'une charge variable : puissances active et réactive de la charge, du système de stockage et vues du réseau avec une constante de temps $\tau = 1$ s.

De haut en bas, la figure 5.7 montre les courants appelés par la charge (notés i_{ch}), les courants du système de stockage (notés i_f) et enfin, les courants vus par le réseau (notés i_r). A $t = 5$ s, la charge devient déséquilibrée et polluée comme le montre la figure 5.7. Les courants vus par le réseau sont alors équilibrés et propres.

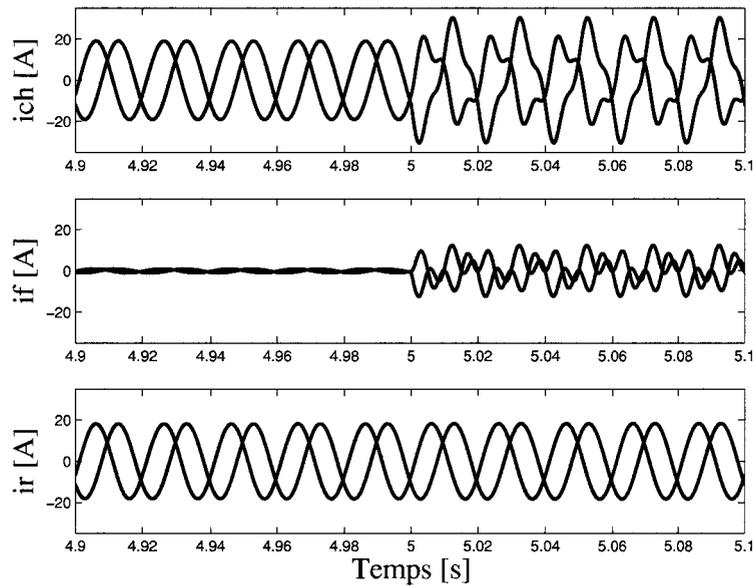


FIG. 5.7 – Simulation de l’algorithme de commande dans le cas d’une charge variable : courants de la charge, du système de stockage et vus du réseau.

On constate au travers de cette simulation que la charge est bien dépolluée, lissée et ré-équilibrée. Cette simulation a été réalisée en considérant une parfaite régulation des courants de référence, autrement dit, $i_{sto1-ref} = i_{sto1}$ et $i_{sto2-ref} = i_{sto2}$.

5.5 Application à une éolienne à vitesse fixe

5.5.1 Schéma de raccordement

On s'intéresse dans cette section au lissage de puissance d'une éolienne à vitesse fixe avec l'aide d'un système de stockage comme représenté à la figure 5.8. L'éolienne à vitesse fixe considérée est de 300 kW et la puissance nominale de la machine asynchrone du système de stockage est de 90 kW. On considère également une charge de 300 kW - 120 kVAR.

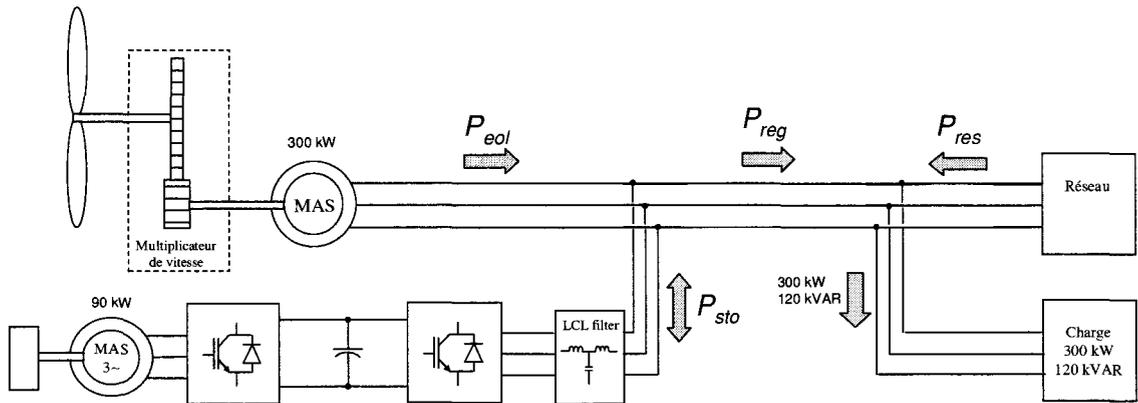


FIG. 5.8 – Schéma de raccordement du système de stockage inertiel en vue de lisser la puissance d'une éolienne à vitesse fixe.

5.5.2 Simulation

Deux simulations ont été effectuées sur 600 secondes soit 10 minutes. L'allure de la vitesse du vent qui a alors été considérée durant ces 10 minutes est montrée à la figure 5.9 : la vitesse moyenne du vent est d'environ 10 m/s durant les 300 premières secondes et d'environ 6 m/s de 300 à 600 secondes. Ces vitesses moyenne de vent correspondent à la succession d'un vent moyen et d'un vent faible.

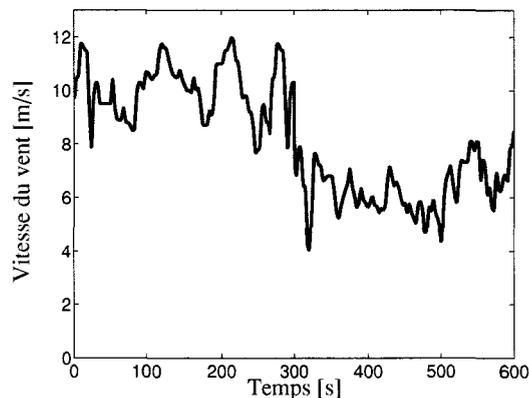


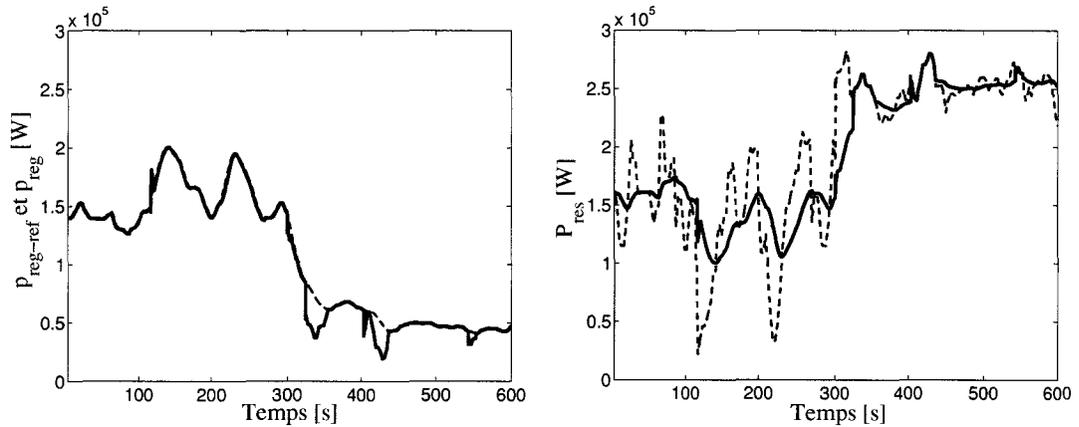
FIG. 5.9 – Allure de la vitesse du vent considérée dans les simulations.

La première simulation ne tient pas compte de l'état du stockage pour lisser la puissance de l'éolienne, soit $P_{reg-ref} = P_f$. Autrement dit, la variable de flux, qui est la vitesse de rotation

du volant, n'est pas gérée. Dans la deuxième simulation, on prends en compte l'état du stockage en évitant sa saturation.

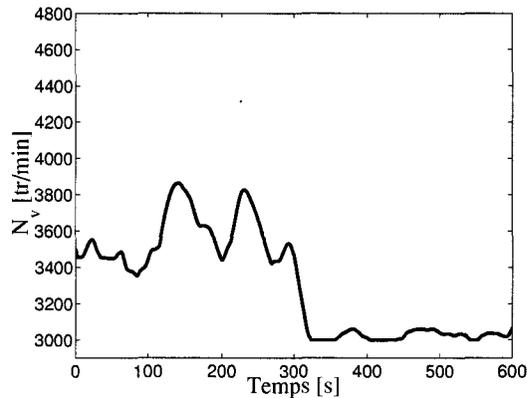
Lissage sans tenir compte de la vitesse du volant d'inertie

La figure 5.10 montre les résultats de simulation pour laquelle on considère $P_{reg-ref} = P_f$ (voir la figure 5.5). Initialement, le volant d'inertie tourne à 1500 tr/min. La figure 5.10(a) montre les puissances $p_{reg-ref}$ et p_{reg} . $p_{reg-ref}$ représente la puissance que l'on souhaiterait obtenir de l'association éolienne-système de stockage et p_{reg} représente la puissance obtenue après lissage de la puissance éolienne. La figure 5.10(b) montre la puissance fournie par le réseau P_{res} avec et sans système de stockage. La courbe en pointillé montre la puissance fournie par le réseau lorsque l'éolienne à vitesse fixe est seule. La courbe en trait continu représente la puissance fournie par le réseau lorsque le système de stockage inertiel lisse la puissance de l'éolienne à vitesse fixe. La figure 5.10(c) montre l'évolution de la vitesse de rotation du volant d'inertie N_v . On voit apparaître sur cette figure une saturation du niveau bas volontairement fixée à 3000 tr/min. Lorsque le volant d'inertie arrive à sa vitesse limite basse, le système de stockage n'est alors plus capable de lisser la puissance de l'éolienne comme le montre les figures 5.10(a) et 5.10(b). Il est donc important de tenir compte de la vitesse de rotation du volant pour lisser la puissance de l'éolienne afin d'éviter d'atteindre les limites du système de stockage (3000 et 6000 tr/min).



(a) puissances fournies par l'ensemble éolien - système de stockage

(b) puissances fournies par le réseau



(c) vitesse du volant d'inertie

FIG. 5.10 – Simulation du système de stockage inertiel en vue de lisser la puissance d'une éolienne à vitesse fixe sans tenir de l'état du stockage : puissance fournie par l'ensemble éolienne-système de stockage, puissance fournie par le réseau avec et sans système de stockage et vitesse de rotation du volant d'inertie.

Lissage en tenant compte de la vitesse du volant d'inertie

Si on prend la variable de flux du volant d'inertie comme étant la vitesse de rotation N_v , exprimée en tr/min, et que l'on se fixe une plage de vitesse comprise entre 3000 et 6000 tr/min, l'expression 5.5 devient alors pour une puissance P_0 de 300 kW [31] :

$$P_{reglage} = \frac{2}{3}P_{variable} + \frac{100}{3}(N - 3000) \quad (5.6)$$

L'équation 5.6 à deux variables est représentée à la figure 5.11.

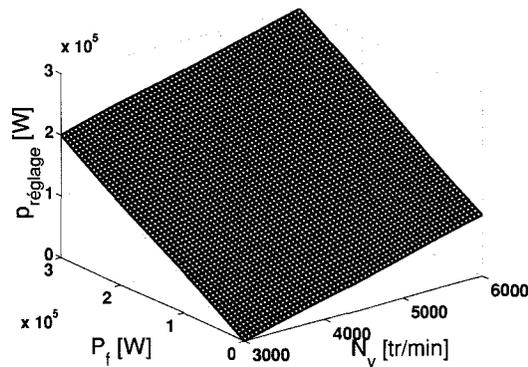
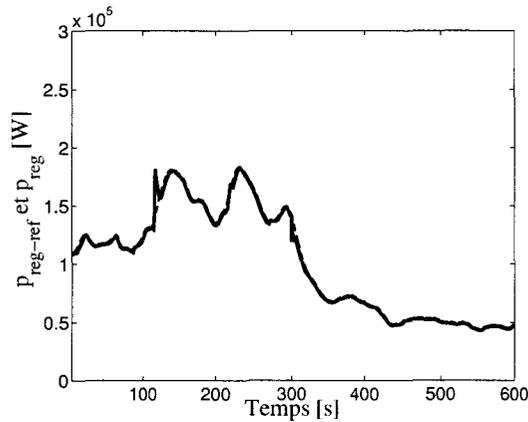
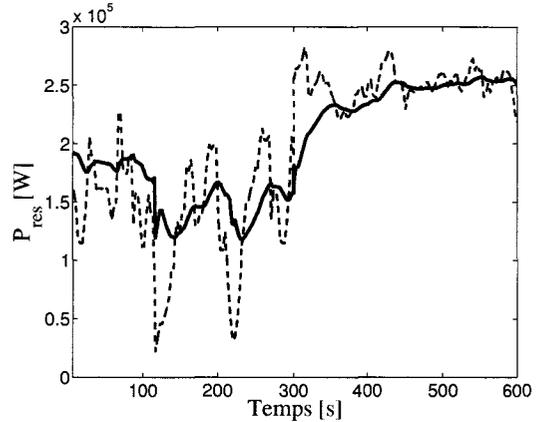


FIG. 5.11 – $P_{reg} = f(P_f, N_v)$.

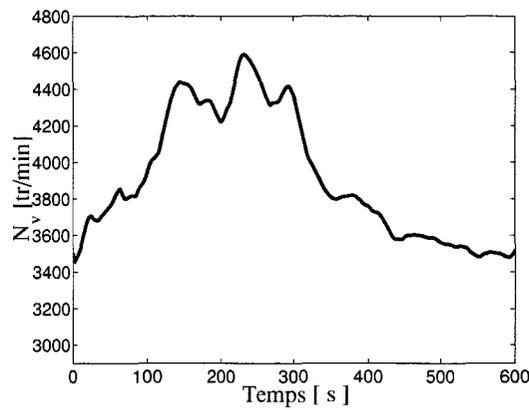
La figure 5.12 montre les résultats de simulation pour laquelle on considère $P_{reg-ref} = f(P_f, N_v)$ (voir la figure 5.5). Initialement, le volant d'inertie tourne à 1500 tr/min. La figure 5.10(a) montre les puissances $p_{reg-ref}$ et p_{reg} . $p_{reg-ref}$ représente la puissance que l'on souhaiterait obtenir de l'association éolienne-système de stockage et p_{reg} représente la puissance obtenue après lissage de la puissance éolienne. La figure 5.10(b) montre la puissance fournie par le réseau P_{res} avec et sans système de stockage. La courbe en pointillé montre la puissance fournie par le réseau lorsque l'éolienne à vitesse fixe est seule. La courbe en trait continu représente la puissance fournie par le réseau lorsque le système de stockage inertiel lisse la puissance de l'éolienne à vitesse fixe. La figure 5.10(c) montre l'évolution de la vitesse de rotation du volant d'inertie N_v . Cette fois ci, on ne voit pas apparaître de saturation du niveau de stockage. Lorsque le volant d'inertie tend vers la limite basse, la puissance de réglage $p_{reg-ref}$ est modifiée en conséquence et le système de stockage inertiel peut continuer de lisser la puissance de l'éolienne comme le montre les figures 5.10(a) et 5.10(b).



(a) puissances fournies par l'ensemble éolien - système de stockage



(b) puissances fournies par le réseau



(c) vitesse du volant d'inertie

FIG. 5.12 – Simulation du système de stockage inertiel en vue de lisser la puissance d'une éolienne à vitesse fixe en prenant en compte l'état du stockage : puissance fournie par l'ensemble éolien-système de stockage, puissance fournie par le réseau avec et sans système de stockage et vitesse de rotation du volant d'inertie.

5.6 Conclusion

Dans ce chapitre, il a été vu un algorithme de commande permettant de lisser une puissance variable avec un système de stockage tout en prenant en compte la variable de flux. L'algorithme permet également de compenser un éventuel déséquilibre afin que la charge paraisse équilibrée du point de vue du réseau. Cet algorithme permet également un fonctionnement en filtre actif dans la mesure où les correcteurs de courants sont adaptés pour un bon suivi de la consigne. Il est montré, au travers d'une application à une éolienne à vitesse fixe, qu'il est important de tenir compte de l'état du niveau de stockage afin d'éviter une saturation du système.

Chapitre 6

Systeme de génération autonome

6.1 Introduction

Ce chapitre présente un système de génération autonome susceptible de participer à la gestion d'un réseau voir d'assurer les services systèmes. La stratégie de commande développée vise à déterminer les puissances de référence de chacun des systèmes afin d'assurer un bon fonctionnement du système de génération autonome appelée "source". L'interaction de trois de ces sources avec un réseau puissant et la possibilité pour ces sources de fonctionner en  lot  sont présentés sous forme de résultats de simulations.

