

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Electrotechnique

Projet de fin d'études en vue de l'obtention du
diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique

Présenté par :
BOUCHENE Lyes
BOUKADOUM Redouane

Intitulé :

Etude de l'effet du creux de tension sur la machine asynchrone à double alimentation

Promoteurs :

MEKHTOUB Saïd	Professeur	Ecole Nationale Polytechnique
IMADOUCHE Malika	Maitre Assistante A	Université UMM Tizi-Ouzou

Promotion 2013

تقدم هذه الأطروحة دراسة تأثير انخفاضات التوتر الكهربائي على المولد الكهربائي اللامتزامن المزدوج التغذية. بعد تكبير يشمل أنظمة إنتاج الطاقة الهوائية ونموذج المولد الكهربائي اللامتزامن المزدوج التغذية، سنقدم نتائج المحاكاة. اجريت المحاكاة على آلتين ذات طاقات 3.5kW و 300kW . اجريت المحاكاة في النظامين الخطي والمشبع.

الكلمات المفتاح: طاقة هوائية. انخفاض التوتر. مولد. لامتزامن. مزدوج تغذية. نظام خطي. نظام مشبع.

Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude de l'effet du creux de tension sur la machine asynchrone à double alimentation. Après des rappels concernant les systèmes de production d'énergie éolienne et la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation, les résultats de simulation sont présentés. Le travail a porté sur deux machines asynchrones à double alimentation de 3.5kW et 300kW. Nous avons considéré le cas linéaire et le cas saturé.

Mots clés : Eolienne. Creux de tension. MADA. Génératrice. Asynchrone. Double alimentation. Régime linéaire. Régime saturé.

Abstract

This thesis focuses on the study of doubly fed asynchronous generators during voltage dips. Therefore, wind turbines systems and the doubly fed asynchronous machine model have been presented. Following that, we expose our simulation results showing the effects of voltage dips on the DFIG. Simulations have been run for two machines of 3.5kW and 300kW. The study has been done in the linear and in the saturated cases.

Key words: Wind turbine. Voltage dip. DFIG. Generator. Asynchronous. Doubly fed. Linear state. Saturated state.

REMERCIEMENTS

Nous adressons nos plus vifs remerciements à nos promoteurs Said Mekhtoub et Malika Imadouchene qui nous ont orientés tout au long de notre travail.

Nous tenons à remercier les membres du jury qui ont accepté d'examiner ce travail.

Nous tenons aussi à remercier l'ensemble des enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger qui ont contribué à notre formation tout au long de nos cinq années à l'école.

Boukadoum Redouane

Bouchene Lyes

DEDICACES

Je dédie ce travail à mes défunts grands-pères,

A ma mère,

A mon père,

A mon frère Yacine,

A mes sœurs Lina et Racha,

A tous mes amis,

Aux membres du Club d'Activités polyvalentes.

Lyes

DEDICACES

Je dédie ce travail à mes parents,
A ma sœur,
A mes amis,
A mes enseignants de l'Ecole Nationale
Polytechnique.

Redouane

TABLE DES MATIERES

Introduction générale.....	9
Chapitre 1 : Rappels sur les systèmes éoliens	10
Introduction	11
1.1 Définitions	11
1.1.1 L'énergie éolienne.....	11
1.1.2 Evolution de la production mondiale de l'énergie éolienne.....	12
1.1.3 Vent.....	13
1.2 Types d'éoliennes	15
1.2.1 Eoliennes à axe vertical.....	15
1.2.2 Eoliennes à axe horizontal.....	17
1.3 Composants des éoliennes rapides	19
1.4 Modélisation des pâles : bilan de forces	21
1.5 Loi de Betz.....	22
1.6 Conversion électromécanique de l'énergie	25
1.6.1 Générateurs synchrones.....	25
1.6.1.1 Machines à rotor bobiné	26
1.6.1.2 Machines à aimants permanents	27
1.6.2 Générateurs asynchrones.....	28
1.6.2.1 Machines à cage.....	28
1.6.2.2 Machines à rotor bobiné	29
Conclusion.....	31
Chapitre 2 : Modélisation linéaire de la machine asynchrone à double alimentation	32
Introduction	33
2.1 Description de la MADA.....	33
2.1.1 Constitution	33
2.1.2 Intérêt de la MADA	34
2.1.3 Modes de fonctionnement de la MADA	35
2.1.4 Avantages et inconvénients de la MADA.....	37
2.2 Modélisation de la MADA.....	37
2.2.1 Hypothèses simplificatrices	37
2.2.2 Equations DES tensions.....	38
2.2.3 Equations des flux.....	39
2.2.4 Equations mécaniques.....	40
2.3 Modélisation de Park de la machine asynchrone à double alimentation	41
2.3.1 Concept.....	41
2.3.2 Réalisation	41

2.3.3 Equations dans un repère quelconque	43
2.3.4 Choix du repère dq	44
2.3.5 Schémas équivalents de la machine selon les axes d et q.....	46
Conclusion.....	47
Chapitre 3 : Effet des creux de tension sur la MADA - simulations et interprétations.....	48
Introduction	49
3.1 Rappels sur les creux de tension	49
3.1.1 Définitions	49
3.1.2 Classification des creux de tension.....	50
3.2 Modèle Simulink.....	51
3.2.1 Modèle du système.....	51
3.2.1.1 Modèle de la machine.....	51
3.2.1.2 Commande de la machine asynchrone a double alimentation.....	52
3.2.1.3 Variation des paramètres, générateur de creux et mesures	53
3.3 Simulations pour des creux de courte durée.....	54
3.3.1 Simulations pour un creux de 30% d'une durée de 10ms	54
3.3.2 Simulations pour un creux de 80% d'une durée de 10ms	57
3.3.3 Superposition des creux de tension	60
3.3.3.1 Simulations pour des creux de profondeur variable.....	60
3.3.3.2 Simulations pour des creux de durées variables	63
3.3.4 Synthèse.....	67
3.4 Simulations pour des creux de longue durée	72
3.4.1 Simulations pour un creux de 30% et une durée de 2.5s	74
3.4.2 Simulations pour un creux de 70% et une durée de 600ms	77
Conclusion.....	80
Chapitre 4 : Effet des creux de tension sur la MADA en régime saturé.....	81
Introduction	82
4.1 Modélisation de la MADA en régime saturé.....	82
4.1.1 Concept.....	82
4.1.2 Expression des flux.....	83
4.1.2.1 Représentation du flux	83
4.1.2.2 Inductances saturables.....	84
4.2 Simulations et interprétations.....	86
4.2.1 Simulations pour des creux de profondeur variable	86
4.2.2 Comparaison des essais en régime linéaire/saturé	88
Conclusion.....	89
Conclusion générale et perspectives.....	90

LISTE DES SYMBOLES

m : Masse d'air sur les pâles

ρ : Masse volumique de l'air

S : surface balayée par les pâles

V : vitesse du vent

$P_{extraite}$: Puissance extraite à travers les pâles

C_p : Coefficient des puissances

g : glissement

P_m : Puissance mécanique

Ω : vitesse de rotation

θ : Angle entre les enroulements statoriques et rotoriques

V_s : Tension simple statorique

R_s : Résistance statorique

I_s : Courant statorique

Φ_s : Flux statorique

V_r : Tension simple rotorique

R_r : Résistance rotorique

I_r : Courant rotorique

Φ_r : Flux rotorique

L_s : Inductance propre statorique

L_r : Inductance propre rotorique

L_{ss} : Matrice des inductances statoriques

L_{rr} : Matrice des inductances rotoriques

M_{sr}, M_{rs} : Matrices des inductances mutuelles

Γ_e : Couple électromagnétique

P_e : Puissance électromagnétique

Γ_r : Couple résistant

J : Moment d'inertie

θ_s : Abscisse angulaire du référentiel de Park par rapport à l'axe de la phase statorique (A)

θ_r : Abscisse angulaire du référentiel de Park par rapport à la phase rotorique (a).

θ : Angle entre le repère statorique et rotorique

$V_{d,q,s,r}$: Tensions statorique et rotorique simples directe et en quadrature dans le repère de Park

$\Phi_{d,q,r,s}$: Flux statorique et rotorique direct et en quadrature dans le repère de Park

$I_{d,q,s,r}$: Courant statoriques et rotorique direct et en quadrature dans le repère de Park

ω : Pulsation mécanique

ω_s : Pulsation statorique

ω_r : Pulsation rotorique

Φ_m : Flux magnétisant

I_m : Courant magnétisant

M_{st} : Inductance mutuelle statique

M_{dy} : Inductance mutuelle dynamique

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie, sous toutes ses formes, est indispensable à toute activité humaine. La demande augmente constamment et fortement depuis la révolution industrielle. En effet, entre 1973 et 2013, la consommation d'énergie a doublé [1].

Pour répondre à cette demande, les énergies fossiles (pétrole, gaz naturel,...) ont été largement exploitées et représentent 80,4% de la consommation mondiale en énergie [2]. Ces énergies fossiles sont soit utilisées directement (Combustible pour les moyens de transport par exemple) soit pour la production d'énergie électrique (68% de la production électrique mondiale) [3]. Cependant, ces ressources souterraines sont limitées et leur utilisation a un impact très néfaste sur l'environnement (Emission de gaz à effet de serre) ce qui n'en fait pas une option viable à long terme.

Pour répondre à ce double challenge, l'énergie nucléaire a été avancée mais présente de très grands risques liés aux déchets radioactifs, au démantèlement d'anciennes centrales, et surtout, à des populations de plus en plus méfiantes au lendemain de catastrophes nucléaires qui remettent en cause son utilisation (Tchernobyl, Fukushima). L'alternative la plus viable est donc l'utilisation d'énergies renouvelables non polluantes qui permettent la production directe d'électricité et donc de remplacer les énergies fossiles.

Ces énergies renouvelables présentent l'avantage d'être très diversifiées, elles ont une origine hydraulique, solaire, géothermique, éolienne ou de biomasse. Cette diversité est aussi source de défis technologiques pour l'extraction et l'exploitation de ces nouvelles énergies. Il faut obtenir des systèmes plus fiables et optimiser leurs coûts pour qu'on puisse se permettre de reposer largement sur la production d'électricité renouvelable (objectif de 30% d'énergies renouvelables à l'horizon 2030 proposé par l'ONU en 2011) [4].

Dans ce contexte, nous nous intéressons à l'étude de la machine asynchrone à double alimentation qui s'impose comme la génératrice la plus utilisée pour la production d'électricité éolienne. Après des rappels concernant la production d'énergie éolienne et la modélisation de la machine, notre étude portera sur la conséquence d'un défaut sur le réseau, l'apparition de creux de tension, afin de mieux comprendre les phénomènes qui s'y produisent. Cela a une grande importance pour la qualité de l'énergie.

CHAPITRE 1 : RAPPELS SUR LES SYSTEMES EOLIENS

INTRODUCTION

L'énergie électrique est devenue la forme d'énergie par excellence et est sans conteste l'une des plus grandes nécessités de la population mondiale, étant donné son apport à la vie quotidienne, facilitant le transport, modernisant l'industrie, et le chauffage, et ses multiples autres usages.

Cependant, pour bénéficier de cette énergie il est nécessaire de la « capter », de la « créer », ou de la « transformer », en considérant que l'énergie dans son état brute, et naturel est abondante et donnée par la terre, elle est assimilée par exemple au vent qu'on peut capter, à l'énergie solaire qu'on peut transformer, ou à l'utilisation dans la majorité des cas des énergies fossiles.

A l'heure actuelle plus de 80 % de l'énergie mondiale est créée à partir des énergies fossiles. Le pétrole restera ainsi la principale source d'énergie primaire pour les vingt prochaines années. Le pétrole étant une ressource qui est appelé à disparaître, il faudra rapidement développer d'autres moyens de production d'énergie qui exploitent des sources intarissables. Ce sont les énergies renouvelables, parmi ces énergies, l'énergie éolienne à laquelle on s'intéressera plus particulièrement [5].

Ce chapitre traitera du fonctionnement général des systèmes éoliens en présentant les différentes configurations existantes, des aspects mécaniques liés à l'extraction de la puissance du vent à partir de turbines éoliennes avant de finir par la présentation des générateurs électriques utilisés dans les centrales éoliennes.

1.1 DEFINITIONS

1.1.1 L'ENERGIE EOLIENNE

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire, les rayons solaires absorbés dans l'atmosphère entraînent des différences de température et de pression. De ce fait les masses d'air se mettent en mouvement et accumulent de l'énergie cinétique, c'est cette énergie cinétique qui une fois transformée en énergie mécanique puis électrique à travers des aérogénérateurs qui représentera l'énergie éolienne [6].

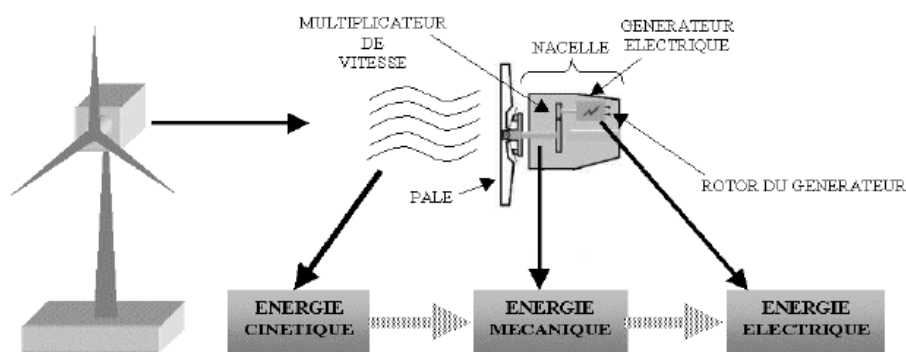


Fig.1.1:Représentation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne

Considérée comme une énergie propre, non polluante et renouvelable, l'énergie éolienne connaît un essor très important. Parmi les énergies renouvelables elle est jugée comme étant une technologie assez mature et la plus rentable après l'hydroélectrique.