6.2 Composition d'une source

Le système de génération d'énergie autonome appelé source est composé d'un système de stockage inertielle, d'une éolienne à vitesse variable à attaque directe avec machine synchrone à aimants permanents. La source est connectée à un réseau triphasé via un onduleur de tension et un filtre LC comme le montre la figure 6.1.

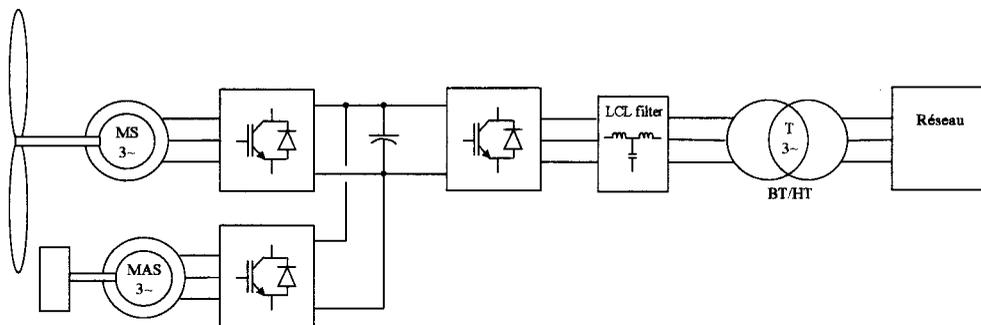


FIG. 6.1 – Source de génération d'énergie autonome.

6.2.1 Commande maximale

La stratégie de commande de la source est représentée à la figure 6.2 qui montre la REM de la structure de la commande maximale. Les commandes en puissance de chaque système ont fait l'objet de la première partie et les commandes des machines électriques sont détaillées en annexe B.1.

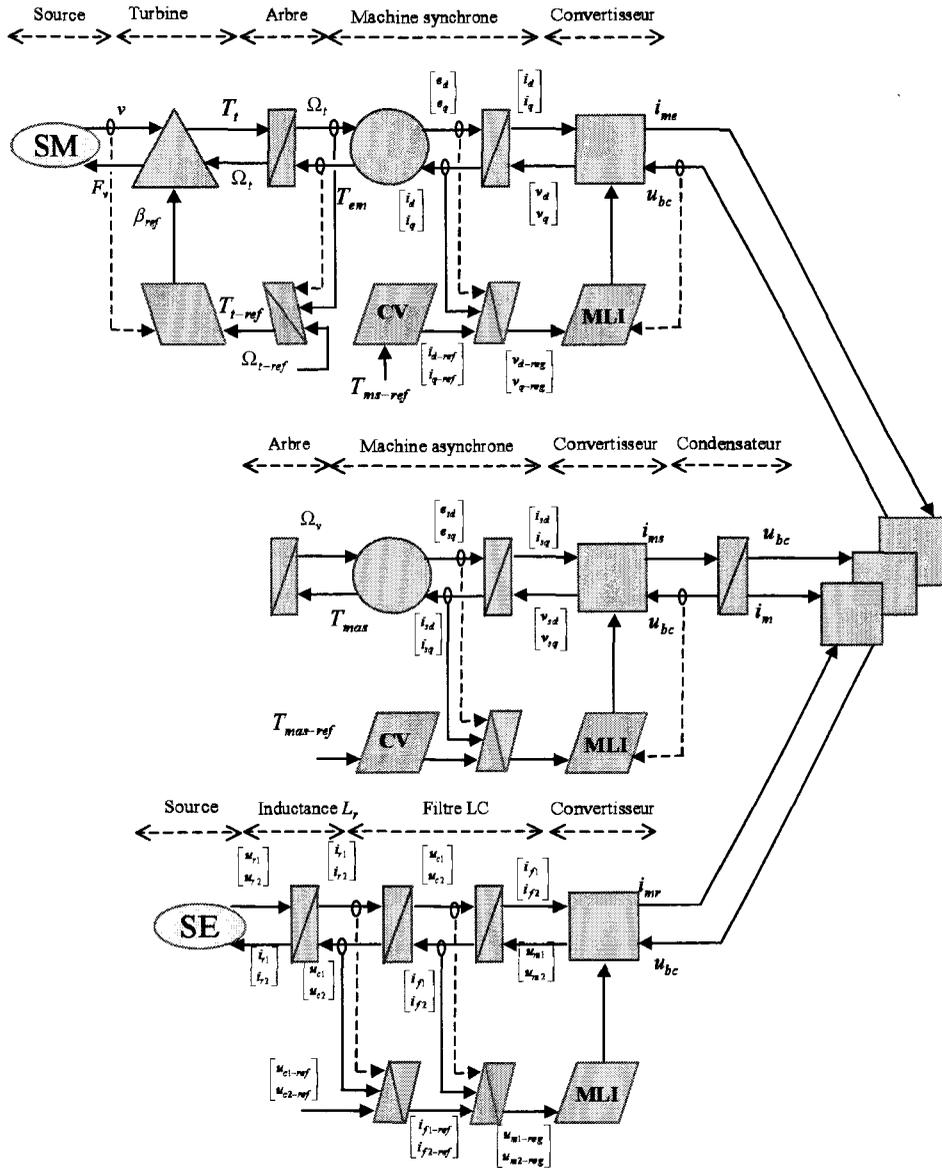


FIG. 6.2 – Commande maximale du générateur autonome.

6.2.2 Détermination des puissances de référence

Il est apparu dans le premier chapitre de cette deuxième partie que le seul système, parmi les trois qui compose cette source, adapté à la création d'une source de tension continue est le système de stockage inertiel. La figure 6.3 montre une représentation en puissance de la source sur laquelle apparaît la régulation du niveau d'énergie du condensateur du bus continu par le système de stockage inertiel. On voit sur cette figure qu'il restera deux puissances de référence à déterminer.

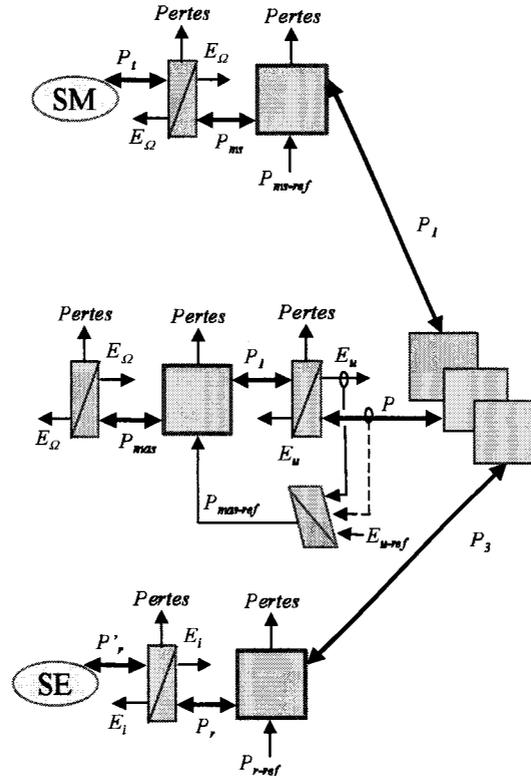


FIG. 6.3 – Formalisation REM en puissance de la source de génération autonome.

On ne peut imposer n'importe quelle puissance de référence à la source autonome sans connaître l'état du niveau de son système de stockage. Il est donc important de prendre en compte la vitesse de rotation du volant d'inertie afin de déterminer les puissances de référence. La figure 6.4 montre les références des deux grandeurs de commande restantes. Ainsi lorsque le système de stockage tend vers la limite haute, il faut donc ralentir la production afin d'éviter de stocker davantage et continuer à renvoyer le maximum de puissance sur le réseau. La figure 6.4(a) montre donc que la puissance de référence de l'éolienne P_{ms-ref} diminue à partir de 5500 tr/min jusqu'à être nulle à 6000 tr/min. Aussi, lorsque le niveau de stockage tend vers la limite basse, on va chercher à renvoyer le moins de puissance possible en diminuant la puissance de référence P_{r-ref} de l'onduleur connecté au réseau et à produire le maximum avec l'éolienne. Ceci est illustré par la figure 6.4(b) où la puissance P_{r-ref} diminue à partir de 3500 tr/min pour être nulle à 3000 tr/min.

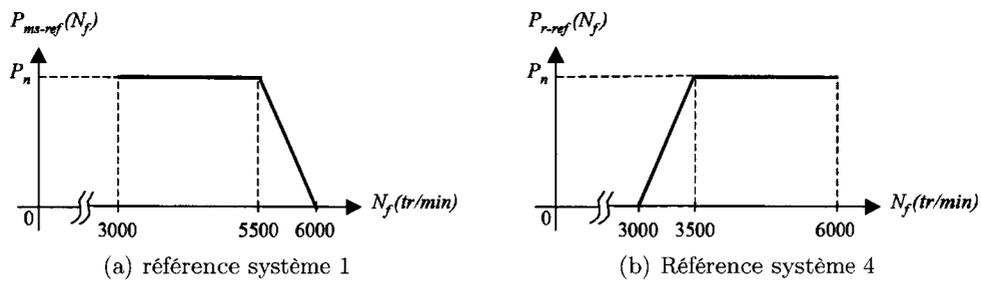


FIG. 6.4 – Les puissances de références.

Dans le cas d'insuffisance de vent et de décharge du système de stockage, il faut prévoir soit :

- la mise en route d'une source de secours,
- une déconnection de la source,
- un délestage de la charge.

6.3 Interconnexion

6.3.1 La structure d'interconnexion

La structure d'interconnexion des sources est représentée à la figure 6.5. Trois systèmes de génération d'énergie autonome identiques sont considérés (source 1, source 2 et source 3). Les éoliennes sont soumises à trois vents différents v_1 , v_2 et v_3 . Ces vents, mesurés dans le nord de la France ont respectivement une vitesse moyenne de 6, 10 et 12 m/s. Chaque source est connectée à un jeu de barre (bus bar) par un transformateur. Les trois sources sont interconnectées par des lignes 20 kV à un réseau puissant. Les charges sur chaque jeu de barre consomment de la puissance active et de la puissance réactive : $P_1=100$ kW, $Q_1 = 50$ kVAR, $P_2 = 400$ kW, $Q_2 = 50$ kVAR, $P_3 = 400$ kW, $Q_3 = 100$ kVAR, $P_4 = 100$ kW et $Q_4 = 50$ kVAR. La puissance totale consommée par ces charges est de 1 MW pour la puissance active et de 250 kVAR pour la puissance réactive. Ces charges sont triphasées équilibrées et linéaires.

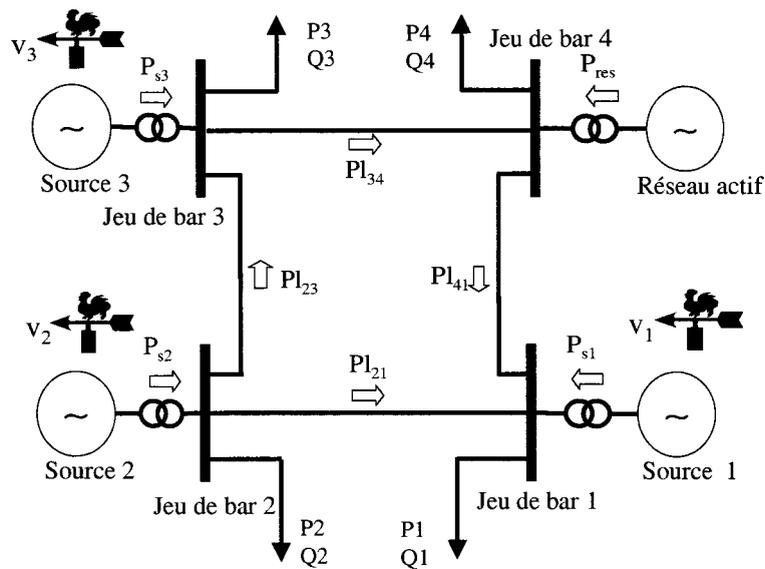


FIG. 6.5 – Interconnexion de 3 sources et d'un réseau actif.

6.3.2 Simulation

Dans cette simulation d'une durée de 300 secondes, trois événements sont considérés : la perte d'une ligne à $t = 75$ secondes, la déconnexion du réseau puissant à $t = 150$ secondes, qui correspond à l'ilotage des trois sources autonomes et la déconnexion de la source 1 à $t = 225$ secondes. Initialement, la vitesse de rotation des trois volants d'inertie est égale et de 4500 tr/min. La puissance de réglage des trois sources autonomes est fixée à 500 kW.

Les résultats de simulation sont présentés à la figure 6.6. La figure 6.6(a) montre l'allure de la vitesse des trois vents v_1 , v_2 et v_3 que subit chaque éolienne. La source 1 est donc soumise au vent v_1 et ainsi de suite pour les deux autres sources. La figure 6.6(b) montre les puissances éoliennes des trois sources qui sont alors différentes puisqu'elles ne sont pas soumises au même vent. La figure 6.6(c) montre la puissance générée par chaque source ainsi que la puissance du réseau actif. On remarque que le réseau actif "absorbe" la puissance excédentaire des trois sources autonomes. Les puissances générées par les trois sources sont identiques pendant environ 50 secondes. Après

environ 50 secondes, la puissance de la source 1 diminue en changeant sa puissance de référence car la vitesse de rotation de son volant devient trop petite comme cela est montré à la figure 6.6(d). En effet, cette source est soumise au vent le plus faible et elle a donc épuisé sa réserve d'énergie et par conséquent, la commande agit de sorte à maintenir un niveau de stockage correct. A l'inverse, lorsque le niveau de stockage est trop élevé, la commande agit de telle sorte que la puissance fournie par l'éolienne diminue : c'est le cas de la source 3 qui est soumise au vent le plus fort. La figure 6.6(e) montre la tension de chaque bus continu et la figure 6.6(f) montre la fréquence de référence de chaque source. On remarque que la tension des bus continus est bien régulée à 1500 V et que les fréquences de référence ne sont pas toutes strictement identiques mais très proches. Au regard général de la figure 6.6 rien ne semble apparaître lorsque la ligne 34 est coupée (ligne entre source 3 et réseau puissant), cette coupure de ligne ne perturbe donc pas le fonctionnement de chaque source. En revanche, le comportement de chaque source change radicalement lorsque le réseau actif est déconnecté : les trois sources doivent alors se répartir la charge et l'une d'elle est à son niveau bas de stockage (source 1), la fréquence de référence s'adapte alors en conséquence. Les charges sont toujours alimentées. Lorsque la source 1 est déconnectée à $t = 225$ secondes, on constate que son niveau de stockage remonte et que les charges sont toujours alimentées, mais uniquement par les sources 2 et 3.

La figure 6.7 montre la puissance transitant dans chaque ligne. Sur cette figure, la coupure de la ligne 34 est flagrante et modifie donc le transit de puissance dans les autres lignes. On remarque que lorsque le réseau est déconnecté, la puissance qui transite dans la ligne 41 correspond à la puissance de la charge.

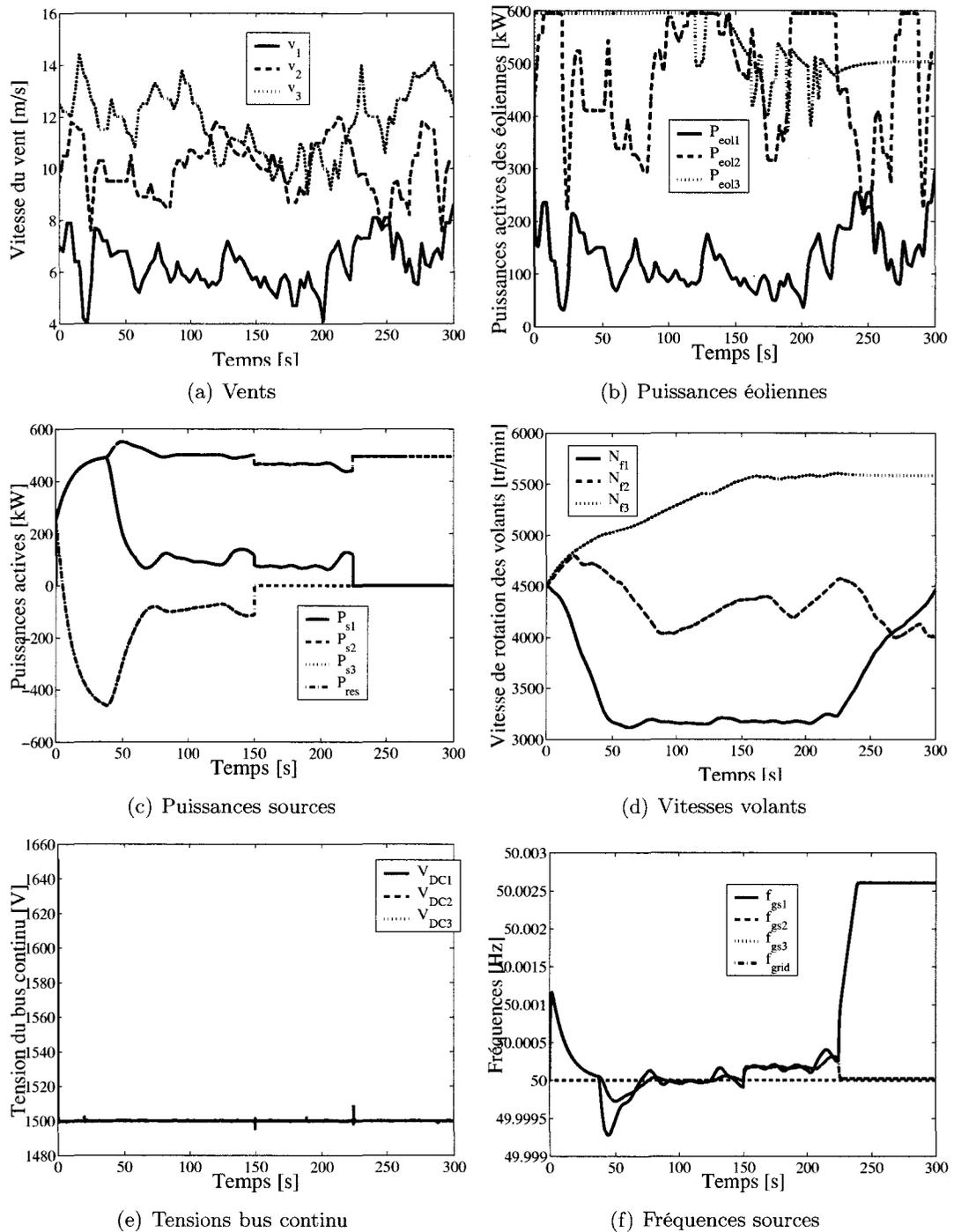


FIG. 6.6 – Simulation de trois sources interconnectées avec un réseau actif : vitesse du vent, puissances des trois éoliennes, puissances des trois sources, vitesse de rotation des volants d'inertie, tensions des bus continu et fréquences de références des trois sources.

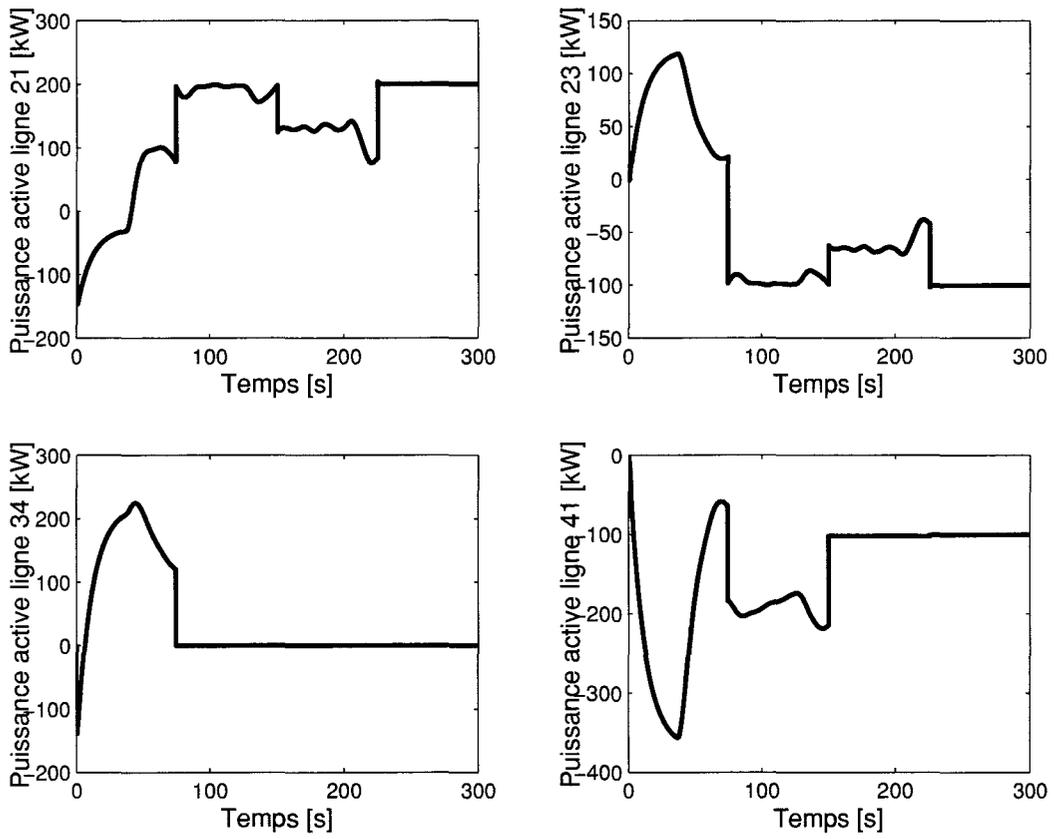


FIG. 6.7 – Simulation de trois sources interconnectées avec un réseau actif : puissances transitant dans les lignes.

6.4 Conclusion

Dans ce chapitre a été présenté un système de génération autonome susceptible de participer à la gestion d'un réseau voir d'assurer les services systèmes. La stratégie de commande développée vise à déterminer les puissances de référence de chacun des systèmes afin d'assurer un bon fonctionnement du système de génération autonome appelée "source". Les résultats de simulation sont très prometteurs et se pose maintenant la question de la centralisation de telles sources afin d'optimiser la gestion des niveaux de stockage et par conséquent la gestion des flux d'énergie. On pourrait encore imaginer des éoliennes à vitesse variable fonctionnant en "esclave" en association avec ces sources de génération autonomes.

La stratégie de commande qui a été présentée dans cette partie peut donc être développée davantage afin, par exemple :

- de pouvoir générer le maximum de puissance lorsque la source est connectée au réseau surtout lorsque le système de stockage tend vers la limite haute,
- de pouvoir se répartir la puissance réactive entre sources au moyen d'un statisme tension
 - puissance réactive.

Conclusion de la deuxième partie

Cette deuxième partie a traité dans un premier temps les différentes associations possibles entre les systèmes développés dans la première partie. On a vu que la création d'une source de tension continue à son importance et qu'elle ne peut pas être créée par n'importe quel système. C'est dans le premier chapitre de cette deuxième partie qu'est proposé une REM de niveau hiérarchique supérieur afin de formaliser la création d'une source de tension continue via ces systèmes. Ce premier chapitre introduit les deux suivants car il propose dans un premier temps, un système permettant d'améliorer l'intégration des éoliennes existantes dans un réseau d'énergie électrique et dans un deuxième temps, un système de génération autonome susceptible de participer à la gestion du réseau.

C'est donc dans le deuxième chapitre que l'on a vu que le système de stockage inertiel est capable de lisser la puissance d'une charge variable ou encore la puissance fluctuante d'une source à énergie renouvelable. La stratégie de commande a été généralisée pour être adaptée à n'importe quel système de stockage.

Quand au dernier chapitre de cette partie, il a traité d'un système de génération d'énergie autonome susceptible de participer à la gestion du réseau. On a vu grâce aux simulations que l'interconnexion de plusieurs de ces sources apporte un gain en terme de sécurité d'alimentation et permet une meilleure gestion du niveau de stockage grâce à la répartition de la charge. Cependant, Il se pose la question de la centralisation de telles sources, qui sont naturellement décentralisées, ceci pour une meilleur gestion des flux d'énergie.

Troisième partie

Expérimentation

Introduction de la troisième partie

Le développement de plate-formes expérimentale est indispensable à la validation des travaux présents dans ce mémoire. Le but de cette partie est de décrire dans un premier temps un banc d'essais en cours de développement sur le site HEI. Cette plate-forme d'essais a permis d'expérimenter, en temps réel, le comportement d'une éolienne à vitesse variable reliée au réseau alternatif ainsi que le fonctionnement d'un onduleur de tension dont le rôle principal est d'alimenter des charges.

Dans une première partie, nous ferons la description physique et matérielle de ce banc, en spécifiant le matériel retenu pour sa réalisation. Nous étudierons la modélisation et la commande appliquée à chacune des trois parties essentielles constituant cette plate-forme : l'émulateur de turbine éolienne (ETE), la machine synchrone à aimants permanents (MSAP), le système inertiel de stockage d'énergie (SISE).

Puis dans une deuxième partie, le simulateur éolien est présenté. Le comportement d'une éolienne à vitesse variable est reproduit avec une machine à courant continu qui simule le couple exercé par la turbine éolienne. La génératrice synchrone à aimants est reliée au réseau par l'intermédiaire d'un système à doubles convertisseurs.

Enfin, une troisième partie nous permettra de présenter quelques relevés expérimentaux de la régulation des tensions composées aux bornes de condensateurs d'un filtre LC triphasé sans régulation des courants dans la self triphasée. Ceci avec l'aide d'un onduleur de tension, d'abord en enclenchant une charge triphasée équilibrée et purement résistive et ensuite en créant un déséquilibre en retirant une phase de la charge. Les correcteurs sont des correcteurs résonants ayant une transmittance adaptée.

Chapitre 7

Présentation du banc d'essai

Cette plate-forme, dont la description est présentée à la figure 7.1, comporte quatre parties : un Émulateur de Turbine Éolienne (ETE), représentant le comportement d'une turbine éolienne réelle, une Machine Synchrone à Aimants Permanents (MSAP) dont le fonctionnement en génératrice permet de convertir l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique, un Système Inertiel de Stockage d'Énergie (SISE) et la Connexion Au Réseau (CAR) 230 V de cet ensemble de production d'énergie triphasé de notre laboratoire, assurée par un filtre LC. Tous les convertisseurs à Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) utilisés sur cette plate-forme sont identiques, de marque SEMIKRONTM, construits autour d'IGBT 1200V/50A. Les interfaces de commande et de mesure associées à chaque convertisseur sont réalisées respectivement sur un modèle unique, offrant ainsi un aspect modulaire à ce banc d'essai.

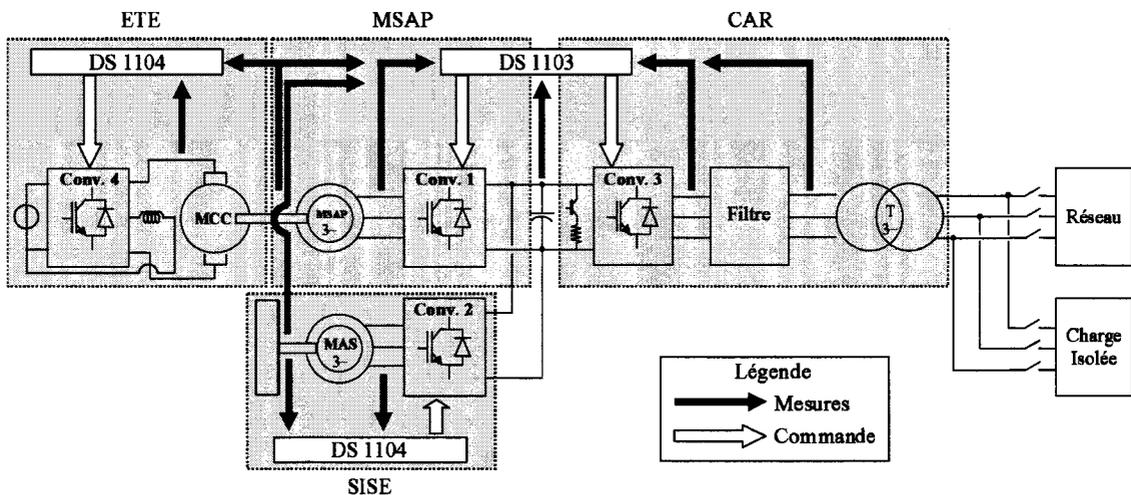


FIG. 7.1 – Présentation de la plate-forme expérimentale.

7.1 L'Émulateur de Turbine Éolienne : ETE

La base de cet émulateur est une Machine à Courant Continu (MCC) de 3 kW, 1500 tr/min, alimentée par un convertisseur à MLI (Conv.4) : l'induit de la machine par deux bras du convertisseur (hacheur quatre quadrants) et l'excitation par le troisième bras. Ce dernier point a son importance, car lorsque le banc sera amené à travailler à puissance nominale, il sera nécessaire

de réduire l'excitation de la MCC afin de lui faire atteindre des vitesses proches de 3000 tr/min, vitesse de fonctionnement nominal de la machine synchrone. La commande de cet ensemble est assurée par une carte dSPACETM 1104 (PowerPC603e/TI DSPTMS320F240). Une interface de commande est placée entre cette carte et les drivers des IGBT, afin d'adapter les signaux présentés ou reçus des organes de commande (ordre de commutation et signaux d'erreur) et de réaliser de façon matérielle les ordres complémentaires de commutation des interrupteurs. Une interface de mesure composée d'un capteur de tension et de trois capteurs de courant LEMTM permet les relevés nécessaires à la commande de la machine. Enfin, une mesure de vitesse est réalisée grâce à un codeur incrémental implanté sur la MSAP, connecté à un port dédié sur la carte DS 1104.

7.2 La Machine Synchrone à Aimants Permanents : MSAP

La MSAP (2,8 kW/3000 tr/min) comporte trois paires de pôles. Elle est entraînée mécaniquement par la MCC émulant la turbine éolienne. L'énergie qu'elle fournit est envoyée vers le bus de tension continue de 400 V, constitué de condensateurs associés en série et en parallèle, offrant une capacité équivalente de 3300 μF et une tension maximale de 800 V. Ce transit de puissance est réalisé via un convertisseur MLI commandé par une carte dSPACETM 1103 (PowerPC604e/TI DSPTMS320F240). Un codeur incrémental est nécessaire à la capture de la vitesse de la génératrice. Celui-ci est directement connecté à un slot dédié sur le bornier d'extension de la carte DS1103.

7.3 Le Système Inertiel de Stockage d'Énergie : SISE

Le SISE est constitué d'une Machine Asynchrone (MAS) de 3kW, 1500 tr/min reliée au bus de tension continue 400 V par un convertisseur MLI. Ce dernier est contrôlé par une carte dSPACETM 1104 (PowerPC603e/TI DSPTMS320F240). La mesure de vitesse est effectuée grâce à un codeur incrémental connecté à un slot dédié sur le bornier d'extension de la carte DS1104. Cette MAS entraîne un volant d'inertie de 40 kg, 0,2 kg.m², pouvant tourner à une vitesse maximale de 3000 tr/min.

7.4 La connexion au réseau : CAR

Cet ensemble de production d'énergie est connecté au réseau triphasé 230 V du laboratoire via un convertisseur MLI et un transformateur, entre lesquels s'insère un filtre triphasé. A ce jour, celui-ci est de type L, constitué de trois inductances de 3 mH chacune. Il est prévu de lui substituer, à terme, un filtre de type LC, pour deux raisons : la première étant d'assurer une certaine qualité d'énergie renvoyée au réseau, et donc de recourir au filtrage d'harmoniques générés par les convertisseurs MLI ; la seconde étant de permettre à ce banc de débiter sur une charge isolée, ce qui impose à cette plate-forme de fonctionner en générateur de tension, capable d'assurer l'amplitude et la fréquence de la tension fournie.

Chapitre 8

L'émulateur éolien

8.1 Implantation

La MCC et la MSAP, accouplées mécaniquement, sont de caractéristiques différentes (respectivement 3kW,1500 tr/min et 2,8 kW,3000 tr/min). La figure 8.1 montre la structure globale de la commande implantée sur le banc d'essai.