Elle fait partie intégrante des stratégies d'implantation d'énergies alternatives malgré les limites qu'elle peut présenter : son caractère aléatoire, son rendement et son intrusion dans les paysages naturels.

- Les atouts de l'énergie éolienne :
 - L'énergie éolienne est renouvelable et propre.
 - En phase d'exploitation, cette énergie est presque totalement indépendante des ressources fossiles.
 - Le terrain où les éoliennes sont installées reste toujours exploitable pour les activités industrielle et agricole. L'installation peut être démantelée relativement facilement.
 - Implantées localement, les éoliennes peuvent permettre de répondre à des besoins électriques de masse tout comme à des besoins domestiques limités, selon la taille de l'éolienne, de façon assez indépendante.
- les inconvénients :
 - L'énergie éolienne dépend de la puissance et de la régularité du vent, qui la rend très intermittente.
 - Les zones de développement sont limitées.
 - Un coût plus important que celui des énergies fossiles.

1.1.2 EVOLUTION DE LA PRODUCTION MONDIALE DE L'ENERGIE EOLIENNE

L'énergie éolienne connaît une croissance fulgurante depuis plusieurs années, entre 1997 et 2007, la puissance éolienne installée dans le monde est passée de 7584 à 93 678 MW, soit la consommation d'électricité spécifique d'environ 180 millions de personnes. L'Europe possède 61% des moyens de production mondiale d'énergie éolienne.

En 2012, près de 44,7 GW de nouvelles capacités éoliennes ont été installés dans le monde. L'éolien a produit près de 460 TWh en 2011, soit approximativement 2,1% de la production totale d'électricité dans le monde. Les experts du GWEC (Conseil mondial de l'énergie éolienne) prévoient le maintien d'une croissance soutenue de l'éolien, devant conduire à terme à un parc susceptible de produire 3 000 TWh à l'horizon de 2020[7].

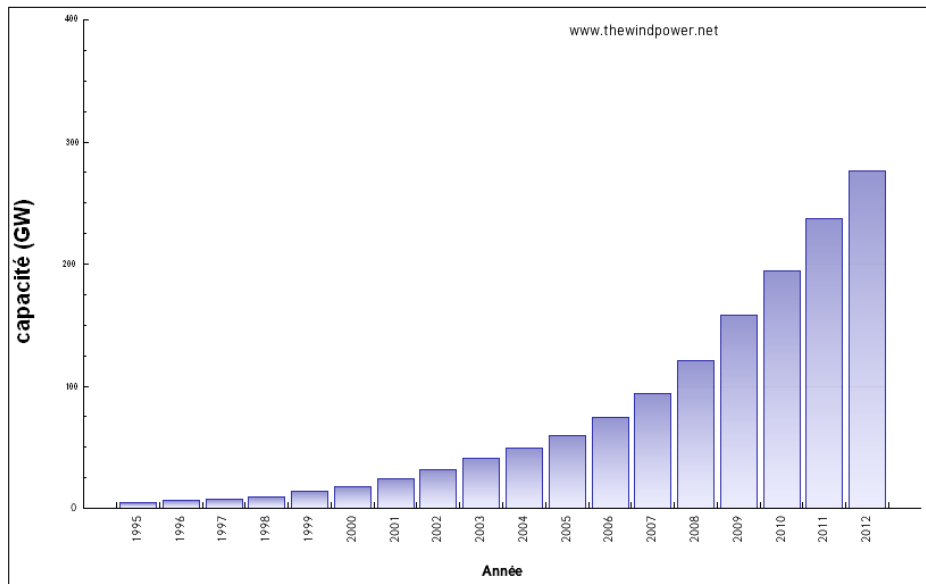


Fig1.2: Puissance éolienne mondiale installée 1995-2012

1.1.3 VENT

Le vent étant l'élément précurseur de l'énergie électrique, une étude approfondie du caractère du vent, de sa vitesse et de sa direction est primordiale avant l'implantation d'un site éolien dans une région précise.

La vitesse du vent se mesure grâce à des anémomètres, et est classée selon l'échelle de Beaufort en 12 catégories.

Degré de beaufort	Description	m/s	Km/h	Nœud
0	Calme	Moins de 1	Moins de 1	Moins de 1
1	Très légère brise	1 à 1.59	1 à 5	1 à 3
2	Légère brise	1.60 à 2.99	6 à 11	4 à 6
3	Petite brise	3.00 à 5.19	12 à 19	7 à 10
4	Jolie brise	5.20 à 7.69	20 à 28	11 à 15
5	Bonne brise	7.70 à 10.49	29 à 38	16 à 21
6	Vent frais	10.50 à 13.59	39 à 49	22 à 26
7	Grand frais	13.60 à 16.99	50 à 61	27 à 33
8	Coup de vent	17.00 à 20.49	62 à 74	34 à 40
9	Fort coup de vent	20.50 à 24.09	75 à 87	41 à 47
10	Tempête	24.10 à 28.39	88 à 102	48 à 55
11	Violente tempête	28.40 à 32.49	103 à 117	56 à 63
12	Ouragan	Plus de 32.50	Plus de 118	Plus de 64

Tableau 1.1 Echelle de beaufort

La rose des vents est l'un des principaux outils intervenant dans les études d'implantation des systèmes éoliens, il permet de connaître la vitesse et la direction du vent durant toute la période des relevés et donne les trois informations suivantes [8] :

- Le pourcentage du temps global selon lequel le vent souffle dans une direction donnée.
- Le pourcentage d'énergie totale par secteur, cela indique la direction qui fournit le maximum d'énergie.
- La moyenne des turbulences par secteurs.

Ce relevé nous permettra de connaître le positionnement optimal des éoliennes par rapport aux obstacles et de juger les capacités de production des centrales éoliennes.

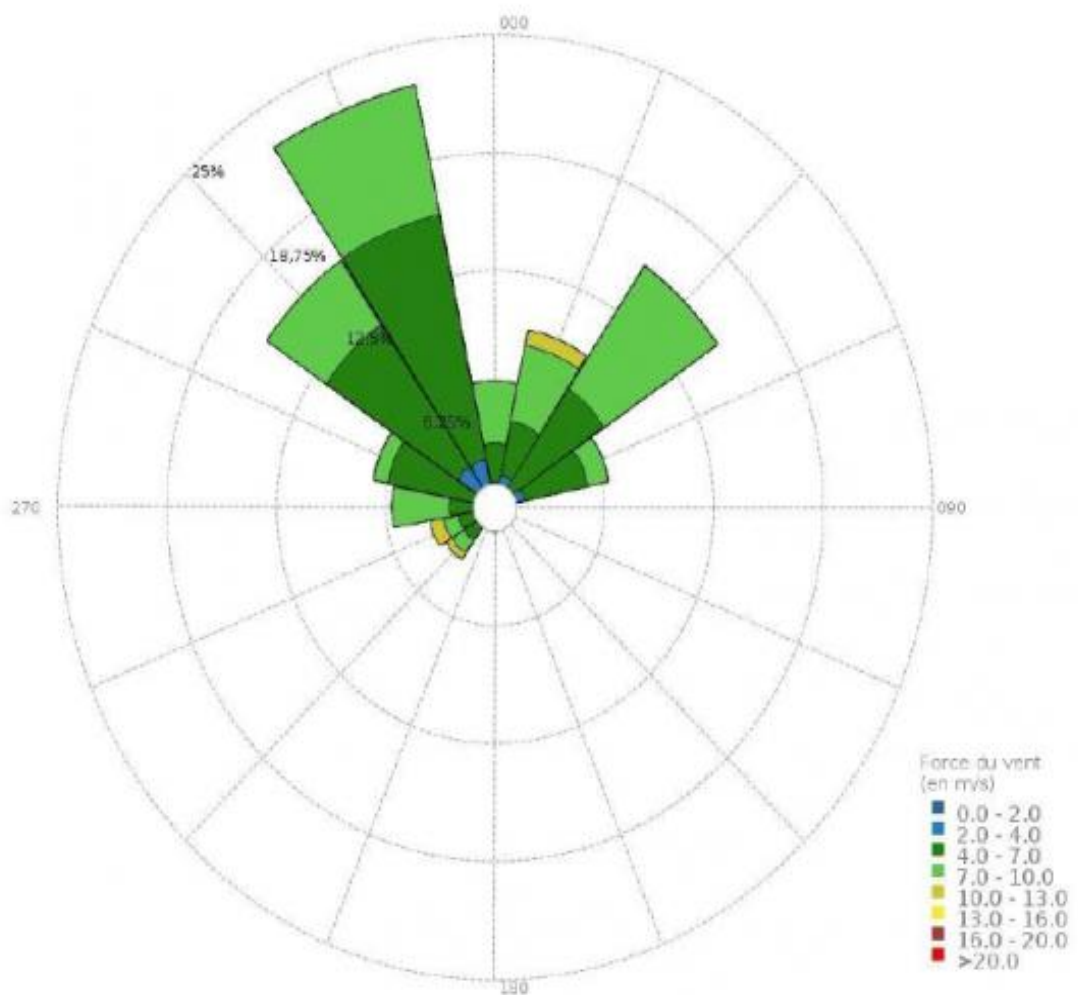


Fig.1.3:Exemple d'une rose des vents

1.2 TYPES D'EOLIENNES

Selon la disposition géométrique des hélices sur l'arbre, on classera les éoliennes en deux catégories :

- Eolienne à axe vertical
- Eolienne à axe horizontal

1.2.1 EOLIENNES A AXE VERTICAL

Même s'il est actuellement peu utilisé voire carrément abandonné, le principe de ces machines est connu depuis bien longtemps, c'est d'ailleurs ce type d'éolienne qui ont été utilisées la première fois pour la production d'énergie électrique.



Fig.1.4:Eoliennes à axe vertical

Le principal avantage à ce type de machine est le fait qu'elles peuvent fonctionner à n'importe quelle vitesse du vent et n'ont pas besoin d'un dispositif d'orientation, ainsi que d'avoir le générateur d'énergie électrique au niveau du sol et donc facilement accessible.

Cependant le fait qu'elles soient bâties à un niveau peu élevé du sol diminue nettement leur efficacité et les rend très peu intéressantes.

Selon leurs principes de fonctionnement on distinguera deux types d'éoliennes à axe vertical :

1) Trainée différentielle

Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes il en résulte ainsi un couple moteur qui entrainera l'ensemble.

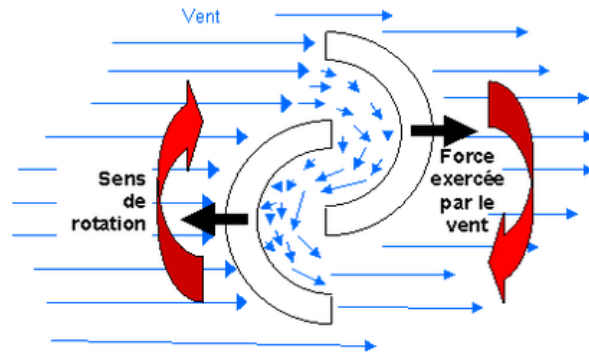


Fig.1.5 Rotor de Savonius

2) Variation cyclique d'incidence

Cette technique fut adoptée pour la première fois par le français Darius auquel on associa son nom, elle est basée sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensité et de directions variables qui généreront un couple moteur, ce couple est directement proportionnel au diamètre du dispositif, plus le diamètre est important plus le couple sera important.

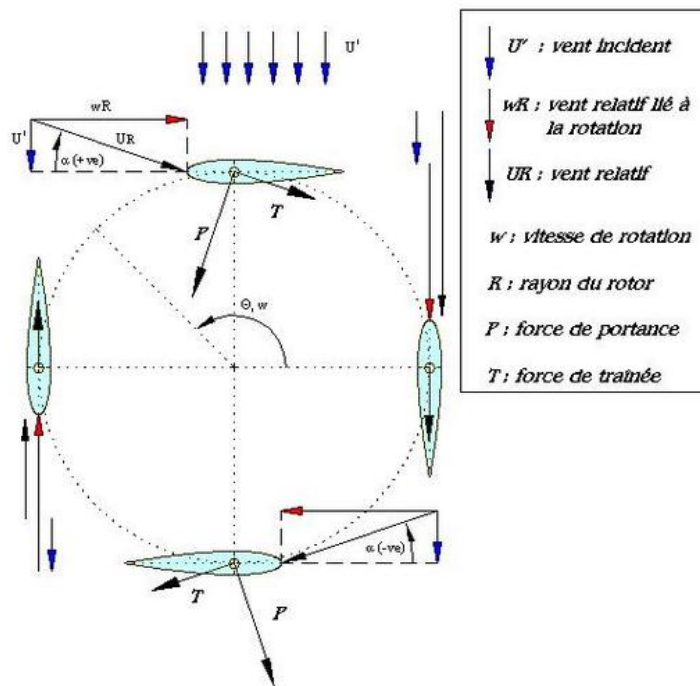


Fig.1.6 Rotor de Darius

Le fonctionnement intrinsèques faisant appel à la rotation des pâles signifie que l'éolienne ne peut démarrer toute seule et a besoin d'un dispositif de lancement.

1.2.2 EOLIENNES A AXE HORIZONTAL

Les éoliennes à axe horizontal sont actuellement les plus utilisées. Elles sont basées sur le modèle des moulins à vent où les ailes faites de voiles ont été remplacées par des hélices qui comporte des pâles modélisées selon les modèle des ailes d'un avion.