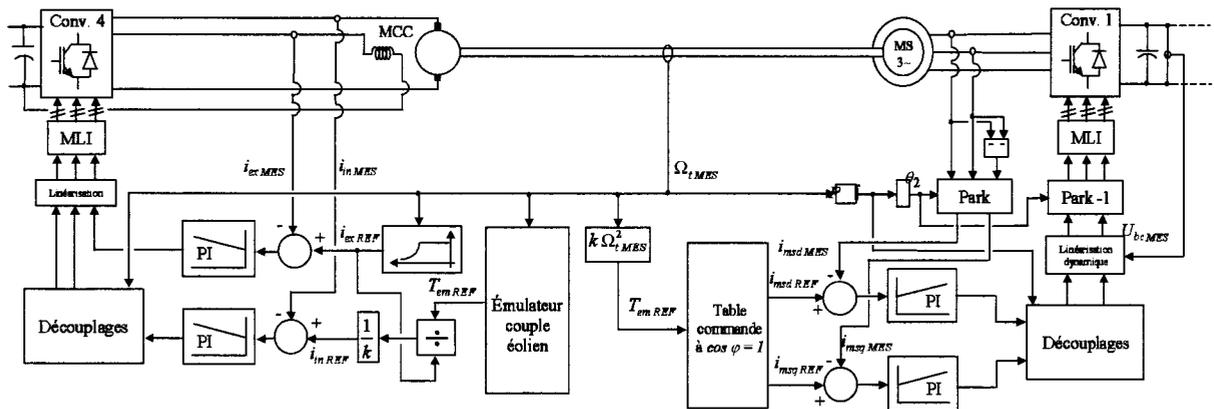


FIG. 8.1 – Commande implantée pour simuler un générateur éolien.

8.1.1 Commande en couple de la machine à courant continu

Il est nécessaire d'envisager une régulation du courant d'excitation de la MCC, afin de réduire le flux produit par son inducteur, et de permettre ainsi un fonctionnement en survitesse (vitesse supérieure à 1500 tr/min). Le couple électromagnétique de la MCC est réglé en régulant le courant d'induit.

Afin de simuler le comportement de la turbine éolienne, il est nécessaire de déterminer le couple que cette dernière exerce sur l'arbre mécanique. Le schéma bloc de la figure 8.1 est introduit afin d'élaborer la consigne du couple électromagnétique permettant de reproduire sur l'arbre mécanique de la MCC le couple d'une turbine éolienne. L'expression du couple est obtenue à partir des équations 1.6 et 1.7, et de la courbe du coefficient de couple représentée à la figure 1.3(b). Le bloc $v = f(t)$ est un tableau numérique reprenant des valeurs de vents faibles, moyen ou fort mesurées sur un site réel. Dans notre cas, il s'agit du site éolien de Dunkerque.

8.1.2 Commande en couple de la machine synchrone à aimants permanents

Parmi les stratégies de commande vectorielle appliquées à une machine synchrone, celle qui consiste à imposer une référence du courant direct i_{dms} à zéro est la plus répandue. Le couple électromagnétique est réglé simplement en agissant sur le courant en quadrature i_{qms} . Cette stratégie de commande, qui permet de réduire les pertes joules, détériore le facteur de puissance de la machine selon l'importance de la saillance. Le couple de référence de la commande de la machine synchrone est élaboré en considérant un fonctionnement au maximum de puissance :

$$T_{emMSAPREF} = \left(\frac{\rho\pi R_t^5 C_{pmax}}{2\lambda_{OPT}^3} \right) \Omega^2 \quad (8.1)$$

avec :

λ_{OPT} = correspondant à la valeur optimum du ratio de vitesse donnant la valeur maximum du coefficient de puissance (C_{pmax}).

8.2 Résultats

Les figures 8.2 et 8.3 montrent les résultats expérimentaux du simulateur éolien. On peut voir de haut en bas, sur la figure 8.2, la vitesse du vent considérée, la vitesse de rotation de la machine à courant continu et le courant d'induit qui est régulé. La figure 8.3 montre de haut en bas, la vitesse de rotation de la machine synchrone à aimants (qui est la même que celle de la machine à courant continu), la puissance produite par la machine (dans le cas du fonctionnement à puissance maximale), la puissance renvoyée au réseau et la tension du bus continu qui est régulée à 400 V.

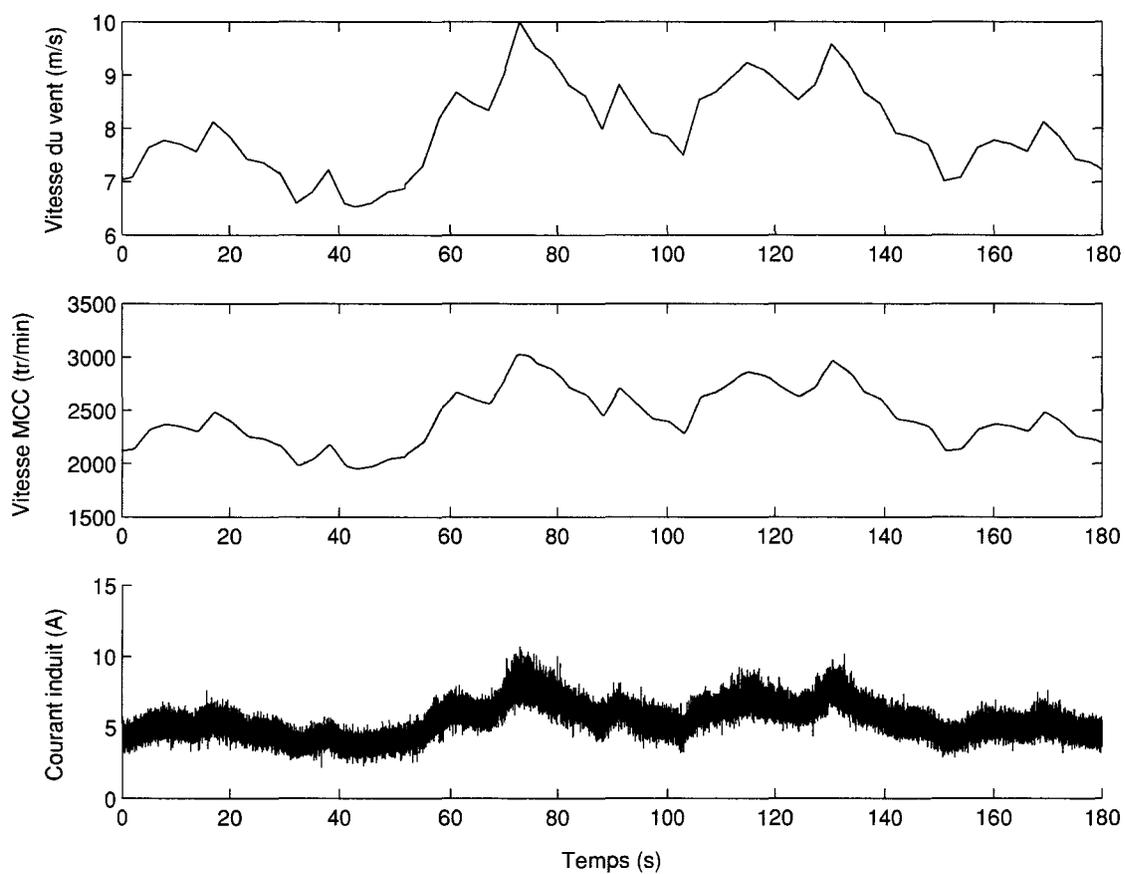


FIG. 8.2 – Expérimentation du simulateur éolien : vitesse du vent, vitesse de la machine à courant continu et courant dans l'induit de la machine à courant continu.

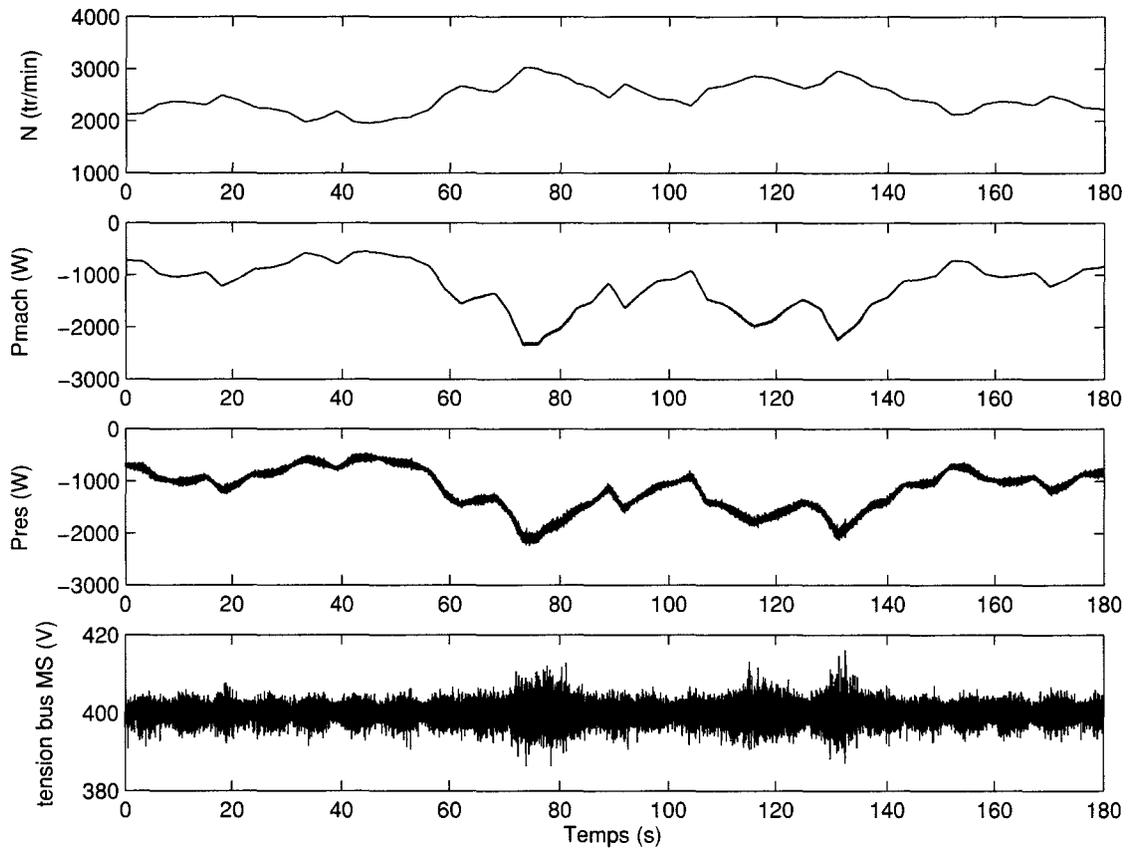


FIG. 8.3 – Expérimentation du simulateur éolien : vitesse de rotation de l'arbre, puissance de la machine synchrone, puissance renvoyée au réseau et tension du bus continu.

Chapitre 9

Contrôle des tensions par correcteurs résonnants

9.1 Implantation

Le schéma d'implantation est représenté à la figure 9.1. il s'agit de la commande directe avec correcteurs résonnants. L'inductance L_f est de 8 mH et la capacité C_f est de $55\text{ }\mu\text{F}$. La fréquence MLI est fixée à 1 kHz .

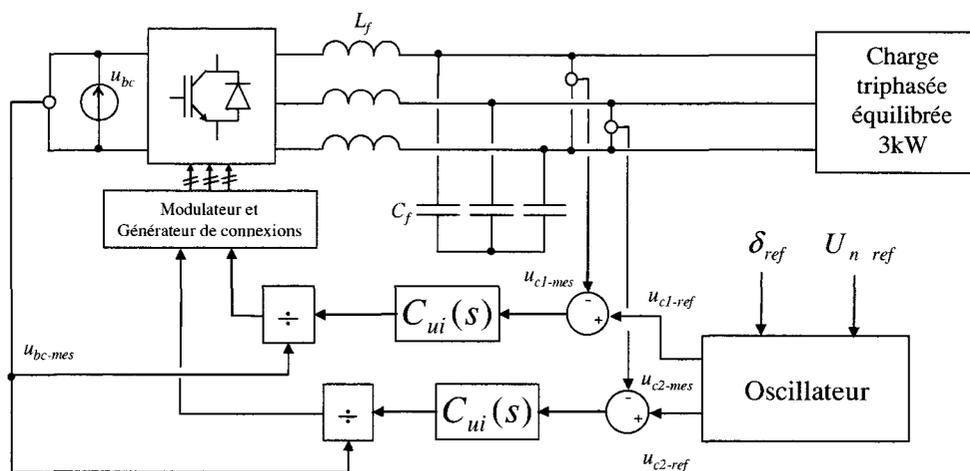


FIG. 9.1 – Schéma de l'implantation temps réel.

9.2 Résultats

La figure 9.2 montre un résultat expérimental lors d'un enclenchement de charge de 3 kW (puissance nominale du banc d'essai). Les figures 9.2(a) et 9.2(b) montrent respectivement les tensions composées u_{c1} et u_{c2} mesurées et de référence aux bornes des condensateurs. La figure 9.2(c) montre l'évolution des courants i_{f1} , i_{f2} et i_{f3} dans la bobine triphasée qui ne sont pas régulés.

La figure 9.3 montre un résultat expérimental lors de la perte de la phase 2 quand la charge de 3 kW est connectée. Les figures 9.3(a) et 9.3(b) montrent respectivement les tensions compo-

sées u_{c1} et u_{c2} mesurées et de référence aux bornes des condensateurs. La figure 9.3(c) montre l'évolution des courants i_{f1} , i_{f2} et i_{f3} dans la bobine triphasé qui ne sont pas régulés.

Au regard des résultats expérimentaux, les tensions aux bornes des condensateurs sont bien régulées malgré l'enclenchement brutal de la charge et malgré le déséquilibre.

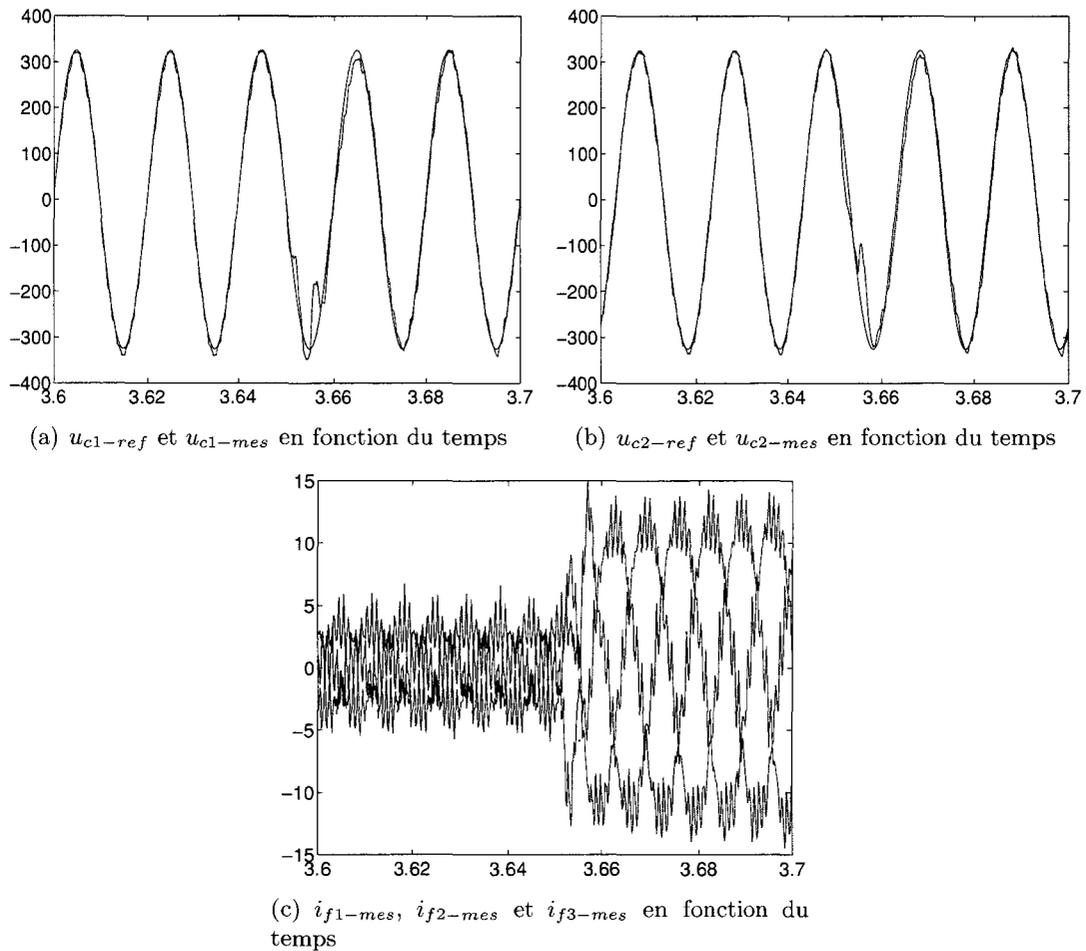


FIG. 9.2 – Expérimentation du contrôle des tensions composées aux bornes des condensateurs : tensions composées u_{c1} et u_{c2} lors de l'enclenchement d'une charge équilibrée de 3 kW.