L'hélice contient deux ou trois pales qui tournent de façon aérodynamique. Il existe également des éoliennes horizontales monopales mais celles-ci sont très rares. Les éoliennes à deux pales et les éoliennes à trois pales fonctionnent sur le même principe. Le rendement des éoliennes à axe horizontal est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical, elles sont également plus solides et coûtent moins cher à la fabrication [8,9].

On peut classer les éoliennes à axe horizontal selon plusieurs catégories :

- Leur positionnement par rapport au vent :
 - **En amont**

Le fonctionnement des éoliennes "amont", le vent souffle directement sur les pales de l'éolienne. Ce type de configuration requiert des pales rigides qui permettent de bien résister au vent car celles-ci sont plus exposées. La majorité des grandes éoliennes dont la puissance dépasse les 1MW fonctionnent avec ce principe.

- **En aval**

Le vent souffle sur l'arrière des pales. Cette configuration est plus utilisée pour les petites éoliennes de maison qui présentent des pales moins solides que celles des grandes éoliennes industrielles.

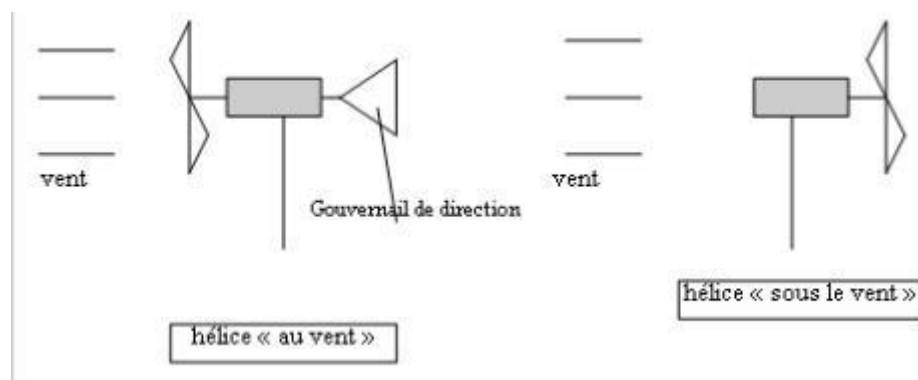


Fig.1.7 Eoliennes en amont et en aval

- Leurs vitesses de rotation
 - **Lentes**

Ce sont des éoliennes comportant un grand nombre de pâles (entre 20 et 40) et fonctionnent à de faibles vitesses du vent (environ 2 ou 3 m/s). Le diamètre des plus grandes éoliennes de ce genre que l'on construit actuellement est de l'ordre de 5 à 8

mètres. Le couple de l'éolienne est élevé et permet de fournir un effort appréciable dès le démarrage, ce qui prédestine ces éoliennes au pompage des nappes aquifères.

- **Rapides**

Les éoliennes rapides ont un nombre de pales beaucoup plus restreint puisqu'il varie entre 2 et 4. L'intérêt des éoliennes rapides est qu'elles sont à puissance égale beaucoup plus légères et donc moins chères que les éoliennes lentes ce qui les rend très utilisées. Elles présentent, par contre, l'inconvénient de démarrer difficilement. Il faut un vent de 18 km/h au moins pour qu'elles se mettent à tourner. Des progrès ont été cependant faits en couplant une génératrice de faible puissance avec des pales de grandes dimensions. Davantage d'énergie est alors produite tout au long de l'année et ces petites éoliennes de faible puissance démarrent avec des vents de 6 km/h.

La production d'énergie éolienne étant directement liée au vent, à sa vitesse et sa disponibilité, il est nécessaire de produire un maximum d'énergie lorsque les conditions sont idéales, c'est pour cela que les éoliennes rapides de grandes dimensions (dimension du rotor) sont très utilisées pour la production d'électricité éolienne.

En effet, cette puissance dépend essentiellement de la surface balayée par le rotor qui n'est pas toujours fonction de la hauteur de l'éolienne, mais du diamètre du rotor. Néanmoins, dans le cas des grandes éoliennes, une règle de bonne pratique veut que la hauteur du mât, L, soit égale au diamètre du rotor, D. Dans ce cas, il y a un lien indirect entre la hauteur du mât et la puissance.

Le tableau ci-dessus nous donne une idée sur la puissance développée par les éoliennes de différentes dimensions [10].

Dénomination	Diamètre du rotor (m)	Air balayée (m ²)	Puissance (kw)
Micro	0.5 - 1.25	0.2 - 1.2	0.25
Mini	1.25 - 3	1.2 - 7.1	1.5
Domestique	3 - 10	7 - 79	15
Petite commerciale	10 - 20	79 - 314	100
Moyenne commerciale	20 - 50	314 - 1963	1000
Grande commerciale	50 - 100	1963 - 7854	3000

Tableau 1.2 Classification éolienne taille-puissance

Etant donné que c'est ce type d'éolienne à axe horizontal à vitesse élevée, est plus répandu pour la production d'électricité, une étude détaillée sera faite.

1.3 COMPOSANTS DES EOLIENNES RAPIDES

Les éoliennes se composent essentiellement des éléments suivants :

- **La fondation**

La fondation est généralement conçue en béton. Elle doit être assez solide pour permettre de fixer toute la structure de l'éolienne.

- **Le mât**

Le mât est plus ou moins imposant selon la force de l'éolienne et est conçu en métal afin d'apporter solidité à l'ensemble. Il supporte les principaux éléments de l'éolienne : la nacelle et le rotor. Certains mâts peuvent atteindre jusqu'à 100 mètres en hauteur : plus le rotor est haut et plus le rendement de l'éolienne sera bon, les hélices n'étant plus gênées par aucun obstacle. Un mât solide permet une plus grande longueur de pale.

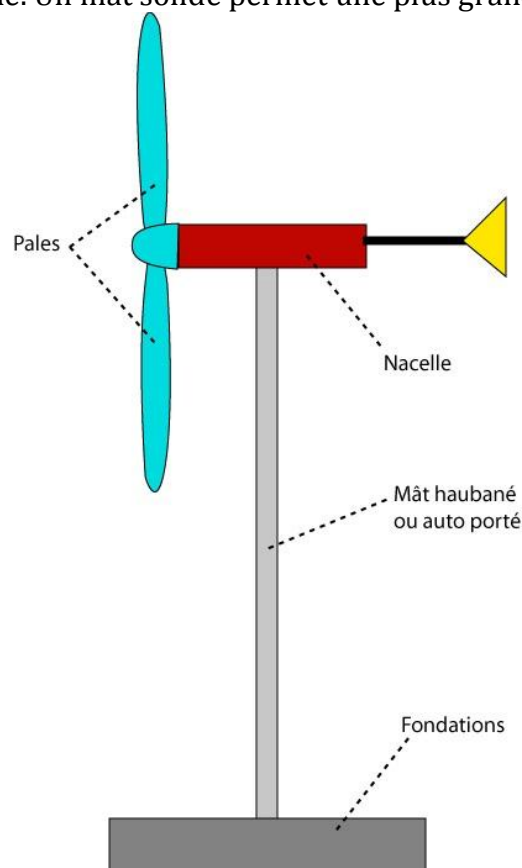


Fig.1.8 Composants d'une éolienne

- **La nacelle**

La nacelle est le moteur de l'éolienne. C'est à l'intérieur de cet équipement que se trouve le générateur d'électricité qui permet de convertir l'énergie produite par le mouvement de l'hélice en électricité et le reste de la machinerie qui dirige les pales en fonction de la force du vent (frein, suivi du vent, mise au repos).

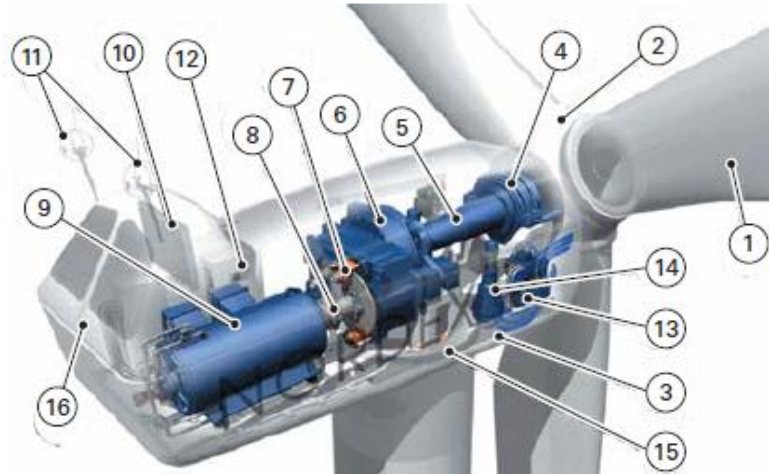


Fig.1.9 Composants de la nacelle d'une éolienne

Elle comporte les éléments suivants :

- 1 : pâles composite fibre de verre, pas fixe, profil type stall
- 2 : moyeu turbine en fonte
- 3 : structure de la turbine en fonte
- 4 : paliers du rotor à double rangée de billes
- 5 : arbre lent du rotor en acier haute résistance
- 6 : multiplicateur de vitesse
- 7 : frein à disque sur l'arbre
- 8 : accouplement avec la génératrice
- 9 : génératrice asynchrone
- 10 : radiateur de refroidissement
- 11 : système de mesure du vent (anémomètre)
- 12 : système de contrôle et pilote de la turbine
- 13 : système hydraulique pour les freins
- 14 : entraînement de la tourelle
- 15 : palier du système d'orientation
- 16 : capot de la nacelle en acier recouvert de fibres de verre

- **Le rotor**

Le rotor est composé du nez de l'éolienne et de l'hélice. L'hélice est généralement composée de trois pales. Les pales sont placées au-devant de la nacelle et reliées ainsi à elle. Les pales produisent une énergie mécanique qui est transformée en électricité par la nacelle. L'électricité produite par la nacelle est transportée par des câbles situés dans le mât jusqu'à une cabine de dispersion.

- **La cabine de dispersion**

La cabine de dispersion située à la base de l'éolienne permet de se connecter au réseau électrique afin d'y injecter l'électricité produite pour la stocker si elle n'est pas directement utilisée ou pour la réinjecter plus tard sur le réseau si elle est fabriquée en surplus.

1.4 MODELISATION DES PALES : BILAN DE FORCES

Pour comprendre le mode de fonctionnement d'une éolienne, il faut introduire quelques concepts d'aérodynamique. Parmi ceux-ci, les notions de trainée et de portance jouent un rôle majeur. Pour commencer, on simplifie le problème. En effet, lorsque l'on la pôle d'une éolienne (ou similairement celle d'un avion sur laquelle est basée cette technologie), il s'agit d'un corps à 3 dimensions spatiales. En effet, une pôle possède une certaine longueur de corde (direction "x"), une certaine cambrure (direction "y") ainsi qu'une certaine envergure (direction "z"). De manière générale, il est assez difficile de considérer ces trois dimensions simultanément. On prend uniquement les deux dimensions (2D) qui contiennent le phénomène physique dominant. Il s'agit de la dimension de la cambrure et de la corde. Ensuite, pour des études plus poussées, les aérodynamiciens intégreront la troisième dimension, c'est-à-dire l'envergure, comme étant une superposition de comportements en deux dimensions (2D) le long de l'envergure.

L'action de l'air provoque sur un profil l'apparition d'une force résultante F_R . Cette force dépend de l'incidence α , angle formé par la direction de la vitesse incidente V_R et la corde moyenne du profil. Elle peut être décomposée suivant la direction de cette corde moyenne et sa perpendiculaire en deux forces dites de portance et de trainée, l'action de ces forces provoquera l'apparition du couple moteur [11].

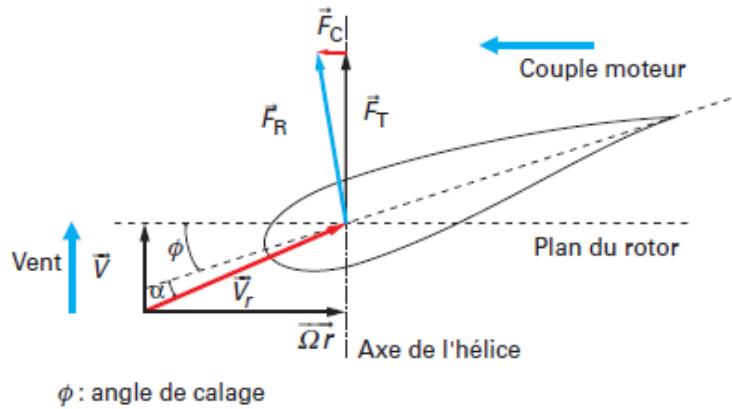


Fig.1.10 Bilan des forces sur une pôle

1.5 LOI DE BETZ

C'est une loi qui nous permet de trouver le pourcentage d'énergie extractible depuis l'énergie cinétique du vent en fonction de sa vitesse.

Le système éolien à étudier peut être modélisé par le schéma suivant :

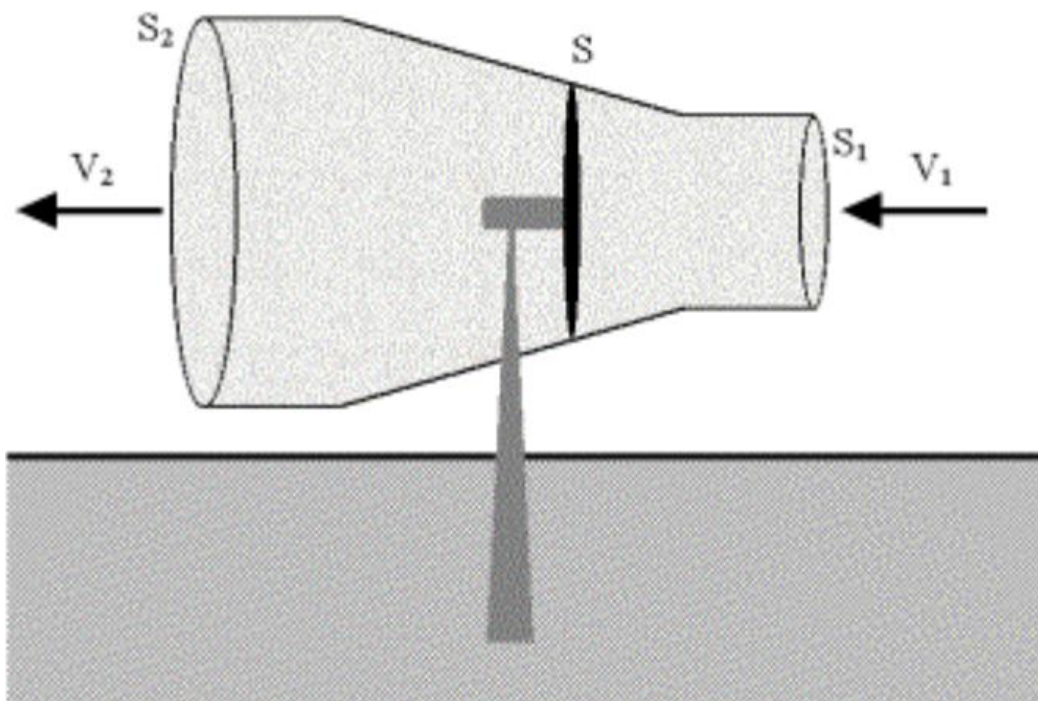


Fig.1.11 Modélisation du courant d'air autour d'une éolienne

On appelle la vitesse du vent non perturbé, c'est-à-dire avant qu'il n'arrive au niveau de l'éolienne V_1 . Cette vitesse devient égale à V_2 lorsqu'il traverse les pales de l'éolienne.

On cherche d'abord la puissance extraite pour trouver le rapport $P_{extraite}/P_{théorique}$

On commence par calculer la masse d'air faisant tourner les pales en une seconde. On considère que la vitesse du vent au niveau des pales est égale à $V = \frac{V_1 + V_2}{2}$, la masse d'air est alors donnée par la relation $m = \rho * S * V$, donc :

$$m = \rho * S * \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (1.1)$$

La seconde loi de Newton, quant à elle, nous permet de calculer la puissance extraite lors du passage du courant d'air à travers les pales :

$$P_{\text{extraite}} = m \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (1.2)$$

En remplaçant l'expression de la masse d'air faisant tourner l'éolienne, on obtient l'expression finale de la puissance mécanique extraite par l'éolienne :

$$P_{\text{extraite}} = \rho * S * \frac{(V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (1.3)$$

La puissance théorique disponible est celle qu'on aurait eue si le vent n'était pas perturbé par son passage à travers les pales de l'éolienne, donc un vent qui garde une vitesse constant V_1 . Cette puissance s'exprime donc par :

$$P_{\text{théorique}} = \frac{\rho * S * V_1^3}{2} \quad (1.4)$$

Ce qui est intéressant, c'est d'étudier la variation du ratio $P_{\text{extraite}} / P_{\text{théorique}}$ qu'on appelle coefficient de puissance C_p . Son expression est :

$$C_p = \frac{P_{\text{extraite}}}{P_{\text{théorique}}} = \frac{(1 + \frac{V_1}{V_2})(1 - (\frac{V_1}{V_2})^2)}{2} \quad (1.5)$$

La représentation de ce rapport en fonction du rapport de vitesses λ donne la courbe suivante :

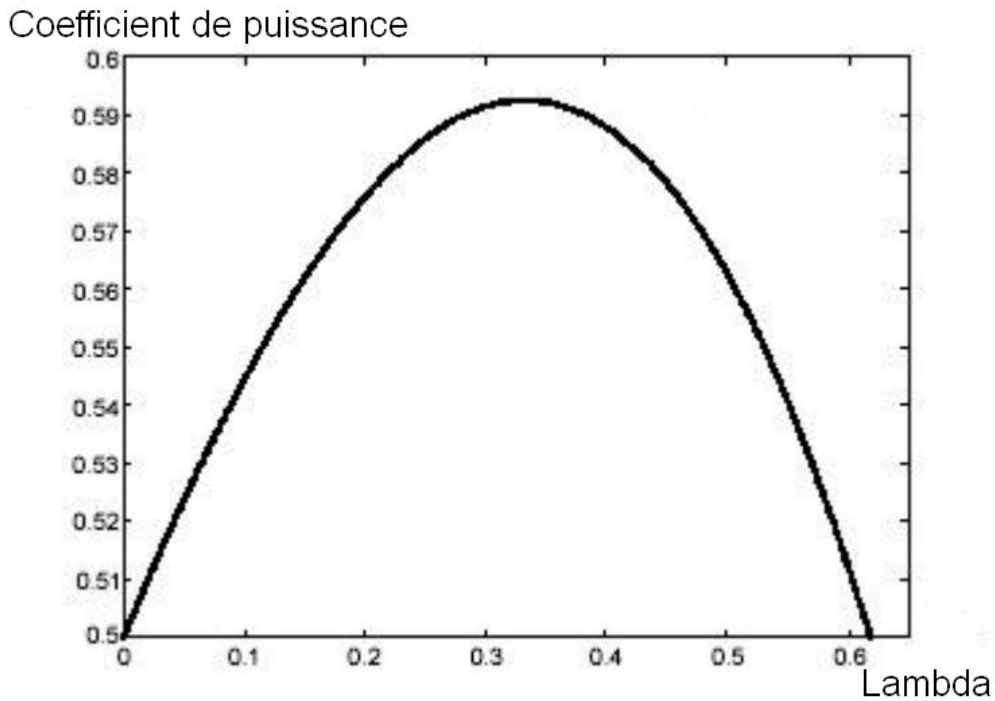


Fig.1.12 Variation du coefficient de puissance en fonction du rapport λ

On s'aperçoit que la courbe présente un maximum à 0.59. Cette limite théorique s'appelle limite de Betz et elle indique le pourcentage de puissance maximal qu'on peut extraire pour une vitesse de vent donnée. Chaque éolienne a cependant sa propre courbe caractéristique du coefficient de puissance C_p qui dépend de sa construction [12].

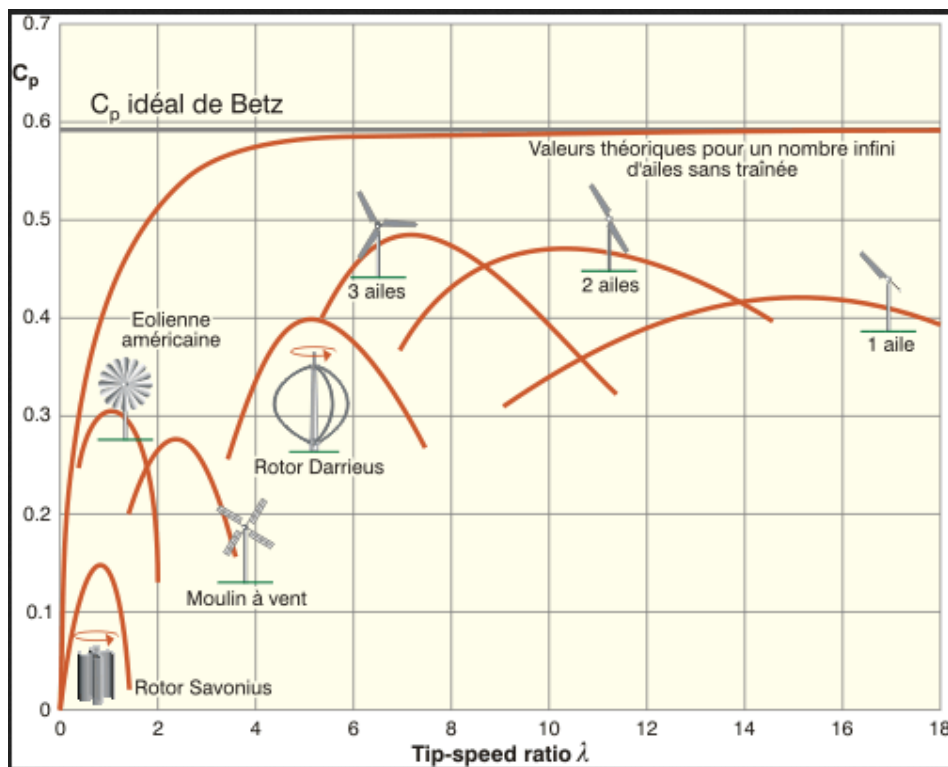


Fig.1.13 Coefficients de puissance pour différents types d'éoliennes [10]

Ce schéma permet de dégager des « tendances » pour les principales catégories d'éoliennes :

- Les éoliennes à marche lente, généralement munies d'un grand nombre de pâles, atteignent rapidement leur maximum de puissance mais leur coefficient C_p diminue rapidement lorsque la vitesse nominale est dépassée.
- Les éoliennes à marche rapide atteignent quant à elles leurs puissances maximales plus ou moins rapidement mais ont pour avantage d'avoir un C_p qui diminue lentement lorsque la vitesse du vent dépasse leur vitesse nominale.

Ces courbes permettent aussi d'expliquer pourquoi les éoliennes à marche rapide tripales sont les plus répandues : Elles atteignent rapidement leur maximum de puissance tout en ayant l'avantage d'avoir un C_p qui baisse lentement avec l'augmentation de la vitesse du vent. Elles sont aussi intéressantes car elles présentent un bon compromis pour les vibrations et le coût de l'installation.

1.6 CONVERSION ELECTROMECHANIQUE DE L'ENERGIE

1.6.1 GENERATEURS SYNCHRONES

Il est possible de réaliser des machines synchrones à grande performance avec une faible vitesse de rotation, et cela essentiellement en augmentant le nombre de paires de pôles. Cette solution est néanmoins impossible en éolien à cause des très fortes variations de la vitesse du vent. On a donc recours à des convertisseurs d'électronique de puissance.

Les montages utilisés sont composés soit de redresseurs à diodes suivis d'onduleurs à transistors, montage qui peut être amélioré grâce à un hacheur MPPT (système de détection du point de puissance maximal), soit de redresseur à transistors suivi d'un onduleur après l'étage continu.

Les machines utilisées en éolien sont à excitation bobinée ou à aimants permanents. Elles utilisent la même chaîne de conversion pour se connecter au réseau.

Il est important de noter qu'en général, les machines synchrones sont à entraînement direct : c'est-à-dire qu'il n'y a pas de multiplicateur de vitesse mécanique. Vu les difficultés à obtenir des coûts et des masses d'installation compétitifs en entraînement direct, on a parfois recours à une solution intermédiaire : La machine synchrone basse vitesse avec multiplicateur à un seul étage [13].

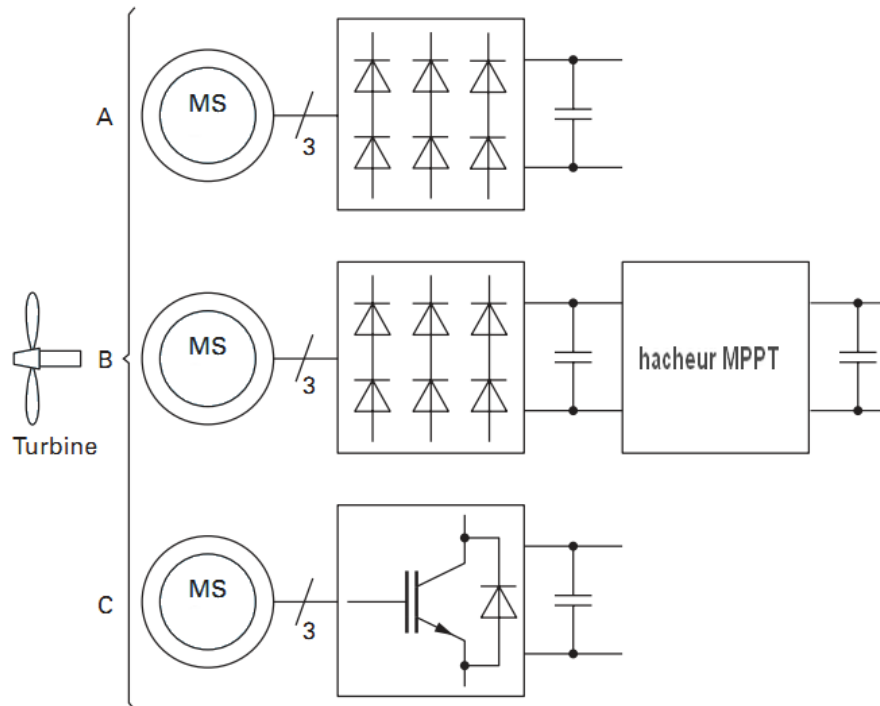


Fig.1.14Chaines de conversion possibles pour les machines synchrones

1.6.1.1 MACHINES A ROTOR BOBINE

Les installations éoliennes utilisant des machines synchrones à rotor bobiné sont montées de la manière suivante :

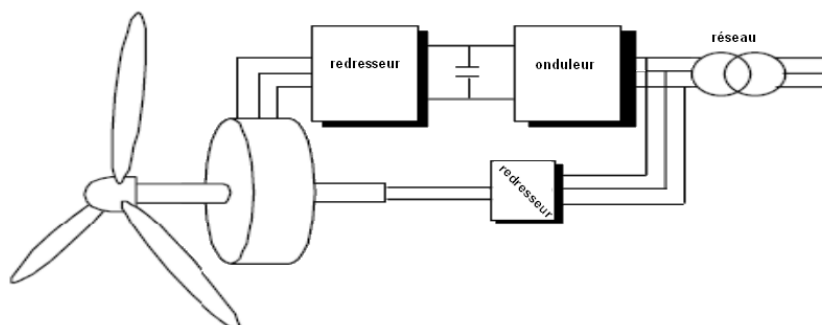


Fig.1.15 Configuration habituelle de la connexion au réseau de la machine synchrone à rotor bobiné

La puissance transite par un bus AC-DC-AC. Le redresseur côté machine permet de réguler les puissances actives et réactives directement. L'avantage principal de ce type d'installation est la possibilité de contrôler le facteur de puissance [14].