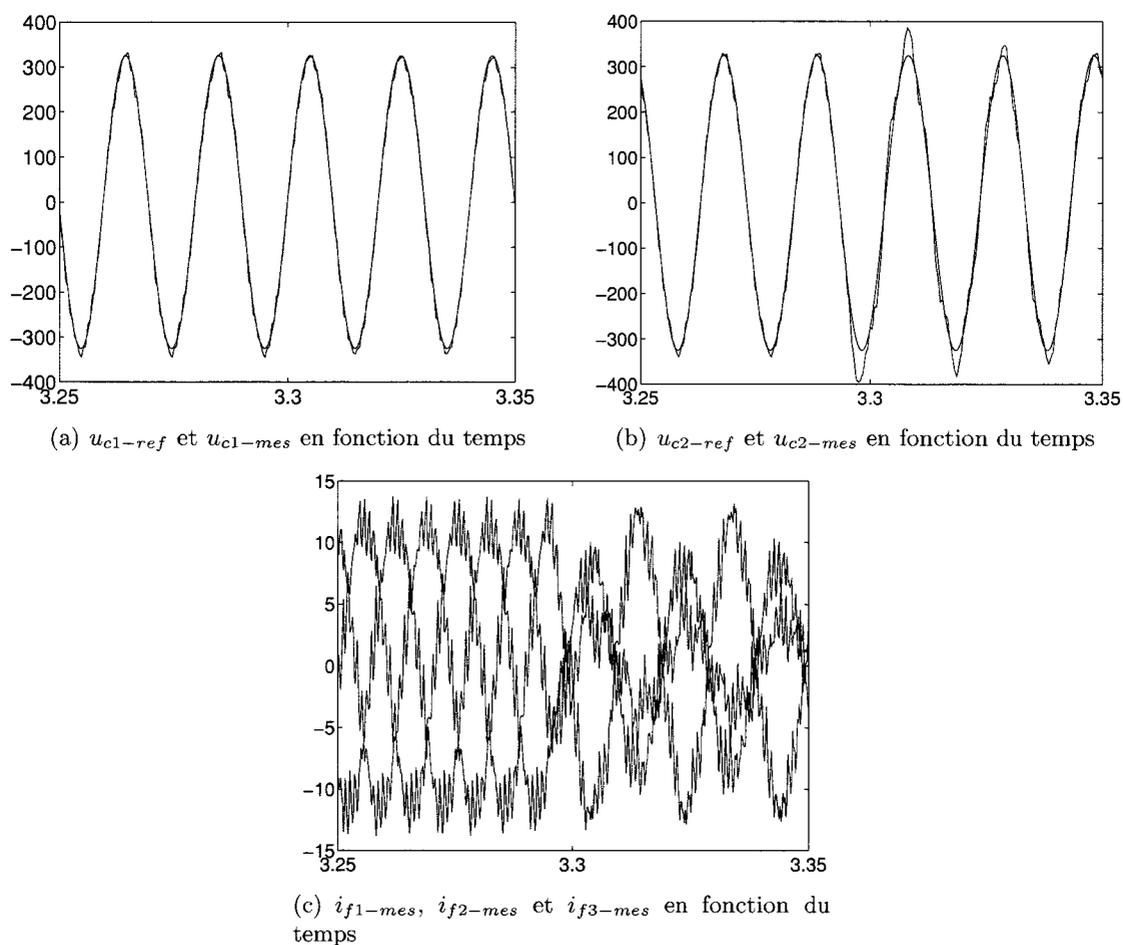


FIG. 9.3 – Expérimentation du contrôle des tensions composées aux bornes des condensateurs : tensions composées u_{c1} et u_{c2} lors d'un déséquilibre de la charge de 3 kW correspondant à la perte de la phase 2.

Conclusion de la troisième partie

Comme nous venons de le voir, cette plate-forme d'essais a permis d'expérimenter, en temps réel, le comportement d'une éolienne à vitesse variable reliée au réseau alternatif ainsi que le fonctionnement d'un onduleur de tension dont le rôle principal est d'alimenter des charges.

Dans une première partie, il a été fait une description physique et matérielle du banc.

Puis dans une deuxième partie, le simulateur éolien a été présenté. Le comportement d'une éolienne à vitesse variable a été reproduit avec une machine à courant continu qui simule le couple exercé par la turbine éolienne. La génératrice synchrone à aimants est reliée au réseau par l'intermédiaire d'un système à doubles convertisseurs.

Enfin, une troisième partie nous a permis de présenter quelques relevés expérimentaux de la régulation des tensions composées aux bornes de condensateurs d'un filtre LC triphasé sans régulation des courants dans la self triphasée. Ceci avec l'aide d'un onduleur de tension, d'abord en enclenchant une charge triphasée équilibrée et purement résistive et ensuite en créant un déséquilibre en retirant une phase de la charge. Les correcteurs sont des correcteurs résonants ayant une transmittance adaptée.

Conclusion générale

Nous avons dans le cadre de ce travail, établi dans un premier temps la structure d'un système de stockage inertielle permettant de lisser une puissance variable et dans un deuxième temps la structure d'une source autonome de génération d'énergie susceptible d'assurer des services systèmes. Cette dernière est composée d'une éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents couplée électriquement, par un bus de tension continue, à un système de stockage inertielle, l'ensemble étant raccordé soit à un réseau passif soit à un réseau actif.

Le modèle de la turbine éolienne associé à un système de limitation de vitesse par orientation des pales a été comparé avec des mesures effectuées sur une éolienne à vitesse fixe de 300 kW située à Dunkerque. On peut citer les travaux de [24] dans lesquels un modèle similaire est utilisé. Le modèle ainsi validé a pu être utilisé pour modéliser la chaîne de conversion d'énergie d'une éolienne à vitesse variable. La stratégie de commande développée permet d'extraire le maximum de la puissance sans mesure de la vitesse du vent et ou seules les caractéristiques nominales de la turbine sont utiles pour élaborer la stratégie de commande en couple. Ce type de commande se retrouve dans [8], [42], [34], [41]. L'originalité de la commande de l'éolienne à vitesse variable est qu'elle permet d'extraire n'importe quelle puissance tant que le vent le permet en partie grâce au système de limitation de vitesse qui empêche alors l'emballement de la turbine sous l'action d'un vent trop fort.

Bien que techniquement difficilement réalisable pour des applications de grande puissance, l'utilisation de l'inertie de la turbine éolienne comme forme de stockage reste néanmoins originale. On optera plutôt pour une forme de stockage par masse tournante plus classique. Cependant, d'après le cahier des charges fixé pour un système de stockage composé uniquement d'un volant d'inertie, il apparaît que l'inertie nécessaire est trop grande pour être techniquement réalisable. C'est donc par l'association en parallèle de plusieurs petits systèmes de stockage que l'on pourra répondre à ce cahier des charges.

Il a été vu proposé, dans le cadre de ce travail, une structure de raccordement d'un onduleur de tension sur base d'un élément LCL. Les stratégies de commande développées ont montré que l'onduleur pouvait créer soit une source de tension soit une source de courant. Il apparaît que le fonctionnement en source de courant est idéal pour un raccordement à un réseau puissant et que le fonctionnement en source de tension est idéal pour l'alimentation de charges isolées. Cependant, nous avons vu qu'il était possible d'utiliser le fonctionnement en source de tension sur un réseau puissant et même de coupler plusieurs onduleurs en parallèle afin qu'ils se répartissent la charge. Il sera intéressant à l'avenir de tester le comportement du fonctionnement en source de tension en présence d'un réseau actif avec défauts. La commande développée permet d'alimenter des charges triphasées déséquilibrées mais n'est, pour l'instant, pas adaptée aux charges non-linéaires. Il se posera alors la question de la répartition des harmoniques entre onduleurs couplés en parallèle. on peut citer les travaux des couplages d'onduleurs en parallèle : [39], [10], [7], [55], [14], [6], [54].

Il a été présenté deux chaînes de conversion d'énergie, l'une, destinée à améliorer l'intégration d'éoliennes, et l'autre, susceptible d'assurer des services systèmes. La démarche qui a permis d'aboutir à ces choix propose un formalisme REM de niveau hiérarchique supérieur qui permet de déterminer la structure de la commande pour créer la source de tension, autrement dit de réguler la tension aux bornes du condensateur du bus continu suivant son niveau d'énergie. La régulation du bus continu permet également, par une compensation, d'assurer le transit de puis-

sance d'un système à l'autre.

L'algorithme de commande développé pour un système de stockage d'énergie permet de lisser une puissance variable tout en prenant en compte la variable de flux (vitesse de rotation dans le cas du stockage inertiel) afin que cette dernière n'arrive à saturation. L'algorithme permet également de compenser un éventuel déséquilibre afin que la charge paraisse équilibrée du point de vue du réseau. Cet algorithme permet aussi un fonctionnement en filtre actif dans la mesure où les correcteurs de courants sont adaptés pour un bon suivi de la consigne. Il a été montré, au travers d'une application à une éolienne à vitesse fixe, qu'il est important de tenir compte de l'état du niveau de stockage afin d'éviter une saturation du système. Pour cela, la puissance de référence du système de stockage est alors fonction de la vitesse de rotation du volant d'inertie.

La stratégie de commande développée pour le système de génération autonome vise à déterminer les puissances de référence de chacun des systèmes afin d'assurer un bon fonctionnement du système de génération autonome appelée "source". Les résultats de simulation sont très prometteurs et se pose maintenant la question de la centralisation de telles sources afin d'optimiser la gestion des niveaux de stockage et par conséquent la gestion des flux d'énergie. On pourrait encore imaginer des éoliennes à vitesse variable fonctionnant en "esclave" en association avec ces sources de génération autonomes. La stratégie de commande qui a été présentée dans cette partie peut donc être développée davantage afin, par exemple, de pouvoir générer le maximum de puissance lorsque la source est connectée au réseau surtout lorsque le système de stockage tend vers la limite haute. Ou encore, de pouvoir se répartir la puissance réactive entre sources au moyen d'un statisme tension - puissance réactive.

La plate-forme d'essais a permis d'expérimenter, en temps réel, le comportement d'une éolienne à vitesse variable reliée au réseau alternatif ainsi que le fonctionnement d'un onduleur de tension dont le rôle principal est d'alimenter des charges. Le comportement d'une éolienne à vitesse variable a été reproduit avec une machine à courant continu qui simule le couple exercé par la turbine éolienne. On présente également dans le cadre de l'expérimentation, la régulation des tensions composées aux bornes de condensateurs d'un filtre LC triphasé sans régulation des courants dans la self triphasée. Ceci avec l'aide d'un onduleur de tension, d'abord en enclenchant une charge triphasée équilibrée et purement résistive et ensuite en créant un déséquilibre en retirant une phase de la charge.

Bibliographie

- [1] A. BOUSCAYROL, X. GUILLAUD, J.-P. HAUTIER et P. DELARUE – « Macro modélisation des conversions électromécaniques. application à la commande des machines électriques », *Revue Internationale de Génie Electrique* **3** (2000), no. 2, p. 257–282.
- [2] E. S. ADBIN et W. XU – « Control design and dynamic performance analysis of a wind turbine-induction generator unit », *IEEE Transactions on Energy Conversion* **vol. 15** (2000), no. 1.
- [3] P. BASTARD et M. MEUNIER – « Le réglage fréquence-puissance dans un réseau d'énergie », *La revue 3EI* **vol. 6** (1996), p. 3–9.
- [4] P. BAUER, S. DE HAAN et M. DUBOIS – « Wind energy and offshore windparks : State of the art and trends », *EPE-PEMC 2002*, 2002.
- [5] P. BORNE, G. DAUPHIN-TANGUY, J. RICHARD, F. ROTELLA et I. ZAMBETTAKIS – *Analyse et régulation des processus industriels*, Méthodes et pratiques de l'ingénieur, vol. Tome 1 Régulation continue, EDITIONS TECHNIP, 1993.
- [6] U. BORUP, F. BLAABJERG et P. N. ENJETI – « Sharing of nonlinear load in parallel-connected three-phase converters », *IEEE Transactions on Industry Applications* **vol. 37** (2001), no. 6, p. 1817–1823.
- [7] U. BORUP, P. N. ENJETI et F. BLAABJERG – « A new space-vector-based control method for ups systems powering nonlinear and unbalanced loads », *IEEE Transactions on Industry Applications* **vol. 37** (2001), no. 6, p. 1864–1870.
- [8] A. BOUSCAYROL et P. DELARUE – « Simplifications of the maximum control structure of a wind energy conversion system with an induction generator », *International Journal of Renewable Energy Engineering* **4** (2002), no. 2, p. 479–485.
- [9] M. BUDINGER, D. LERAY et Y. DEBLEZER – « Eoliennes et vitesse variable », *La revue 3EI* **vol. 21** (2000), p. 79–84.
- [10] S. BUSO, S. FASOLO et P. MATTAVELLI – « Uninterruptible power supply multiloop control employing digital predictive voltage and current regulators », *IEEE Transactions on Industry Applications* **vol. 37** (2001), no. 6, p. 1846–1854.
- [11] R. CARDENAS, R. PENA, G. ASHER et J. CLARE – « Control strategies for enhanced power smoothing in wind energy systems using a flywheel driven by a vector-controlled induction machine », *IEEE transactions on industrial Electronics* **vol. 48** (2001), no. 3.
- [12] R. CHEDID, F. MRAD et M. BASMA – « Intelligent control of a class of wind energy conversion systems », *IEEE Transactions on Energy Conversion* **vol. 14** (1999), no. 4.
- [13] P.-T. CHENG, S. BHATTACHARYA et D. DIVAN – « Operations of the dominant harmonic active filter (dhaf) under realistic utility conditions », *IEEE Transactions on Industry Applications* **vol. 37** (2001), no. 4, p. 1037–1044.

- [14] E. COELHO, P. CORTIZO et P. GARCIA – « Small-signal stability for parallel-connected inverters in stand-alone ac supply systems », *IEEE Transactions on Industry Application* vol. **38** (2002), no. 2.
- [15] M. CRAPPE, J.-M. DELINCÉ, D. GEORGES, N. HADJSAID, N. JANSSENS, A. ROBERT et J. TRÉCAT – *Commande et régulation des réseaux électriques*, LAVOISIER, 2003.
- [16] M. DUBOIS – « Review of electromechanical conversion in wind turbines », *Faculty ITS*, April 2000.
- [17] H. FOCH, F. FOREST et T. MEYNARD – « Onduleurs de tension, mise en oeuvre », *Techniques de l'ingénieur*, vol. D3 177.
- [18] N. HATZIARGYRIOU, M. DONNELLY, S. PAPATHANASSIOU, J. A. P. LOPES, M. TAKASAKI, H. CHAO, J. USAOLA, R. LASSETER et A. EFTHYMIADIS – « Modeling new forms of generation and storage », *CIGRE TECHNICAL BROCHURE*, June 2000.
- [19] E. HAU – *Wind turbines*, Springer, 2000.
- [20] J.-P. HAUTIER et J.-P. CARON – *Systèmes automatiques, tome 2, commande des processus*, éditions ellipses, 1997.
- [21] J.-P. HAUTIER et J. P. CARON – *Convertisseurs statiques, méthodologie causale de modélisation et de commande*, TECHNIP, 1999.
- [22] S. HURTADO, G. GOSTALES, A. DE LARA, N. MORENO, J. CARRASCO, E. GALVAN, J. SANCHEZ et L. FRANQUELO – *A new power stabilization control system based on making use of mechanical inertia of a variable-speed wind-turbine for stand-alone wind-diesel applications*, IECON, 2002.
- [23] D. JOVICIC – « Phase locked loop system for facts », *IEEE Transactions on Power Systems* vol. **18** (2003), no. 3, p. 1116–1124.
- [24] C. KANA, M. THAMODOHARAN et A. WOLF – « System management of a wind-energy converter », *IEEE on Power Electronics* vol. **16** (2001), no. 3.
- [25] S. KJAER, G. ANDERSEN, C. KLUMPNER et F. BLAABJERG – « Control aspects of a lcl grid-connected green power inverter », *Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics*, August 2002.
- [26] F. LABRIQUE, H. BUYSE, G. SÉGUIER et R. BAUSIÈRE – *Les convertisseurs de l'électronique de puissance, commande et comportement dynamique*, Les convertisseurs de l'électronique de puissance, vol. Volume 5, TECHNIQUE et DOCUMENTATION - LAVOISIER, 1998.
- [27] F. LABRIQUE, G. SEGUIER et R. BAUSIÈRE – *Les convertisseurs de l'électronique de puissance, la conversion continu - alternatif*, vol. Tome 4, 2ème édition, TECHNIQUE et DOCUMENTATION - LAVOISIER, 1995.
- [28] R. LAWRENCE, K. CRAVEN et G. NICHOLS – « Flywheel ups », *IEEE Industry Applications magazine*, May/June 2003.
- [29] L. LECLERCQ – *Modélisation et simulation d'un stabilisateur cinétique de réseau associé à une éolienne et un générateur diesel*, Mémoire de dea, Université des Sciences et Technologies de Lille (USTL), avril-septembre 2001.
- [30] L. LECLERCQ et B. ROBYNS – « Autonomous high power variable speed wind generator system », *EPE* (Toulouse, France), September 2003.