En faisant la comparaison avec les machines synchrones à aimants permanents, la présence d'enroulements rotoriques désavantage cette machine car elle implique de la maintenance supplémentaire.

1.6.1.2 MACHINES A AIMANTS PERMANENTS

Les machines synchrones (MS) à aimants permanents sont connectées soit à travers des convertisseurs de type Boost, soit à travers des convertisseurs à MLI.

- **MS à aimants permanents avec convertisseurs Boost**

C'est une configuration généralement utilisée pour les petites machines de puissance inférieure à 50kW. Le convertisseur Boost permet le contrôle du couple électromagnétique de la machine tandis que l'onduleur côté réseau contrôle le facteur de puissance ainsi que le niveau de tension [15].

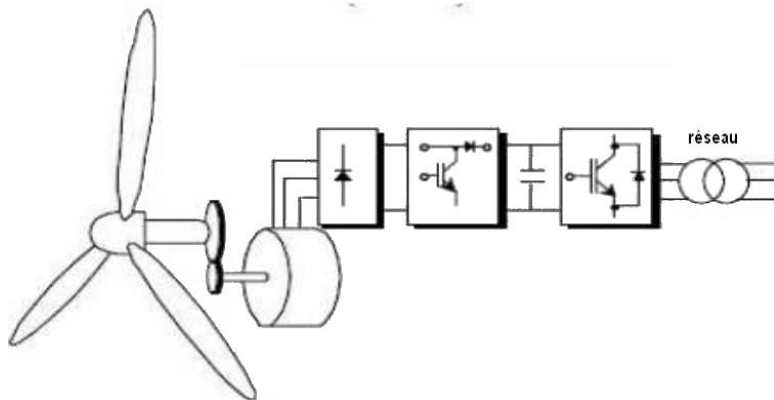


Fig.1.16 Machine synchrones à aimants permanents avec convertisseurs Boost

Son principal inconvénient est la génération d'harmoniques et les forts courants dus au redresseur à diodes.

- **MS à aimants permanents avec convertisseurs à MLI**

Dans cette configuration, on utilise un redresseur à MLI à l'entrée du bus continu. Cela nous permet d'utiliser la commande à flux orienté pour faire fonctionner la machine à son point de puissance optimal en tout instant. On ne peut cependant pas intervenir sur le facteur de puissance avec ce montage [16].

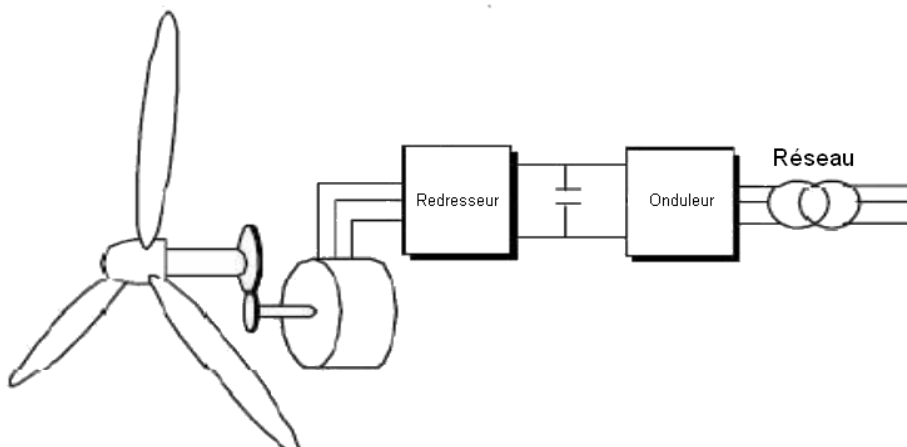


Fig.1.17 Machine synchrones à aimants permanents avec convertisseurs à MLI

1.6.2 GENERATEURS ASYNCHRONES

Deux types de générateurs asynchrones sont utilisés pour la production d'électricité éolienne : Les générateurs à cage et les générateurs à rotor bobiné doublement alimentés. Les génératrices à cage, surtout adoptées pour des installations de base où elles sont directement reliées au réseau, sont encore prédominantes car très attractives en terme de coût. Les génératrices à double alimentation sont quant à elles privilégiées lorsqu'il s'agit de réaliser des éoliennes à vitesse variable et offrent un bon compromis performance/coût.

1.6.2.1 MACHINES A CAGE

- **Vitesse constante**

Elles sont standardisées pour des puissances allant jusqu'à 1MW et sont économiquement très avantageuses. Elles nécessitent d'être associées aux turbines éoliennes à l'aide de multiplicateurs de vitesse car elles ont une vitesse nominale beaucoup plus grande que celle obtenue grâce à la vitesse du vent. On obtient des puissances massiques de l'ordre de 80W/kg [17].

Ces machines nécessitent un apport en puissance réactive pour pouvoir fonctionner, puissance qui varie avec la charge. Des batteries de condensateurs réglables par gradins sont donc installées pour les compenser. On utilise aussi des gradateurs triphasés pour les connecter au réseau afin d'éviter les régimes transitoires perturbateurs.

Il n'est pas possible de régler les puissances actives et réactives de ces systèmes, on utilise donc des protections de type tout ou rien : La génératrice est déconnectée du réseau en cas d'avarie et la turbine éolienne freinée.

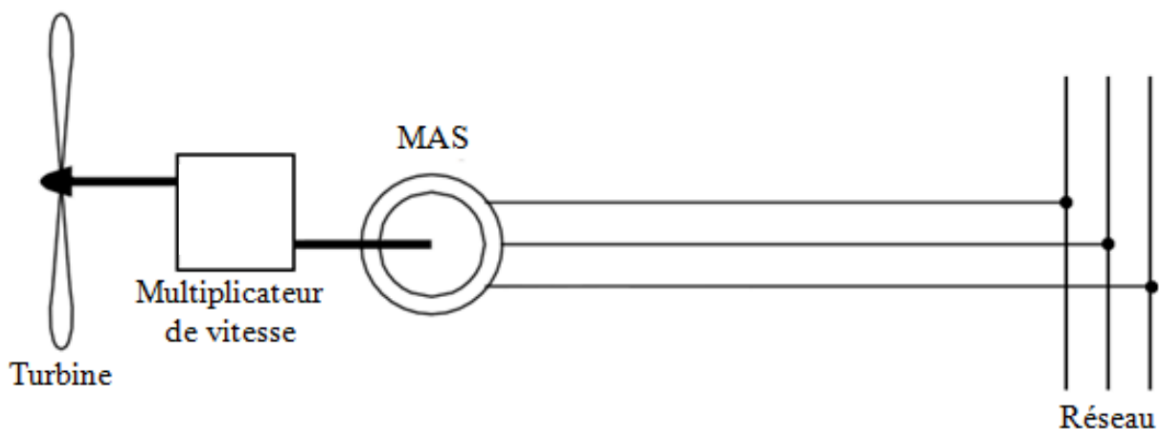


Fig.1.18 Connexion au réseau d'une machine asynchrone à cage à vitesse fixe

- **Vitesse variable**

Pour obtenir un fonctionnement en vitesse variable, il faut installer un variateur de fréquence dimensionné pour la pleine puissance convertie en prenant en compte l'énergie réactive fournie à la génératrice [18].

Ce dispositif techniquement viable n'est pratiquement jamais utilisé car trop couteux : Le prix du convertisseur peut dépasser le prix de la machine elle-même.

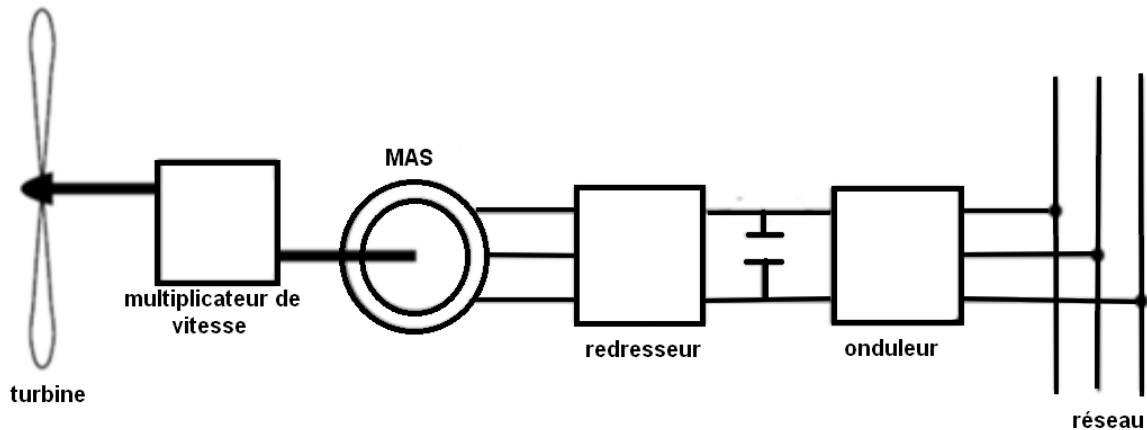


Fig.1.19 Connexion au réseau d'une machine asynchrone à cage à vitesse variable

1.6.2.2 MACHINES A ROTOR BOBINE

En comparaison avec les machines à cage, elles offrent un net avantage économique pour l'utilisation à vitesse variable malgré le surcoût de construction. Cela est notamment dû à la possibilité d'utiliser des convertisseurs à puissance réduite pour commander la machine.

- **Variation de résistance rotorique**

Ces dispositifs ne permettent pas un vrai fonctionnement à vitesse variable mais font quand même fonctionner la machine à des glissements allant jusqu'à 10%. Cette légère variation de vitesse contribue à la protection du système en réduisant les risques d'endommagement mécanique et les fluctuations de puissance.

Ce dispositif permet aussi d'améliorer le rendement global de l'éolienne grâce à la petite plage de variation qu'il offre même si, à priori, des résistances rotoriques supplémentaires le dégradent.

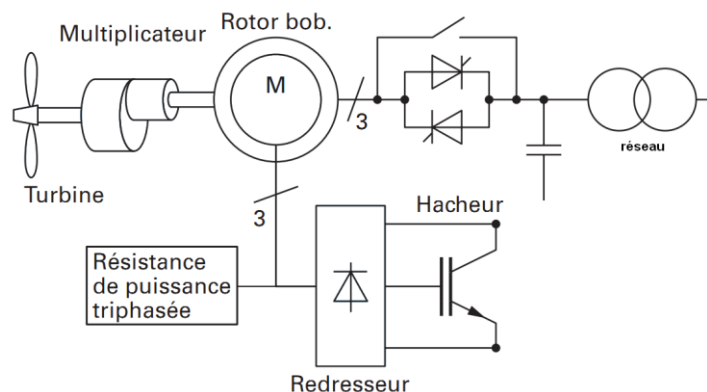


Fig.1.20 Schéma de montage pour une machine asynchrone à rotor bobiné avec variation électronique de la résistance statorique

- **Machine asynchrone à double alimentation(MADA)**

Au contraire des machines présentées précédemment, la MADA peut fonctionner sur une large plage de vitesse tout en employant des convertisseurs dimensionnés pour une puissance réduite et donc économiquement viables. Cet avantage capital fait que son utilisation dans les systèmes éoliens, sujets à de très fréquentes variations de vitesse, se répand [19].

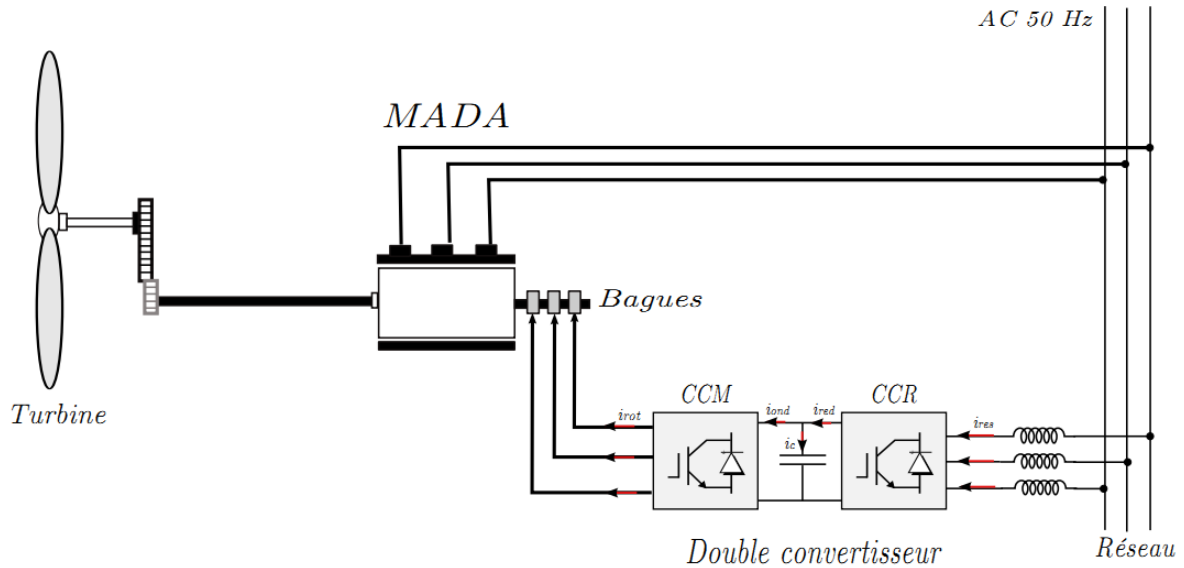


Fig.1.21 Schéma de montage pour une machine asynchrone à double alimentation(MADA)

Le bilan énergétique simplifié de cette cascade donne :

$$P_{stator} = \frac{P_{mécanique}}{1-g} \quad (1.6)$$

$$P_{rotor} = \frac{g}{1-g} P_{mécanique} \quad (1.7)$$

Ainsi, en dimensionnant la cascade de manière à avoir une variation de vitesse symétrique de l'ordre de 30% autour de la vitesse du synchronisme, la MADA débite entre 0.7 et 1.3 $P_{nominale}$ avec un convertisseur supportant une puissance max de l'ordre de $0.3 * P_{nominale}$ [10].