-
- [31] L. LECLERCQ, B. ROBYNS et J.-M. GRAVE – « Fuzzy logic based supervisor of a flywheel energy storage system associated with wind and diesel generators », *OPTIM* (Brasov, Romania), International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, May 2002.
- [32] L. LECLERCQ, C. SAUDEMONT, B. ROBYNS, G. CIMUCA et M. RADULESCU – « Flywheel energy storage system to improve the integration of wind generators into a network », *Electromotion* (Marrakesh, Morocco), November 2003.
- [33] P. LECONTE, M. RAPIN et E. SZECHENYI – « Eoliennes », *Techniques de l'ingénieur*, vol. BM 4640, 2001.
- [34] R. LEIDHOLD, G. GARCIA et M. VALLA – *Maximum efficiency control for variable speed wind driven generators with speed and power limits*, IECON, 2002.
- [35] G. MANESSE – « Transformateurs statiques, principes et fonctionnement », *Techniques de l'ingénieur*, vol. D3 050.
- [36] G. MANESSE – « La puissance réactive instantanée », *La revue 3EI* vol. **23** (2000), p. 69–75.
- [37] A. MARQUET, C. LEVILLAIN, A. DAVRIU, S. LAURENT et P. JAUD – « Stockage d'électricité dans les systèmes électriques », *Techniques de l'ingénieur*, vol. D 4030.
- [38] J. MARTIN – « Energies éoliennes », *Techniques de l'ingénieur*, vol. B 8585.
- [39] P. MATTAVELLI – « Synchronous-frame harmonic control for high-performance ac power supplies », *IEEE Transactions on Industry Applications* vol. **37** (2001), no. 3, p. 684–872.
- [40] M. MAZAHARI, V. SCAINI et W. E. VEERKAMP – « Cause, effects, and mitigation of ripple from rectifiers », *IEEE Transactions on Industry Applications* vol. **39** (2003), no. 4, p. 1187–1192.
- [41] E. MULJADI et C. P. BUTTERFIELD – « Pitch-controlled variable-speed wind turbine generation », *IEEE Transactions on Industry Applications* vol. **37** (2001), no. 1, p. 240–246.
- [42] A. NERIS, N. VOVOS et G. GIANNAKOPOULOS – « A variable speed wind energy conversion scheme for connection to weak ac grid », *IEEE Transactions on Energy Conversion* vol. **14** (1999), no. 1.
- [43] C. NICHITA, D. LUCAS, B. DAKYO et E. CEANGA – « Large band simulation of the wind speed for real time wind turbine simulators », *IEEE Transaction on Energy Conversion* vol. **17** (2002), no. 4, p. 523–529.
- [44] S. PAPATHANASSIOU et M. PAPADOPOULOS – « Mechanical stresses in fixed-speed wind turbines due to network disturbances », *IEEE Transactions on Energy Conversion* vol. **16** (2001), no. 4.
- [45] J.-L. PHILIPPE – « Hélices aériennes », *Techniques de l'ingénieur*, vol. BM 4540.
- [46] J. PIERQUIN, B. VULTURESCU, A. BOUSCAYROL et J.-P. HAUTIER – « Behaviour model control structures for an electric vehicle », *EPE* (2001).
- [47] R. POLLANEN, A. TARKIAINEN, M. NIEMELA et J. PYRHONEN – « Supply voltage sensorless reactive power control of dtc modulation based line converter with l- and lcl- filters », *EPE 2003*, 2003.
- [48] C. RAMOS, A. MARTINS, A. ARAUJO et A. CARVALHO – *Current control in the grid connection of the double-output induction generator linked to a variable speed wind turbine*, IECON, 2002.

- [49] J. L. RODRIGUEZ-AMENEDO, S. ARNALTE et J. C. BURGOS – « Automatic generation control of a wind farm with variable speed wind turbines », *IEEE Transactions on Energy Conversion* **vol. 17** (2002), no. 2.
- [50] I. SCHIEMENZ et M. STIEBLER – « Maximum power point tracking of a wind energy system with a permanent-magnet synchronous generator », *ICEM*, August 2000.
- [51] J. SLOOTWEG, S. DE HAAN, H. POLINDER et W. KLING – « General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations », *IEEE Transactions on Power Systems* **vol. 18** (2003), no. 1.
- [52] G. STRAVRAKAKIS et G. KARINIOTAKIS – « A general simulation algorithm for the accurate assesment of islated diesel - wind turbines systems interaction », *IEEE Transactions on Energy Conversion* **vol. 10** (1995), no. 3.
- [53] T. THIRINGER – « Grid-friendly connecting of constant-speed wind turbines using external resistors », *IEEE Transactions on Energy Conversion* **vol. 17** (2002), no. 4.
- [54] A. TULADHAR, H. JIN, T. UNGER et K. MAUCH – « Control of parallel inverters in distributed ac power systems with consideration of line impedance effect », *IEEE Transactions on Industry Applications* **vol. 36** (2000), no. 1, p. 131–137.
- [55] G. E. VALDERRAMA, A. M. STANKOVIC et P. MATTAVELLI – « Dissipativity-based adaptive and robust control of ups in unbalanced operation », *IEEE Transactions on Power Electronics* **vol. 18** (2003), no. 4, p. 1056–1062.

Annexe A

Modélisation des éléments communs

A.1 Rappel sur la transformation de Park

La transformation de Park est un outil mathématique qui a permis la simplification des équations des machines électriques triphasées. Elle permet de passer d'un système triphasé alternatif à un système diphasé continu. Les commandes vectorielles des machines électriques sont issues de leur modèles diphasés.

A.1.1 Passage du repère triphasé au repère de Park

Le passage dit dans le repère "dq" d'un système triphasé x_1 , x_2 et x_3 s'écrit :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} = [P] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

Avec :

$$[P] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

$[P]$ est appelée "matrice de Park" et l'angle θ indique la vitesse de rotation du repère ($\theta = \omega t$).

A.1.2 Passage du repère de Park au repère triphasé

A l'inverse, pour le retour à un système triphasé on utilise la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = [P]^{-1} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

Avec :

$$[P]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

$[P]^{-1}$ est appelée "matrice de Park inverse".

A.1.3 Propriétés de la transformation de Park

Le produit des matrices de Park et Park inverse donne la matrice identité $[I]$:

$$[P][P]^{-1} = [I] \quad (\text{A.5})$$

Autre propriété importante utilisée dans le développement des modèles différentiels dans le repère de Park :

$$[P] \frac{d[P]^{-1}}{dt} = [P] \frac{d[P]^{-1}}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

On remarquera également que pour $\theta = 0$:

$$[P] = [C] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{A.7})$$

$$[P]^{-1} = [C]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{A.8})$$

Ou $[C]$ est appelée matrice de Concordia.

A.1.4 Interprétation de la transformation de Park

La figure A.1(a) représente la machine réelle avec stator triphasé et mouvement relatif entre stator et rotor. La figure A.1(b) montre la machine équivalente avec les composantes de Concordia. La stator est alors diphasé avec les deux axes α et β en quadrature. Là encore, il y a mouvement relatif entre le stator et le rotor. La figure A.1(c) représente la machine équivalente avec les composantes de park. Les axes d et q sont fixes par rapport au rotor ($\theta = p\Omega t$).

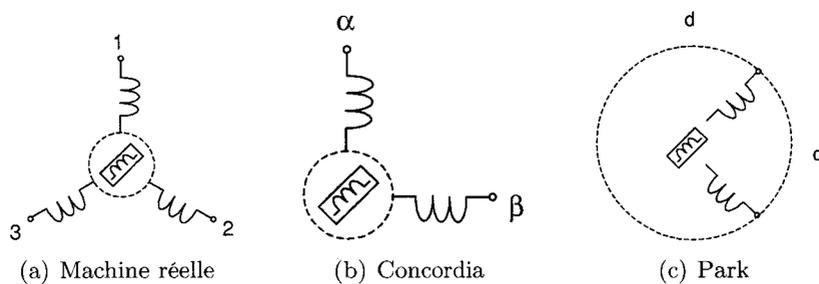


FIG. A.1 – Interprétation de la transformation de Park sur une machine électrique.

A.1.5 Application à une source de tension triphasée parfaite

On considère un réseau électrique représenté par une source de tension triphasée parfaite caractérisée par 3 sources de même valeur efficace V et de même pulsation ω . Le système de tension est supposé équilibré ($v_1 + v_2 + v_3 = 0$) et s'écrit de la manière suivante :

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = V\sqrt{2} \begin{bmatrix} \sin(\omega t - \delta) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \delta) \\ \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \delta) \end{bmatrix} \quad (\text{A.9})$$

δ étant un angle déterminant l'emplacement de l'axe des temps. En utilisant la transformation de Park avec $\theta = \omega t$, on obtient l'image du système de tension triphasé dans le repère de Park :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = -V\sqrt{3} \begin{bmatrix} \sin \delta \\ \cos \delta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.10})$$

La figure A.2 représente le repère "dq" tournant à la vitesse ω . Le vecteur tension d'amplitude $V\sqrt{3}$ est référencé par rapport à v_1 et l'angle δ représente un retard. En règle générale, lorsque l'on simule une source de tension triphasée, on considère δ nul, laissant le vecteur tension uniquement représenté par l'axe "q".

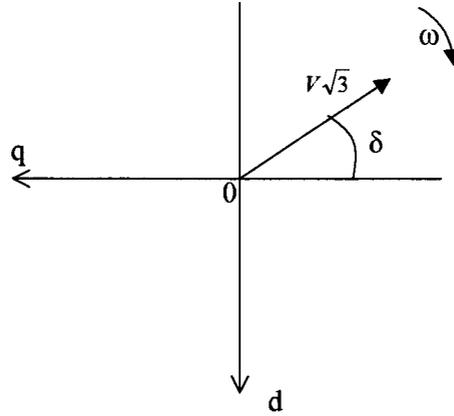


FIG. A.2 – Placement du repère de Park

On verra qu'en pratique il est important de tenir compte de cet angle afin de bien placer le repère "dq" sur l'origine de la tension simple v_1 [ref tech de l'ing]. L'angle δ peut être déterminé comme suit :

$$\delta = \arctan\left(\frac{v_d}{v_q}\right) \quad (\text{A.11})$$

Au regard de la figure A.2 on notera la relation importante entre la valeur efficace V et les composantes dans le repère de Park :

$$3V^2 = v_d^2 + v_q^2 \quad (\text{A.12})$$

Le réseau électrique est considéré comme une source de tension triphasée parfaite qu'il convient de rapporter dans le repère de Park :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -V\sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (\text{A.13})$$

A.2 La Représentation Énergétique Macroscopique (REM)

La Représentation Énergétique Macroscopique (REM) est un outil graphique basé sur le principe d'action-réaction [8], [1], [46]. Les éléments de base de la REM, au nombre de 3, sont :

- les sources d'énergie,
- les éléments de conversion,
- les éléments d'accumulations.

En ce qui concerne les variables, on peut les classer suivant deux catégories utilisées dans la modélisation par bond-graphs :

- variables d'effort e .
- variables de flux f .

Ainsi, la tension aux bornes d'une self est une variable d'effort et le courant qui la traverse est une variable de flux (encore appelée grandeur d'état).

A.2.1 Aspects de la modélisation avec la REM

Les sources d'énergie

Les sources d'énergie sont représentées en un cercle ovale de couleur verte. Elles peuvent être génératrice ou réceptrice. Le figure A.3 représente deux types de source, l'une étant source de flux (figure A.3(a)) et l'autre source d'effort (figure A.3(b)).

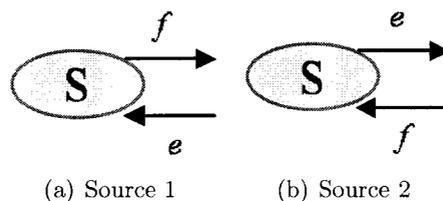


FIG. A.3 – REM des sources énergétiques.

Les éléments de conversion

Les éléments de conversion assurent la conversion de l'énergie sans accumulation d'énergie et sont représenté en orange. La figure A.4 montre trois éléments de conversion de différente nature :

- un élément de conversion électrique (figure A.4(a)) qui peut être un onduleur de tension par exemple,
- un élément de conversion électromécanique (figure A.4(b)) qui est une partie de machine électrique,
- et un élément de conversion mécanique (figure A.4(c)) qui peut être une boîte de vitesse par exemple.

La variable r est une grandeur de réglage.

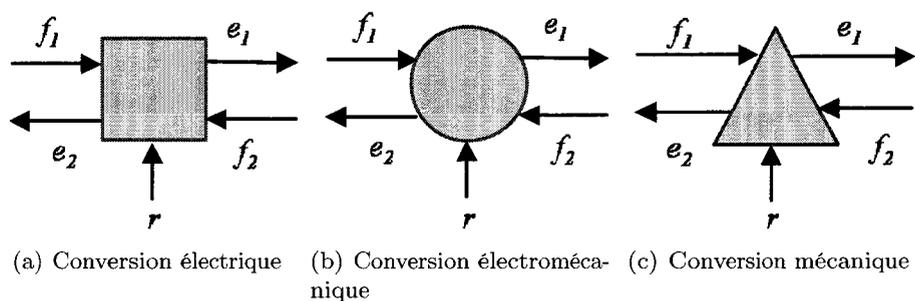


FIG. A.4 – REM des éléments de conversion.

Les éléments d'accumulation

Les éléments d'accumulation sont représentés par des rectangles bleus barrés et sont naturellement sources de flux comme le montre la figure A.5. Il peut s'agir d'une bobine, d'un condensateur ou encore d'une masse tournante.

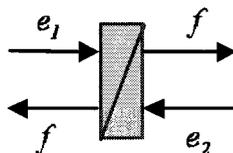


FIG. A.5 – REM d'un élément d'accumulation.

A.2.2 Un formalisme pour la commande

en plus de proposer une modélisation basée sur le principe d'action-réaction montrant l'interaction entre les différentes variables de flux et d'effort, le REM permet, par inversion des éléments de conversion et d'accumulation, de déterminer la structure de la commande maximale.

Inversion des éléments de conversion

La figure A.6 montre le principe d'inversion des éléments de conversion. Ceci permet de contrôler soit une variable d'effort via la grandeur de réglage r (figures A.6(a) et A.6(b)) soit d'estimer une variable de flux à condition de connaître la grandeur de réglage (figures A.6(c) et A.6(d)).