Ce convertisseur à puissance réduite offre de multiples avantages qui sont : poids plus faible, génération moindre d'harmoniques, refroidissement plus simple et coût moins élevé.

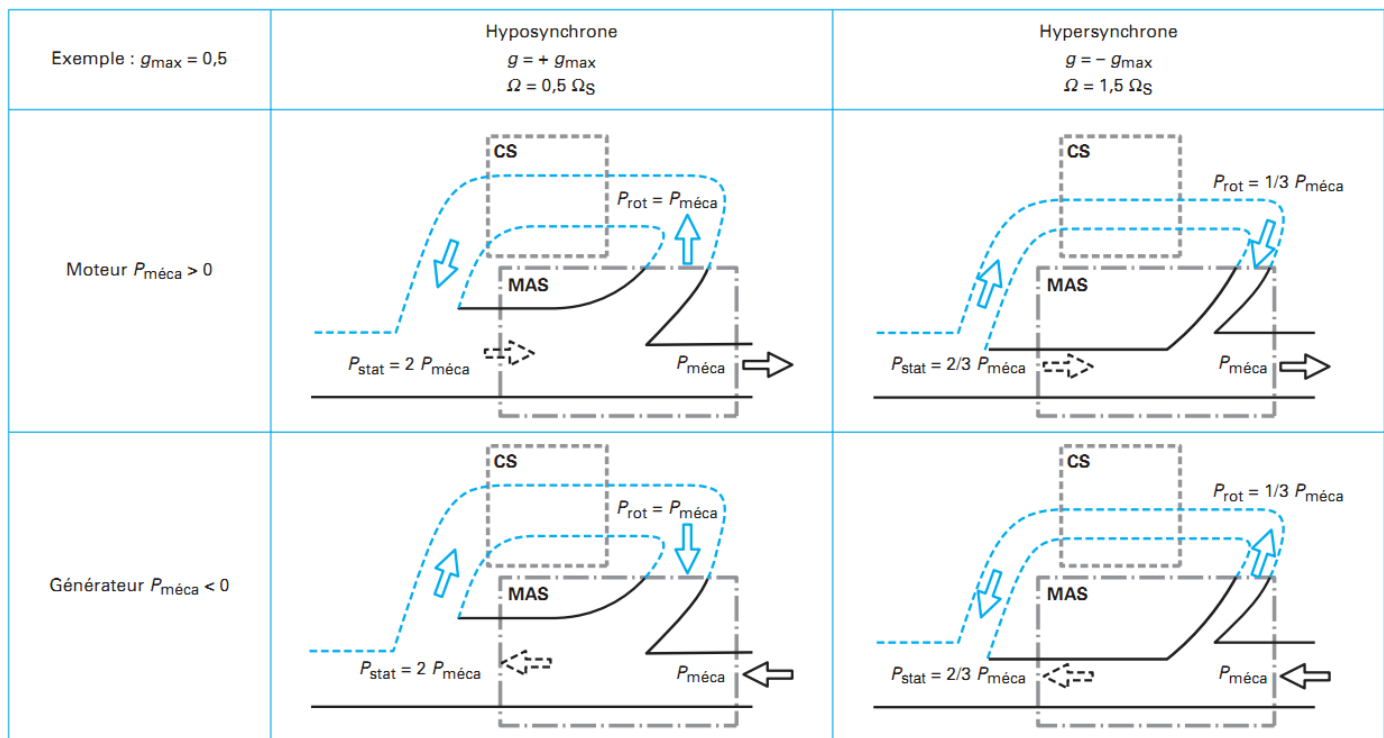


Fig.1.22 Sens de transfert de la puissance pour les différents fonctionnements de la MADA

De plus, l'interface électronique au rotor rend possible un contrôle de la vitesse de la machine mais aussi un contrôle de la puissance active et de la puissance réactive qu'elle délivre.

Elle offre aussi l'avantage de récupérer la puissance rotorique lorsqu'elle fonctionne en génératrice hypersynchrone, puissance autrement perdue par effet joule.

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons illustré la puissance qu'il est possible d'extraire du vent et rappelé les principaux types de systèmes éoliens. Un grand nombre d'approches existent, que ce soit pour la partie mécanique (éoliennes à axes verticaux ou horizontaux, lentes ou rapides) ou alors pour la partie électrique (générateurs synchrones et asynchrones et leurs différentes configurations).

Ainsi, nous avons mis en évidence le fait que la combinaison la plus intéressante d'un point de vue technico-économique était l'association éolienne rapide à axe horizontal-machine asynchrone à double alimentation. Ce système nous permet d'extraire un maximum de puissance grâce à une vitesse de fonctionnement variable tout en ayant l'avantage d'utiliser des convertisseurs qui ne sont pas dimensionnés pour la pleine puissance.

Dans le prochain chapitre, la modélisation de la machine sera développée en vue d'une modélisation sur MATLAB-SIMULINK.

**CHAPITRE 2 : MODELISATION
LINEAIRE DE LA MACHINE
ASYNCHRONE A DOUBLE
ALIMENTATION**

INTRODUCTION

La production d'énergie électrique grâce à un système éolien nécessite la transformation de l'énergie potentielle du vent en énergie mécanique à travers les éoliennes, puis en énergie électrique à travers des générateurs, le choix du générateur adéquat est donc crucial pour une production optimale.

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) suscite un intérêt grandissant ces dernières années pour la production de ce type d'énergie, au détriment des autres machines, en considérant ses excellentes performances, sa robustesse, sa souplesse d'utilisation et son coût assez faible.

Néanmoins, à côté de ses nombreux avantages, la machine asynchrone à double alimentation s'accompagne d'un modèle physique assez complexe à cause des multiples interactions électromagnétique entre le rotor et le stator de la machine. La mise en équations, les schémas équivalents simplifiés et les méthodes matricielles se sont développés et sont devenus la base pour une approche de modélisation et d'étude en général.

Dans ce chapitre nous décrirons la machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné, ses modes de fonctionnement et nous nous intéresserons à la modélisation et la simulation de la machine asynchrone, plus précisément selon le modèle de R.H PARK.

Nous utiliserons ce modèle triphasé-diphasé accompagné de certaines hypothèses simplificatrices qui nous permettront d'obtenir des équations mathématiques assez simples et qui traduisent fidèlement le comportement global de la machine.

2.1 DESCRIPTION DE LA MADA

2.1.1 CONSTITUTION

La machine asynchrone à rotor bobiné présente un stator similaire à celui des machines asynchrones triphasées classiques, constitué de tôles magnétiques pour permettre au courant de circuler uniquement dans les enroulements implantés dans les encoches creusées dans la culasse.

La différence présentée par ces machines vient de la constitution du rotor qui n'est plus une cage d'écureuil coulé dans les encoches des tôles, mais est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne.

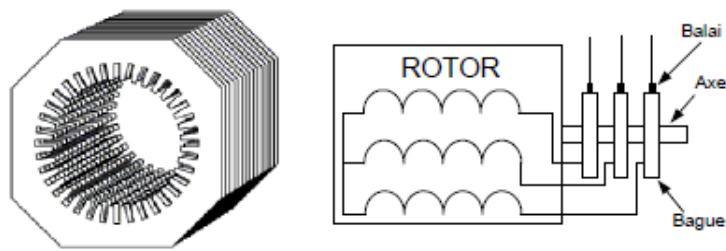


Fig.2.1 Représentation schématique du stator et du rotor de la MADA

Ces bagues permettent d'avoir une liaison électrique avec les bobines du rotor, ce qui dénote la double alimentation de la machine, ce type de rotor a été conçu pour permettre l'insertion de résistances en série avec celle du rotor et permettre le démarrage rotorique, cela permet aussi de contrôler la vitesse pour les fonctionnements moteur et générateur grâce à un dispositif appelé cascade hypo synchrone que nous verrons plus tard [18].

2.1.2 INTERET DE LA MADA

Une connexion directe au réseau oblige les machines asynchrones à garder une vitesse de rotation constante et proche du synchronisme.

Cette condition entraine une efficacité réduite pour des applications en éolienne du fait que les vitesses du vent soient très variables. Cependant l'évolution de l'électronique de puissance a permis l'introduction de convertisseurs de puissance entre le rotor et le réseau ce qui donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine et permet donc un fonctionnement à vitesse variable.

Toutefois, ce convertisseur doit être dimensionné pour faire transiter une partie de la puissance générée par la machine. Il doit donc être correctement refroidi et représente un encombrement non négligeable surtout dans le cas où il se trouve dans la nacelle de l'éolienne. De plus, il peut être générateur de perturbations harmoniques importantes.

Avec l'utilisation des machines asynchrones à double alimentation pilotées par le rotor, la plus grande partie de la puissance est directement distribuée au réseau par le stator et une partie de cette puissance (moins de 30% généralement) passe par ces convertisseurs de puissances à travers le rotor. Cela permet de tirer un maximum de puissance pour une plage de variation de 33% autour de la vitesse nominale de la machine [18].

2.1.3 MODES DE FONCTIONNEMENT DE LA MADA

Fonctionnement moteur

L'intérêt majeur du fonctionnement en moteur de la machine à double alimentation est de connecter des rhéostats aux bobinages rotoriques afin d'y limiter les courants de démarrage et d'augmenter le couple, ainsi que de pouvoir augmenter la plage de variation de vitesse tout en gardant des facteurs de puissance acceptables.

En plus du fait, que pour une vitesse inférieure à la vitesse du synchronisme, l'introduction de convertisseurs entre le rotor et le réseau permettra la récupération d'une certaine quantité de puissance (appelée puissance de glissement) normalement dissipée en effet Joule, le rendement est ainsi amélioré, c'est le principe de la cascade hyposynchrone.

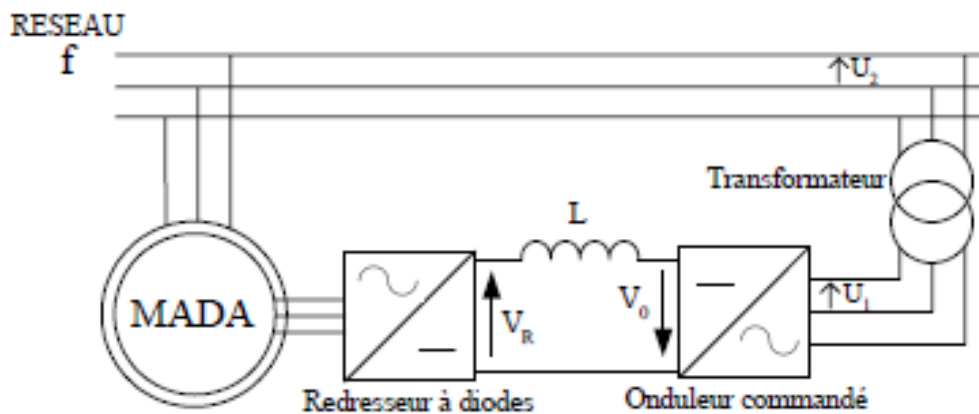


Fig2.2 Représentation de la MADA reliée au réseau à travers une cascade hyposynchrone au rotor

Fonctionnement génératrice

En fonctionnement génératrice, le comportement est similaire, la puissance fournie à la machine par le dispositif qui l'entraîne est une puissance mécanique.

En mode hyposynchrone, une partie de la puissance qui transite par le stator est réabsorbée par le rotor.

En mode hypersynchrone, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à $g \cdot P_m$ est transmise par l'intermédiaire du rotor.

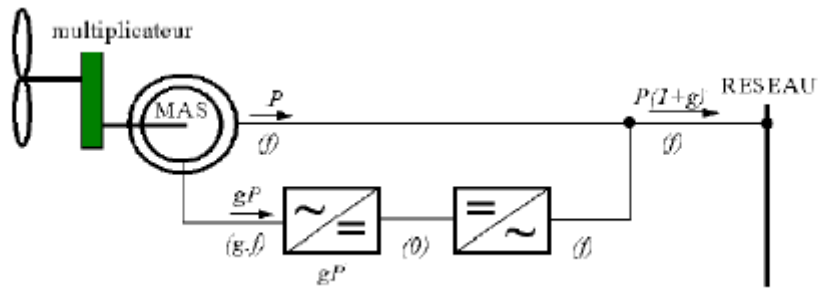


Fig.2.3 Représentation des écoulements de puissance de la MADA

En négligeant toutes les pertes, on peut expliquer très simplement le principe de la MADA alimentée à travers le montage onduleur redresseur d'une cascade hyposynchrone.

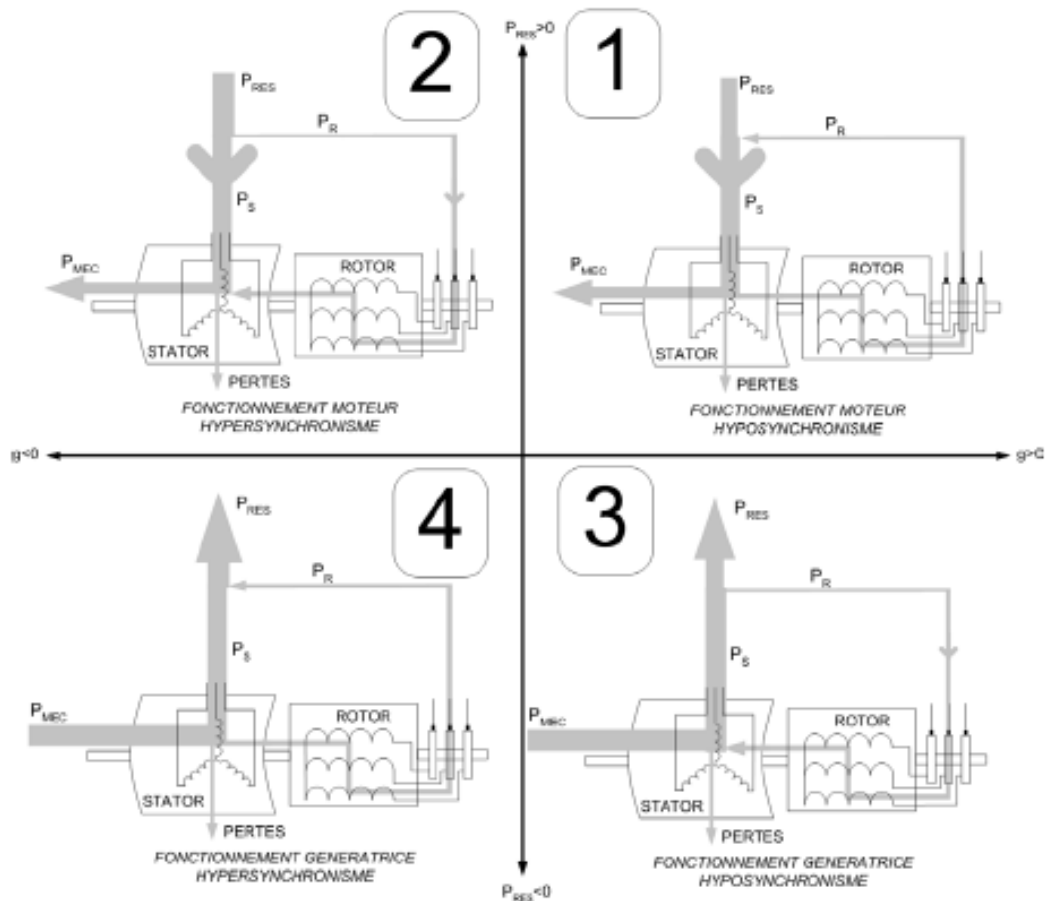


Fig.2.4 Récapitulatif des modes de fonctionnement en moteur et génératrice, en mode hypo ou hyper synchrone

Pour une utilisation dans un système éolien, nous intéresserons donc aux quadrants 3 et 4.

En effet si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas $\pm 30\%$ de la vitesse du synchronisme (ce qui représente le compromis idéal entre la taille des convertisseurs et

la plage de variation de vitesse), la machine sera capable de débiter une puissance allant de 0.7 à 1.3 fois la puissance nominale, pour cela les convertisseurs seront dimensionnés pour faire transiter la puissance de glissement, c'est-à-dire 0.3 fois (maximum) de la puissance nominale.

2.1.4 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA MADA

Avantages

- La double alimentation de la machine facilite la mesure des courants statoriques et rotoriques, ce qui offre une meilleure flexibilité et précision pour le contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- L'alimentation de la machine grâce à des convertisseurs permet un meilleur contrôle des fréquences, et ainsi augmenter le rendement.
- Comportement se rapprochant de celui des machines synchrones et donc simple à utiliser.
- Convertisseurs dimensionnés pour 30% de la puissance nominale.

Inconvénients

- Elle est généralement plus volumineuse que la machine à cage.
- Le coût et le nombre des convertisseurs à utiliser.
- Le coût de la machine assez élevé [19].

2.2 MODELISATION DE LA MADA

Il est nécessaire d'établir un modèle mathématique rigoureux, mais assez simple afin de faciliter les calculs de simulation, pour cela nous introduirons quelques hypothèses simplificatrices qui ne nous éloignent pas beaucoup du comportement réel de la machine.

2.2.1 HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES

Pour notre étude nous considérerons les hypothèses suivantes [20,21]

- L'entrefer est supposé d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche négligeable.
- Les flux sont des fonctions linéaires des courants.
- Les pertes par hystérésis et courants de Foucault sont négligées.
- Les résistances ne varient pas avec la température et supposées constantes, l'effet de peau est négligé.
- La répartition des forces magnétomotrices est sinusoïdale.
- La machine est symétrique, l'addition des courants et tensions est nulle.

Parmi les conséquences de ces simplifications :

- L'additivité des flux.
- La constance des inductances propres.
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements du stator et du rotor en fonction de l'angle électrique et de leurs axes magnétiques.

Le schéma ci-dessous représente la disposition des enroulements statoriques et rotoriques, où la position du rotor par rapport au stator est en fonction de la vitesse de rotation Ω , tel que $\Omega = \frac{d\theta}{dt}$

Où θ représente l'angle entre les enroulements statoriques et rotoriques.

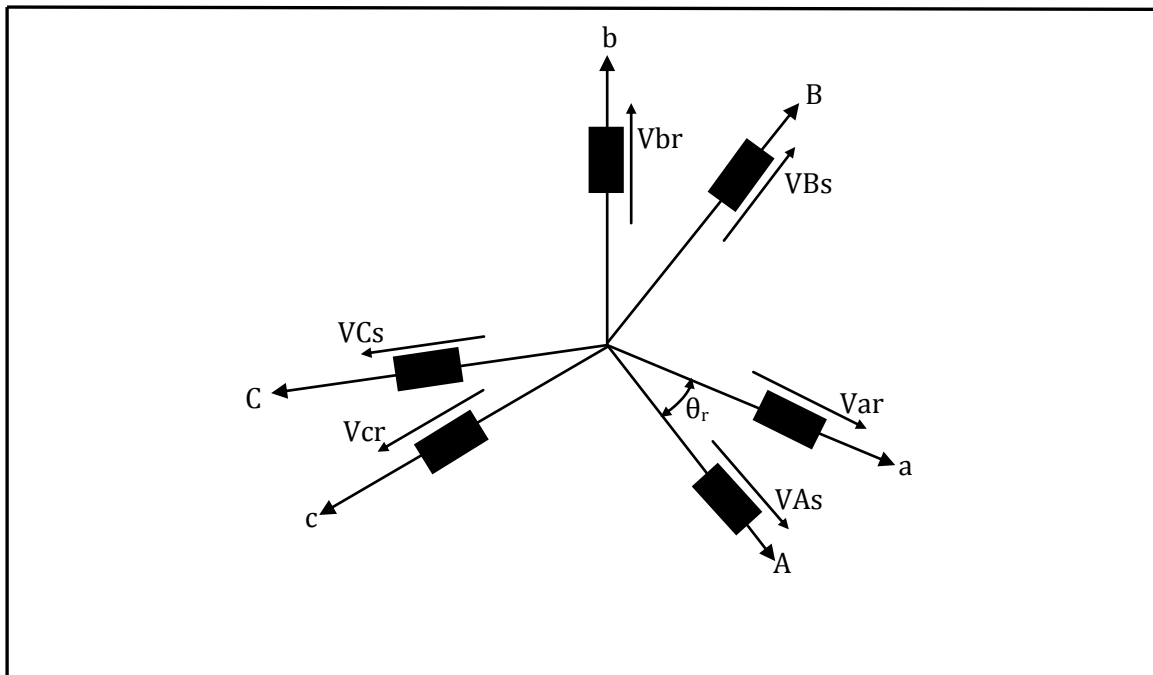


Fig.2.5 Représentation des enroulements triphasés statorique et rotorique et leurs positions relatives

Par application des lois d'ohm et de faraday et en tenant compte des hypothèses simplificatrices le comportement de la machine peut être décrit par les équations différentielles suivantes développées ci-dessous [22].

2.2.2 EQUATIONS DES TENSIONS

Les équations du modèle s'écrivent sous forme matricielle respectivement pour le stator et le rotor de la façon suivante :

$$\begin{aligned} V_s &= [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \\ V_r &= [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \end{aligned} \quad (2.1)$$

Avec : $[V_s] = [V_{sa} \ V_{sb} \ V_{sc}]^T$ Vecteur tension statorique.

$[I_s] = [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}]^T$ Vecteur courant statorique.

$[V_r] = [V_{ra} \ V_{rb} \ V_{rc}]^T$ Vecteur tension rotorique.

$[I_r] = [i_{ra} \ i_{rb} \ i_{rc}]^T$ Vecteur courant rotorique.

$[\Phi_s] = [\Phi_{sa} \ \Phi_{sb} \ \Phi_{sc}]^T$ Vecteur flux statorique.

$[\Phi_r] = [\Phi_{ra} \ \Phi_{rb} \ \Phi_{rc}]^T$ Vecteur flux rotorique

$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$ matrice résistance statorique

$[R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$ matrice résistance rotorique

Les équations statorique et rotorique sont écrites respectivement dans les repères liés au stator et rotor de la machine, ce qui justifie l'absence de tensions dues au mouvement.

2.2.3 EQUATIONS DES FLUX

De la même manière que pour les équations générales, on retrouve les équations donnant les flux :

$$[\Phi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \quad (2.2)$$

$$[\Phi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s]$$

Où $[L_{ss}]$: Matrice d'inductance statorique.
 $[L_{rr}]$: Matrice d'inductance rotoriques.
 $[M_{rs}]$ Et $[M_{sr}]$: Matrices d'inductance mutuelle.

Tel que $[M_{rs}] = [M_{sr}]$

Et $[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}$, $[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$

$$[M_{sr}] = M \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

M_s, M_r : Inductances mutuelles statoriques et rotoriques

L_s, L_r : Inductances propres statorique et rotoriques

2.2.4 EQUATIONS MECANIQUES

L'expression générale du couple électromagnétique est donnée par :

$$\Gamma_e = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix}^t \cdot \frac{d}{dt} [M_{sr}] \cdot \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

L'équation du mouvement est régie par :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = \Gamma_e - \Gamma_r - f_g \cdot \Omega \quad (2.4)$$

2.3 MODELISATION DE PARK DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION

2.3.1 CONCEPT

La modélisation de la MADA en utilisant les équations présentées ci-dessus rend très complexe l'implémentation des simulations. En effet, on est en présence d'un nombre d'équations fortement couplées en plus d'un nombre de variables très important.

La solution la plus communément utilisée pour contourner ce problème est un changement de variable exprimant les grandeurs triphasées dans un repère diphasé tournant et à axes orthogonaux dans un repère dq mobile. Cette transformation s'appelle : Transformation de Park [23].

Cette transformation revient à substituer, conceptuellement, des enroulements biphasés selon les axes d et q aux enroulements triphasés réels de la machine. On a donc au final quatre enroulements : ds , qs , dr et qr .

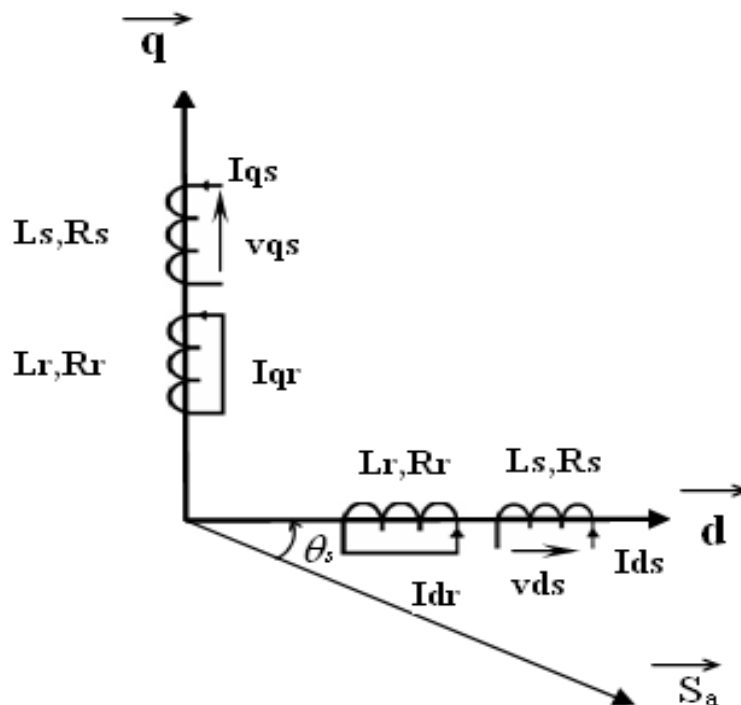


Fig.2.6 Représentation des enroulements fictifs selon d et q

2.3.2 REALISATION

Cette transformation se fait en deux étapes :

- L'écriture des grandeurs statoriques et rotoriques chacune dans un repère diphasé fixe (Repères $\alpha\beta_s$ et $\alpha\beta_r$ respectivement),

- L'expression de ces grandeurs transformées dans un repère commun dq mobile.

Ce repère dq commun nous permet de simplifier le modèle final en faisant coïncider les repères de transformation des grandeurs statoriques et rotoriques grâce à une relation simple entre les angles que leurs repères respectifs forment avec le repère dq commun (angles θ_s et θ_r respectivement) [18].

$$\theta_s = \theta + \theta_r.$$

Il faut noter que le repère dq forme un angle quelconque avec les repères $\alpha\beta_s$ et $\alpha\beta_r$.