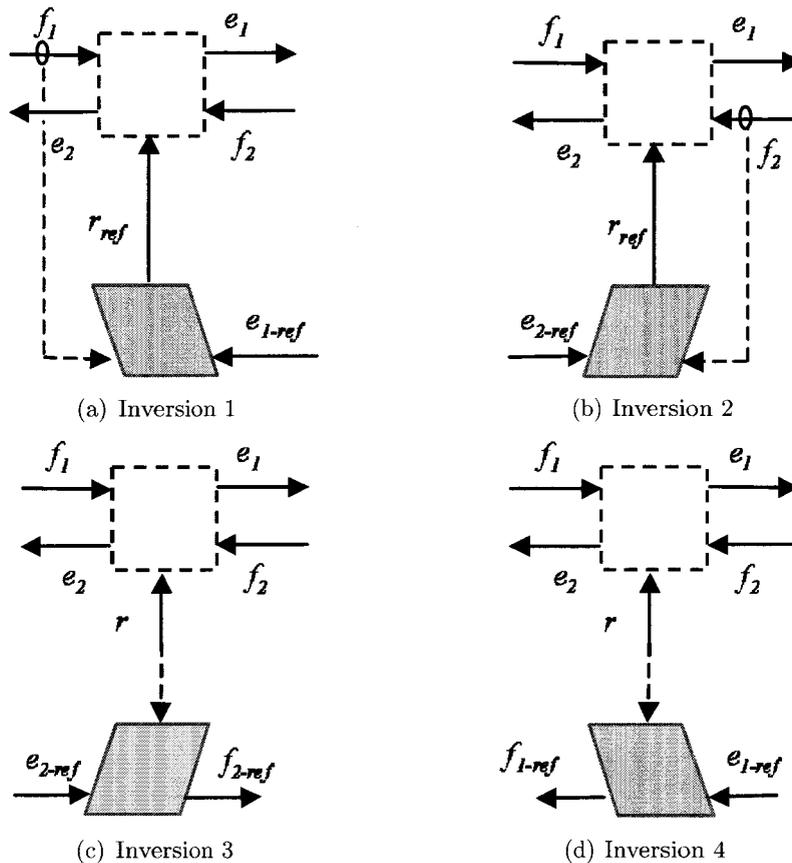


FIG. A.6 – Inversion d'un élément de conversion.

Inversion des éléments d'accumulation

La figure A.7 montre le principe d'inversion d'un élément d'accumulation permettant de contrôler la variable de flux. Ceci implique la présence d'un correcteur adapté pour une bonne régulation de la consigne en raison du caractère causal de l'élément d'accumulation.

A.3 Modèles des machines électriques

Les machines électriques ont été modélisées en convention récepteur.

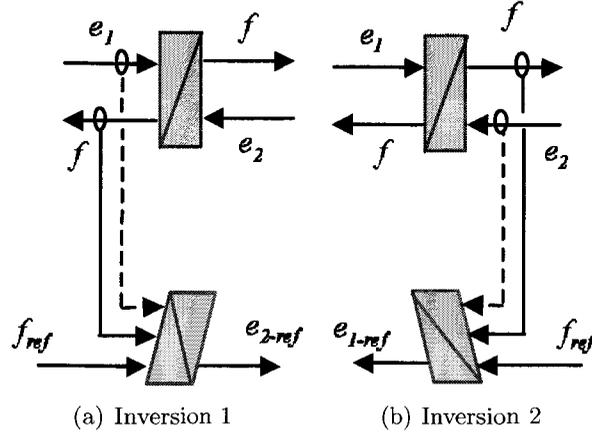


FIG. A.7 – Inversion d'un élément d'accumulation.

A.3.1 La machine asynchrone

On utilisera le modèle de la machine asynchrone à cage dans le repère de Park. Les flux et les courants sont donnés par les équations suivante :

$$\frac{d\psi_{rd}}{dt} = -\frac{R_r}{L_r}\psi_{rd} + (\omega_{dq} - p\Omega)\psi_{rq} + \frac{MR_r}{L_r}i_{sd} \quad (\text{A.14})$$

$$\frac{d\psi_{rq}}{dt} = -(\omega_{dq} - p\Omega)\psi_{rd} - \frac{R_r}{L_r}\psi_{rq} + \frac{MR_r}{L_r}i_{sq} \quad (\text{A.15})$$

$$\frac{di_{sd}}{dt} = \frac{MR_r}{\sigma L_s L_r^2}\psi_{rd} + \frac{Mp\Omega}{\sigma L_s L_r}\psi_{rq} - \frac{R_{sr}}{\sigma L_s}i_{sd} + \omega_{dq}i_{sq} + \frac{1}{\sigma L_s}u_{sd} \quad (\text{A.16})$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = -\frac{Mp\Omega}{\sigma L_s L_r}\psi_{rd} + \frac{MR_r}{\sigma L_s L_r^2}\psi_{rq} - \omega_{dq}i_{sd} - \frac{R_{sr}}{\sigma L_s}i_{sq} + \frac{1}{\sigma L_s}u_{sq} \quad (\text{A.17})$$

Avec :

- L_s : inductance propre cyclique statorique,
- L_r : inductance propre cyclique rotorique,
- M : mutuelle inductance cyclique,
- $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$: coefficient de dispersion,
- R_s : résistance d'un enroulement statorique,
- R_r : résistance d'un enroulement rotorique,
- $R_{sr} = R_s + \frac{M^2}{L_r^2}R_r$,
- ψ_{rd} : flux totalisé rotorique d'axe d,
- ψ_{rq} : flux totalisé rotorique d'axe q,
- i_{sd} : courant statorique d'axe d,
- i_{sq} : courant statorique d'axe q,
- u_{sd} : tension statorique d'axe d,
- u_{sq} : tension statorique d'axe q,
- p : le nombre de paire de pôles,
- ω_{dq} : pulsation du repère dq dans lequel est modélisé la machine asynchrone,
- Ω : vitesse mécanique de l'arbre.

Le couple électromagnétique est donné par :

$$T_{em} = \frac{pM}{L_r} (\psi_{rd}i_{sq} - \psi_{rq}i_{sd}) \quad (\text{A.18})$$

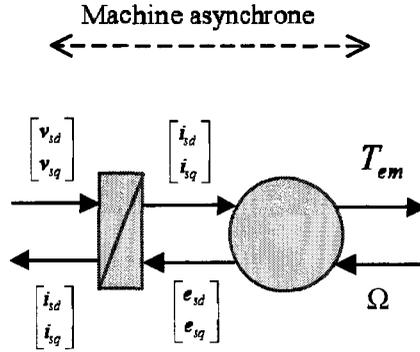


FIG. A.8 – Représentation Énergétique Macroscopique de la machine asynchrone.

A.3.2 La machine synchrone à aimants permanents

On utilisera le modèle de la machine synchrone à aimants permanents avec saillance dans le repère de Park. Les équations donnant les courant statoriques sont les suivantes :

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d} (v_d + p\Omega L_q i_q - R_s i_d) \quad (\text{A.19})$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q} (v_q - p\Omega L_d i_d - R_s i_q - p\Omega k_t) \quad (\text{A.20})$$

Avec :

- i_d, i_q : courants statoriques dans le repère de Park,
- v_d, v_q : tensions statoriques dans le repère de park,
- R_s : résistance statorique,
- L_d : inductance statorique d'axe "d",
- L_q : inductance statorique d'axe "q",
- k_t : constante d'aimantation,
- p : nombre de paires de pôles de la machine synchrone,
- Ω : vitesse mécanique de l'arbre.

Le couple électromagnétique est donné par :

$$T_{em} = p(k_t i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (\text{A.21})$$

A.3.3 La machine à courant continu

Les équations de la machine à courant continu sont les suivantes :

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} (u - Ri - k_{ex} \Omega) \quad (\text{A.22})$$

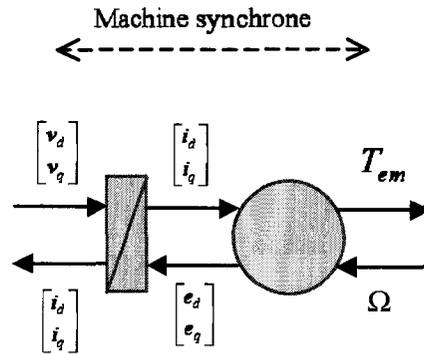


FIG. A.9 – Représentation énergétique macroscopique de la machine synchrone à aimants permanents.

$$\frac{di_{ex}}{dt} = \frac{1}{L_{ex}} (u_{ex} - R_{ex}i_{ex}) \quad (\text{A.23})$$

Avec :

- i , courant d'induit,
- i_{ex} , courant de l'excitation,
- u , tension d'induit,
- u_{ex} , tension de l'excitation,
- R , résistance d'induit,
- L , inductance d'induit,
- R_{ex} , résistance de l'excitation,
- L_{ex} , inductance de l'excitation.

Le couple est déterminé par l'équation suivante :

$$T_{em} = ki_{ex}i \quad (\text{A.24})$$

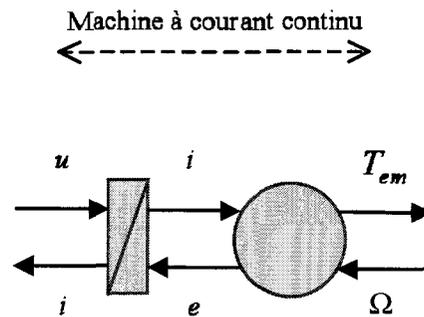


FIG. A.10 – Représentation énergétique macroscopique de la machine à courant continu.

A.4 Modélisation de la transmission mécanique

La transmission mécanique se résume à l'équation suivante :

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} \sum \text{couples} \quad (\text{A.25})$$

Avec :

- J , inertie totale de l'arbre en rotation,
- Ω , vitesse de rotation de l'arbre.

La figure A.11 montre le schéma bloc d'une transmission mécanique dans lequel on voit apparaître la non linéarité du couple dû aux frottements sec et visqueux.

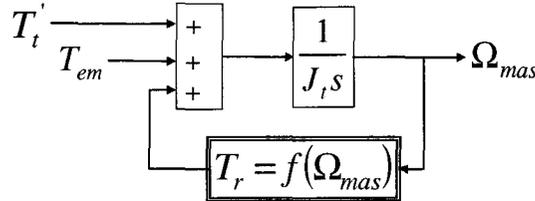


FIG. A.11 – Schéma bloc de la transmission mécanique

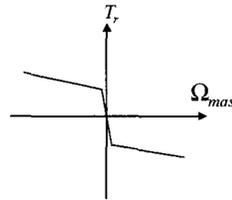


FIG. A.12 – Allure des frottements secs et visqueux

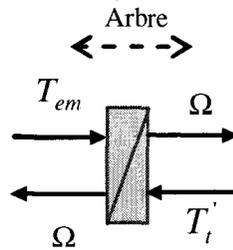


FIG. A.13 – REM de la transmission mécanique.

A.5 Modèles continus équivalents des onduleurs de tension

Le convertisseur à modéliser est représenté figure A.14. Il s'agit d'un onduleur de tension triphasé.

Les ordres de base complémentaires des interrupteurs sont définis par une Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) déterminant deux niveaux de tension pour la tension modulée $v_a - v_0$ comme le montre la figure A.15. La tension $v_a - v_0$ est obtenue par comparaison de la porteuse triangulaire ξ avec le signal de référence u_{wa} [26].

En supposant que le signal de référence varie peu durant une période MLI, autrement dit, dans l'hypothèse d'avoir une fréquence MLI très supérieure à la fréquence du signal de référence,

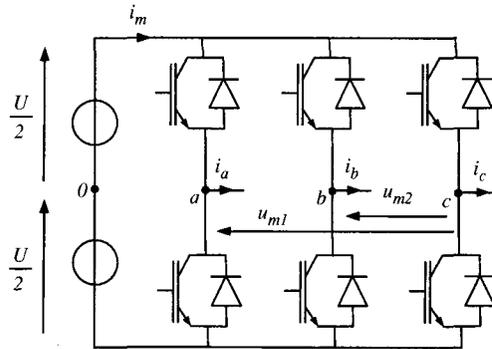


FIG. A.14 – Convertisseur 3/2 à modéliser.

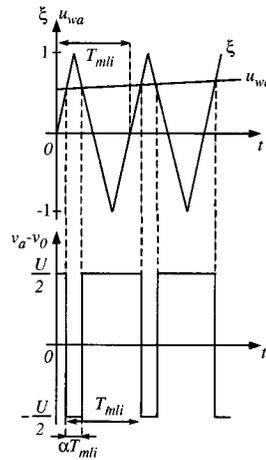


FIG. A.15 – Comparaison d'une porteuse triangulaire ξ avec un signal de référence u_{wa} .

on calcule la valeur moyenne de la tension modulée sur une période MLI (T_{mli}) :

$$\overline{v_a - v_0} = \frac{1}{T_{mli}} \int_0^{T_{mli}} (v_a - v_0) dt = \frac{1}{T_{mli}} \left[-\frac{U}{2} \alpha T_{mli} + \frac{U}{2} (1 - \alpha) T_{mli} \right] = \frac{U}{2} (1 - 2\alpha) \quad (\text{A.26})$$

Toujours dans l'hypothèse que le signal de référence varie peu durant une période MLI, les deux premières intersections de la porteuse triangulaire $\xi(t)$ avec le signal de référence $u_{wa}(t)$ donnent :

$$u_{wa} = 1 - 2\alpha \quad (\text{A.27})$$

Avec l'équation A.27, la valeur moyenne de la tension modulée de l'équation A.26 est alors fonction du signal de référence :

$$\overline{v_a - v_0} = \frac{U}{2} u_{wa} \quad (\text{A.28})$$

Il en va de même pour les phases "b" et "c" et on peut écrire sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \overline{v_a - v_0} \\ \overline{v_b - v_0} \\ \overline{v_c - v_0} \end{bmatrix} = \frac{U}{2} \begin{bmatrix} u_{wa} \\ u_{wb} \\ u_{wc} \end{bmatrix} \quad (\text{A.29})$$

Pour obtenir une relation entre les courants i_a , i_b , i_c et le courant modulé i_m (défini figure A.14), on établit un bilan de puissance de chaque côté du convertisseur en négligeant les pertes dans celui-ci :

$$U i_m = \begin{bmatrix} v_a - v_0 & v_b - v_0 & v_c - v_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{A.30})$$

Soit en remplaçant $v_a - v_0$, $v_b - v_0$ et $v_c - v_0$ dans A.30 par leur valeur moyenne A.29, on obtient :

$$i_m = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} u_{wa} & u_{wb} & u_{wc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{A.31})$$

A.5.1 Modèle en tension composées

Dans un système triphasé sans distribution du neutre, la somme des courants est nulle et la somme des tensions composées est nulle également [35]. Deux des trois grandeurs suffisent alors pour modéliser un système triphasé de ce type, la troisième se déduisant des deux premières [21].

Au regard de la figure A.14, les tensions composées s'écrivent :

$$\begin{bmatrix} u_{m1} \\ u_{m2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_a - v_c \\ v_b - v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (v_a - v_0) - (v_c - v_0) \\ (v_b - v_0) - (v_c - v_0) \end{bmatrix} \quad (\text{A.32})$$

Pour établir le modèle continu équivalent, on va remplacer $v_a - v_0$, $v_b - v_0$ et $v_c - v_0$ dans A.32 par leur valeur moyenne respective établies en A.29, ce qui donne pour l'équation donnant les tensions modulées côté alternatif :

$$\begin{bmatrix} u_{m1} \\ u_{m2} \end{bmatrix} = u_{bc} \begin{bmatrix} \frac{u_{wa} - u_{wc}}{2} \\ \frac{u_{wb} - u_{wc}}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{A.33})$$

En établissant le bilan de puissance de chaque côté du convertisseur, on obtient l'équation donnant le courant modulé côté continu :

$$i_{mr} = \begin{bmatrix} \frac{u_{wa} - u_{wc}}{2} & \frac{u_{wb} - u_{wc}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \end{bmatrix} \quad (\text{A.34})$$

On notera le lien entre les grandeurs $\frac{u_{wa} - u_{wc}}{2}$ et $\frac{u_{wb} - u_{wc}}{2}$ et les fonctions de conversion m_1 et m_2 développées par [21].

A.5.2 Modèle dans le repère de Park

Les machines étant modélisées dans le repère de Park, on utilisera un modèle continu équivalent également dans le repère de Park [26]. Les courants sont liés par la relation :

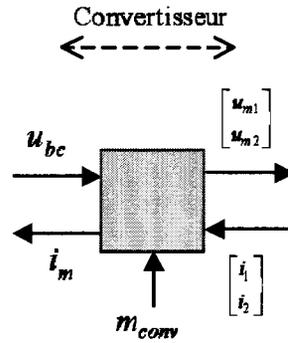


FIG. A.16 – REM du convertisseur dans le repère abc.

$$i_{me} = \begin{bmatrix} \frac{v_{wd}}{2} & \frac{v_{wq}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \quad (\text{A.35})$$

Avec :

- i_{sd} et i_{sq} : image des courants triphasés dans le repère de Park,
- i_{me} : courant modulé dans le bus continu,
- v_{wd} et v_{wq} : image des tensions de référence u_{wa} , u_{wb} et u_{wc} dans le repère de Park.

Pour les tensions, on obtient :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = u_{bc} \begin{bmatrix} \frac{v_{wd}}{2} \\ \frac{v_{wq}}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{A.36})$$

Avec :

- v_{sd} et v_{sq} : image des tensions $\overline{v_a - v_0}$, $\overline{v_b - v_0}$ et $\overline{v_c - v_0}$ dans le repère de Park,
- u_{bc} : tension du bus continu.

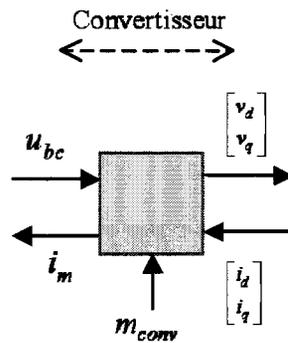


FIG. A.17 – REM du convertisseur dans le repère de Park.

Annexe B

Contrôle commande des systèmes

Cette annexe présente la commande en couple des machines électriques utilisées dans le cadre de ce travail : la machine asynchrone, la machine synchrone et la machine à courant continu. Cette annexe présente également la synthèse du correcteur résonnant utilisé pour réguler des grandeurs alternatives telles que courants et tension de l'élément LCL utilisé pour raccorder l'onduleur de tension au réseau.

B.1 Commande des machines électriques

B.1.1 Commande en couple de la machine synchrone à aimants permanents

Le schéma bloc de la commande est représenté figure B.1. Il a été obtenu par inversion du schéma bloc de la machine synchrone. Cette commande dispose de deux régulateurs de courants : Le courant d'axe "d" est régulé suivant une référence nulle et le courant d'axe "q" est régulé suivant la référence du couple électromagnétique.

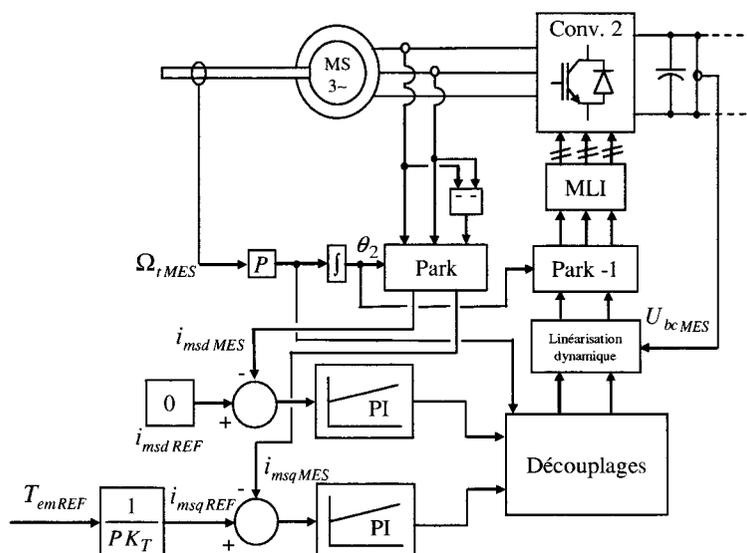


FIG. B.1 – Architecture de la commande de la machine synchrone.

B.1.2 Commande en couple de la machine asynchrone

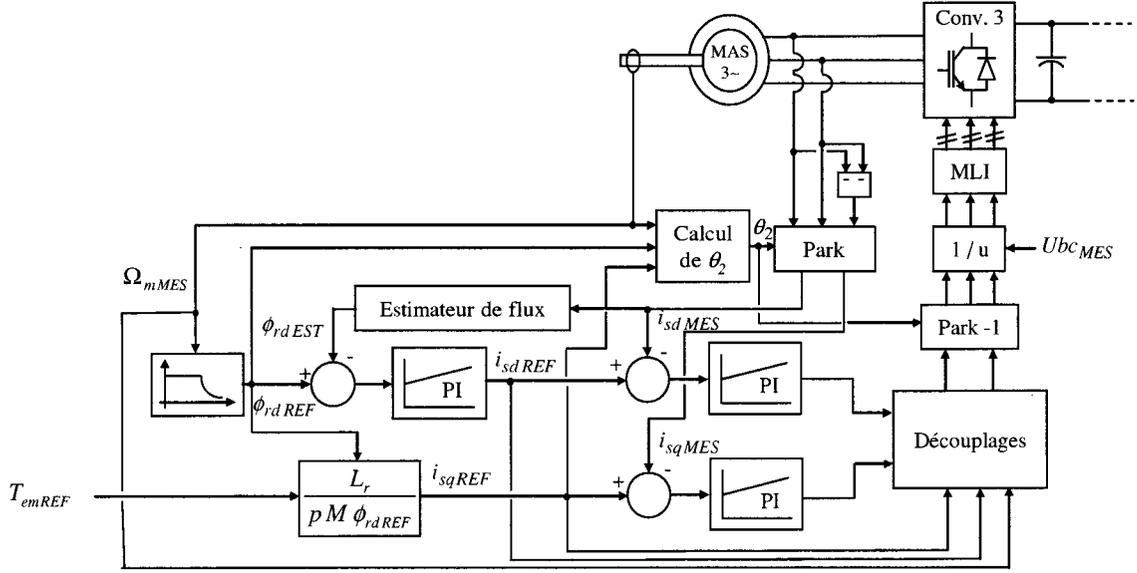


FIG. B.2 – Architecture de la commande de la machine asynchrone.

Le schéma bloc de la commande est représenté figure B.2. Il a été obtenu par inversion du schéma bloc de la machine asynchrone en considérant $\psi_{rq} = \frac{d\psi_{rq}}{dt} = 0$, autrement dit en considérant une commande dans le repère du champ tournant ($\omega_p = \omega$). Dans ce cas, les équations de la machine asynchrone deviennent :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{rd} \\ i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_r}{L_r} & \frac{MR_r}{L_r} & 0 \\ \frac{MR_r}{\sigma L_s L_r^2} & -\frac{R_{sr}}{\sigma L_s} & \omega_p \\ -\frac{MP\omega_m}{\sigma L_s L_r} & -\omega_p & -\frac{R_{sr}}{\sigma L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{rd} \\ i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} \quad (\text{B.1})$$

Les courants i_{sdREF} et i_{sqREF} pour la commande rapprochée comme le montre la figure B.2 sont déterminés par le régulateur de flux pour le courant d'axe d et par la référence du couple électromagnétique pour le courant d'axe q. Le courant d'axe q est déterminé par inversion de l'équation A.18 en considérant $\psi_{rq} = 0$. Comme il est difficile de mesurer un flux, on estime celui ci à partir de l'équation suivante :

$$\psi_{rdEST}(s) = \frac{M}{1 + \frac{L_r}{R_r}s} i_{sdMES}(s) \quad (\text{B.2})$$

s étant l'opérateur de Laplace. Une mesure du courant d'axe d permet alors d'obtenir une image du flux totalisé dans la machine. Pour le passage dans le repère de Park des grandeurs mesurées et pour le passage inverse des tensions de référence du convertisseur, la pulsation statorique est estimée par la relation suivante :

$$\omega = P\omega_v + \frac{MR_r}{L_r} \frac{i_{sqREF}}{\psi_{rdREF}} \quad (\text{B.3})$$

B.1.3 Commande en couple de la machine à courant continu

Le schéma bloc de la commande est représenté figure B.3. Il a été obtenu par inversion du schéma bloc de la machine à courant continu. On retrouve une régulation du courant d'induit dont la référence est élaborée à partir des références du couple électromagnétique et du courant d'excitation. Le courant d'excitation est également régulé suivant une référence élaborée à partir de la vitesse de rotation de la machine afin d'éviter une surtension sur l'induit lors d'un fonctionnement à vitesse élevée.

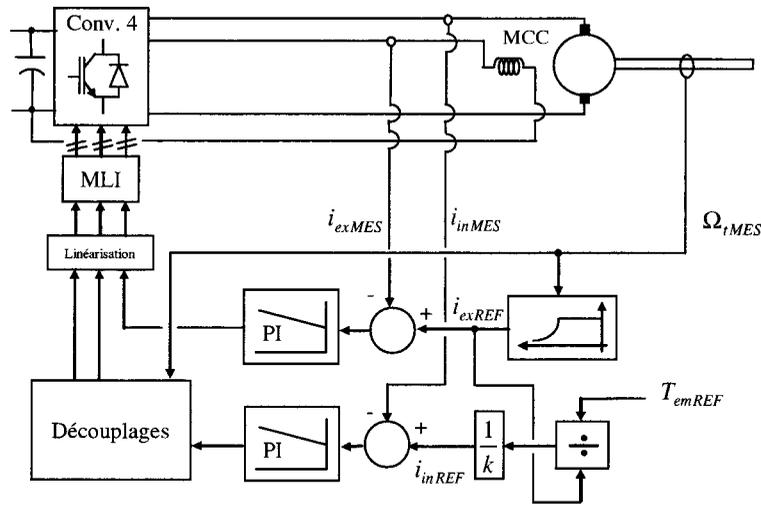


FIG. B.3 – Architecture de la commande de la machine synchrone.

B.2 Synthèse du correcteur résonnant

B.2.1 Principe du correcteur résonnant

La figure B.4 montre un contrôle en boucle fermée classique dans lequel on retrouve la fonction de transfert du système à corriger $H(s)$, le correcteur $C(s)$ et le comparateur donnant $y_{ref}(s) - y(s)$.

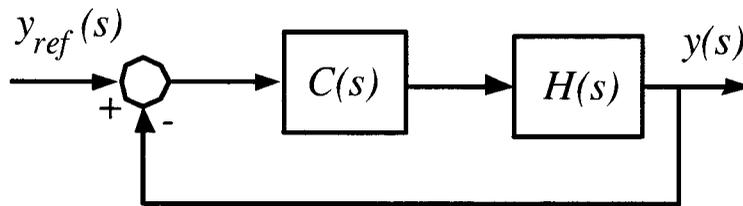


FIG. B.4 – Contrôle en boucle fermée classique.

La transmittance du correcteur résonnant est de la forme :

$$C(s) = \frac{N(s)}{D(s)(\omega^2 + s^2)} \quad (\text{B.4})$$

Si k est le degré du dénominateur de la fonction de transfert $H(s)$, alors on peut écrire :

$$N(s) = \sum_{i=0}^{k+1} n_i s^i \quad (\text{B.5})$$

$$D(s) = \sum_{i=0}^{k-1} d_i s^i \quad (\text{B.6})$$

Dans le cas d'une fonction de transfert du premier ordre du type :

$$H_u(s) = \frac{1}{Cs} \quad (\text{B.7})$$

Le correcteur résonnant aura pour transmittance :

$$C_{u1}(s) = C_{u2}(s) = \frac{n_{u0} + n_{u1}s + n_{u2}s^2}{(d_{u0})(\omega^2 + s^2)} \quad (\text{B.8})$$

Dans le cas d'une fonction de transfert du premier ordre du type :

$$H_i(s) = \frac{1}{Ls + R} \quad (\text{B.9})$$

Le correcteur résonnant aura pour transmittance :

$$C_{i1}(s) = C_{i2}(s) = \frac{n_{i0} + n_{i1}s + n_{i2}s^2}{(d_{i0})(\omega^2 + s^2)} \quad (\text{B.10})$$

Dans le cas d'une fonction de transfert du premier ordre du type :

$$H_{ui}(s) = \frac{1}{LCs^2 + RCs + 1} \quad (\text{B.11})$$

Le correcteur résonnant aura pour transmittance :

$$C_{ui1}(s) = C_{ui2}(s) = \frac{n_{ui0} + n_{ui1}s + n_{ui2}s^2 + n_{ui3}s^3}{(d_{ui0} + d_{ui1}s)(\omega^2 + s^2)} \quad (\text{B.12})$$

B.2.2 Exemple de synthèse du correcteur résonnant

La méthode utilisée pour faire la synthèse du correcteur résonnant s'appelle méthode de la marge généralisée. L'exemple est traité dans le cas d'une fonction de transfert du type :

$$H_{ui}(s) = \frac{1}{3LCs^2 + 3RCs + 1} \quad (\text{B.13})$$

La transmittance du correcteur résonnant est donnée par l'équation B.12. Les coefficients sont calculés en résolvant l'équation de BEZOUT, c'est à dire en identifiant un polynôme $F(s)$ au dénominateur de la fonction de transfert en boucle fermée notée :

$$\frac{y_{ref}(s)}{y(s)} \quad (\text{B.14})$$

Dans notre exemple, le dénominateur de la fonction de transfert en boucle fermée est :

$$\text{den}(Hbf(s)) = (1+3RCs+3LCs^2)(\omega^2+s^2)(d_{ui0}+d_{ui1}s)+n_{ui0}+n_{ui1}s+n_{ui2}s^2+n_{ui3}s^3 \quad (\text{B.15})$$

Le polynôme $F(s)$ est alors d'ordre 5 :

$$F(s) = (s + P + j\omega)(s + P - j\omega)(s + P)(s + P + j\omega_n)(s + P - j\omega_n) \quad (\text{B.16})$$

P est la valeur de la partie réelle de chaque racine du polynôme qui va fixer la marge de stabilité voulue comme le montre la figure B.5 [20]. Les coefficients du correcteur sont alors identifiables :

$$\begin{aligned} d_{ui0} &= (5P - R/L)/(3LC) \\ d_{ui1} &= 1/(3LC) \\ n_{ui0} &= P^5 + P^3(\omega^2 + \omega_n^2) + P\omega^2\omega_n^2 - \omega^2 d_{ui0} \\ n_{ui1} &= 5P^4 + 3P^2(\omega^2 + \omega_n^2) + \omega^2\omega_n^2 - 3RC\omega^2 d_{ui0} - \omega^2 d_{ui1} \\ n_{ui2} &= 10P^3 + 3P(\omega^2 + \omega_n^2) - d_{ui0} - 3LC\omega^2 d_{ui0} - 3RC\omega^2 d_{ui1} \\ n_{ui3} &= 10P^2 + \omega^2 + \omega_n^2 - 3RC\omega^2 d_{ui0} - d_{ui1} - 3LC\omega^2 d_{ui1} \end{aligned} \quad (\text{B.17})$$

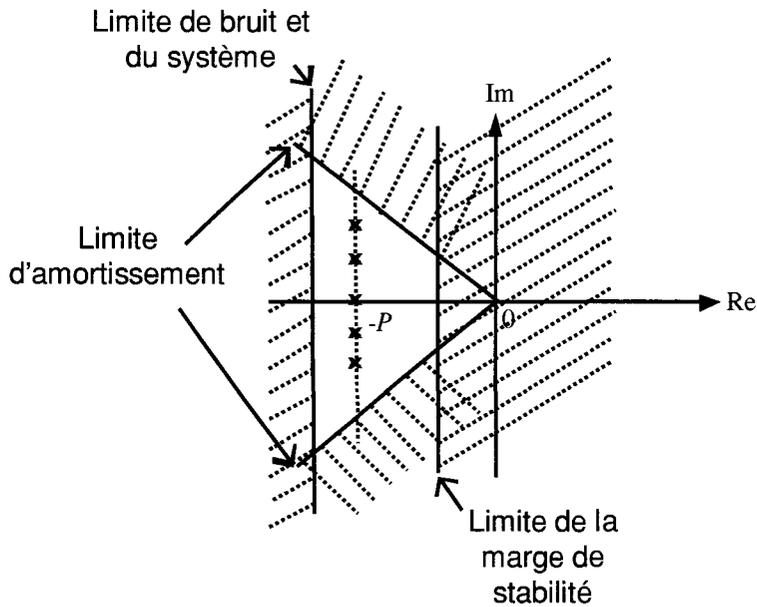


FIG. B.5 – Lieu des pôles.