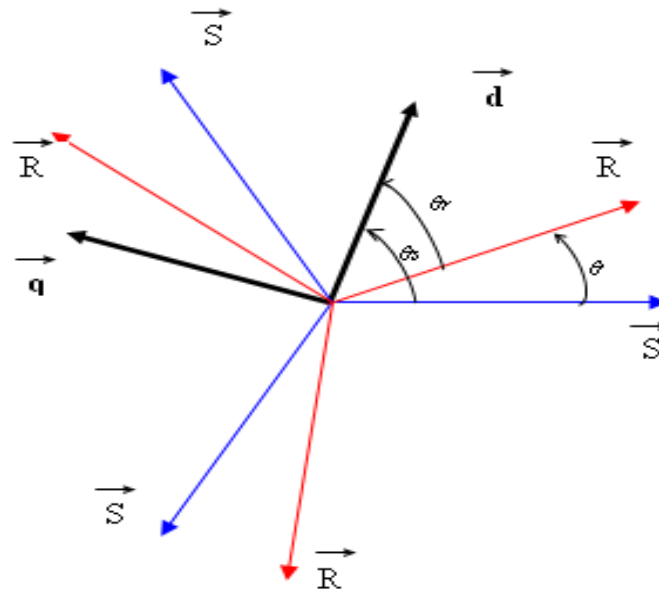


Fig.2.7 Représentation des axes d et q au stator et au rotor avec les angles θ , θ_s et θ_r

La matrice de passage du référentiel du triphasé fixe vers le référentiel diphasé mobile dq est :

$$P(\alpha) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\alpha) & -\sin(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

L'angle α étant égal à θ_s pour les grandeurs statoriques et à θ_r pour les grandeurs rotoriques.

2.3.3 EQUATIONS DANS UN REPERE QUELCONQUE

- **Tensions**

$$\begin{cases} [Vdq, s] = [P(\theta_s)] * [Vsabc] \\ [Vdq, r] = [P(\theta_r)] * [Vrabc] \end{cases} \quad (2.5)$$

- **Courants**

$$\begin{cases} [Idq, s] = [P(\theta_s)] * [Isabc] \\ [Idq, r] = [P(\theta_r)] * [Irabc] \end{cases} \quad (2.6)$$

- **Flux**

$$\begin{cases} [\Phi dq, s] = [P(\theta_s)] * [\Phi sabc] \\ [\Phi dq, r] = [P(\theta_r)] * [\Phi rabc] \end{cases} \quad (2.7)$$

Le développement de ces écritures matricielles nous donne :

- **Les tensions statoriques**

$$\begin{cases} Vds = Rs * Ids + \frac{d}{dt} \Phi ds - \omega a * \Phi qs \\ Vqs = Rs * Iqs + \frac{d}{dt} \Phi qs + \omega a * \Phi ds \end{cases} \quad (2.8)$$

- **Les tensions rotoriques**

$$\begin{cases} Vdr = Rr * Idr + \frac{d}{dt} \Phi dr - (\omega a - \omega) * \Phi qr \\ Vqr = Rr * Iqr + \frac{d}{dt} \Phi qr + (\omega a - \omega) * \Phi dr \end{cases} \quad (2.9)$$

- **Les flux de la machine**

$$\begin{cases} \Phi dq, s = Ls * Idq, s + Msr * Idq, r \\ \Phi dq, r = Msq * Idq, s + Lr * Idq, r \end{cases} \quad (2.10)$$

Ces équations se résument à cette écriture matricielle :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{dq,s} \\ \Phi_{dq,r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_s & 0 \\ 0 & M & 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dq,s} \\ I_{dq,r} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

2.3.4 CHOIX DU REPERE dq

Bien que le modèle de la machine présenté dans les équations précédentes soit simplifié, il est encore possible de fixer les angles θ_s et θ_r [23].

Trois choix « évidents » s'offrent à nous :

- Lier le repère dq au champ tournant
- Lier le repère dq au stator
- Lier le repère dq au rotor

Dans chacun de ces référentiels, les équations de la machine s'écrivent plus simplement que dans un repère dq quelconque. Nous présentons ci-après les différentes possibilités :

- **Référentiel dq lié au stator**

C'est un référentiel pratique pour étudier les variations importantes de la vitesse instantanée.

En pratique, cela s'écrit : $\omega_a=0$, $\omega_s=0$ et $\omega_r=-\omega$

Le système précédent s'écrira comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s * I_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} \\ V_{qs} = R_s * I_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} \end{cases} \quad (2.12)$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r * I_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} + \omega * \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r * I_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} - \omega * \Phi_{dr} \end{cases} \quad (2.13)$$

- **Référentiel dq lié au rotor**

C'est un référentiel pratique pour l'étude des régimes transitoires électriques pendant lesquels la vitesse est considérée comme constante.

En pratique, cela s'écrit : $\omega_a=\omega$, $\omega_s=0$ et $\omega_r=\omega$.

Le système précédent s'écrira comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s * I_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega * \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s * I_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega * \Phi_{ds} \end{cases} \quad (2.14)$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r * I_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} \\ V_{qr} = R_r * I_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} \end{cases} \quad (2.15)$$

- **Référentiel dq lié au champ tournant**

C'est un référentiel pratique pour la régulation de la machine car il offre l'avantage de donner des grandeurs constantes en régime permanent

En pratique, cela s'écrit : $\omega_a = \omega_s$, $\omega_s = \omega_s$ et $\omega_r = \omega_r$

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s * I_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_s * \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s * I_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega_s * \Phi_{ds} \end{cases} \quad (2.16)$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r * I_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - \omega_r * \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r * I_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + \omega_r * \Phi_{dr} \end{cases} \quad (2.17)$$

C'est ce système qui sera adopté lors de la conception des systèmes de simulation pour l'étude de la machine asynchrone à double alimentation, étant donné les simplifications qu'il apporte.

Expression du couple électromagnétique

Comme la transformation de Park conserve la puissance instantanée, l'expression de la puissance électrique totale est :

$$P_e = (V_{ds} \cdot I_{ds} + V_{qs} \cdot I_{qs}) + (V_{dr} \cdot I_{dr} + V_{qr} \cdot I_{qr}) \quad (2.18)$$

$$P_e = \omega_s(\varphi_{ds} \cdot I_{qs} - \varphi_{qs} \cdot I_{ds}) + (\omega_s - \omega_r)(\varphi_{dr} \cdot I_{qr} - \varphi_{qr} \cdot I_{dr}) \quad (2.19)$$

Les expressions des flux nous donnent :

$$(\varphi_{ds} \cdot I_{qs} - \varphi_{qs} \cdot I_{ds}) = -(\varphi_{dr} \cdot I_{qr} - \varphi_{qr} \cdot I_{dr}) \quad (2.20)$$

On sait aussi que :

$$\Gamma_e = P_e / \Omega_s$$

D'où l'expression finale du couple

$$\begin{aligned} \Gamma_e &= p \cdot (\varphi_{ds} \cdot I_{qs} - \varphi_{qs} \cdot I_{ds}) \\ \Gamma_e &= p \cdot M \cdot (I_{dr} \cdot I_{qs} - I_{qr} \cdot I_{ds}) \\ \Gamma_e &= p \cdot \frac{M}{L_r} \cdot (\varphi_{dr} \cdot I_{qs} - \varphi_{qr} \cdot I_{ds}) \\ \Gamma_e &= p \cdot \frac{M}{L_r} \cdot (\Phi_{dr} I_{qs} - q_s I_{dr}) \end{aligned} \quad (2.21)$$

2.3.5 SCHEMAS EQUIVALENTS DE LA MACHINE SELON LES AXES D ET Q

Les schémas équivalents suivant les axes d et q ainsi obtenus pour la MADA sont donc en tous points identiques à ceux de la machine asynchrone. La différence résidera dans le fait que ses tensions rotoriques sont non nulles [20].

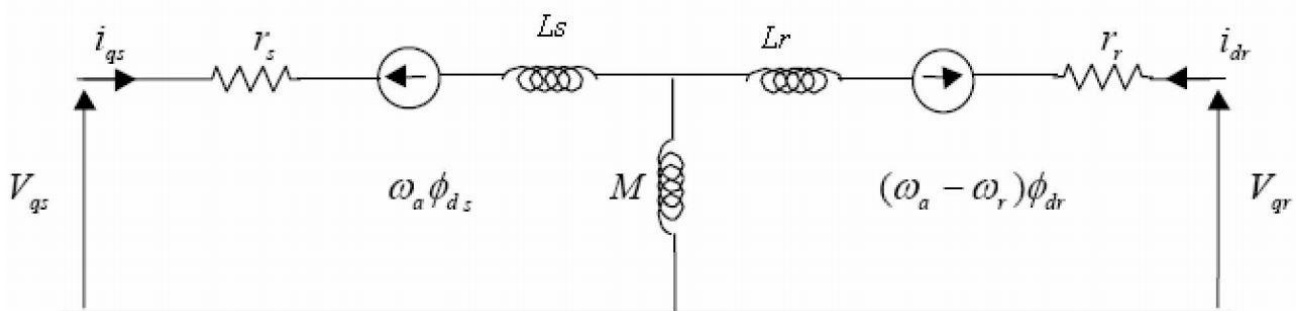


Fig.2.9 Schéma équivalent suivant l'axe d

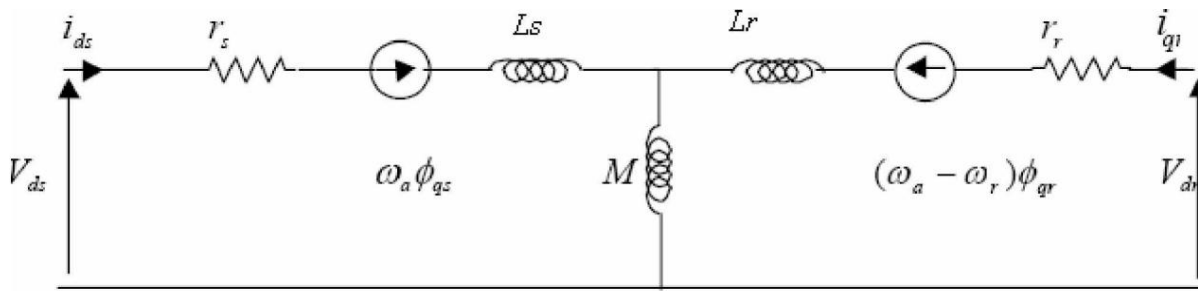


Fig.2.10 Schéma équivalent suivant l'axe q

Ces deux schémas équivalents sont valables pour tout repère dq qui tourne à une vitesse ω_a . Il suffit de remplacer la valeur de ω_a lorsque l'on définit les axes dq pour avoir les schémas équivalents correspondants.

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la modélisation linéaire de la machine asynchrone à double alimentation. Les équations de la machine ont été développées dans le repère triphasé puis diphasé selon le modèle de Park.

Ce modèle sera ensuite implémenté sur le logiciel MATLAB SIMULINK en vue d'étudier les creux de tensions sur la machine à double alimentation.

CHAPITRE 3 : EFFET DES CREUX DE
TENSION SUR LA MADA-
SIMULATIONS ET INTERPRETATIONS

INTRODUCTION

Un des principaux inconvénients rencontrés lors de l'exploitation de l'énergie éolienne est la sensibilité des génératrices électriques aux perturbations du réseau. Ce constat est d'autant plus flagrant pour les machines à vitesse variable qui sont généralement des MADA. Ces défauts peuvent mener à la déconnexion de l'éolienne du réseau pour éviter la détérioration des équipements (cascade hyposynchrone notamment), ce qui présente un risque grave pour la stabilité du réseau, comme le montre l'incident de l'écroulement du réseau Italien [25]. C'est pourquoi il est important d'étudier l'influence de ces défauts sur les génératrices électriques.

Dans le présent chapitre, nous allons étudier les effets des creux de tension sur deux machines asynchrones à double alimentation de puissances différentes avant de faire la comparaison de leurs comportements. La première machine a une puissance de 3.5kW tandis que la seconde a une puissance de 300kW.

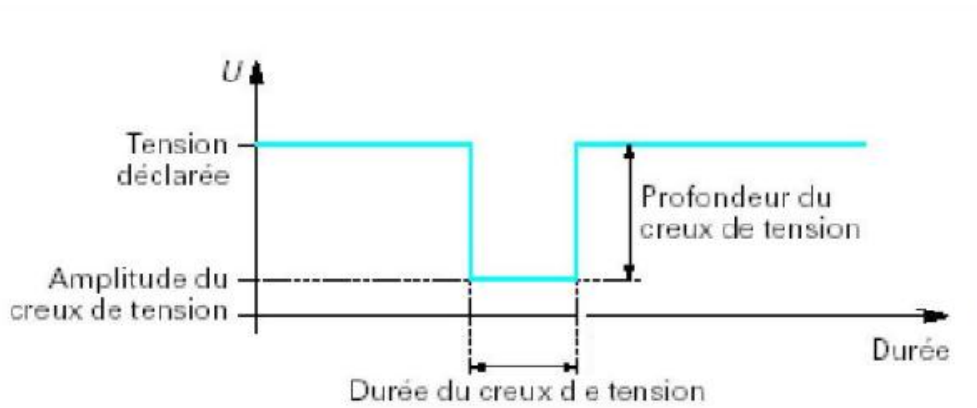
L'approche consiste à modéliser les deux machines sous Simulink et de les commander grâce à une commande vectorielle indirecte qui maintient P et Q à des valeurs constantes (à savoir P_n et 0 respectivement) avant de les soumettre à différents creux de tension pour voir l'évolution des grandeurs caractéristiques de la machine : Courants statoriques et rotoriques et couple.

La vitesse de rotation de la machine est considérée comme étant constante durant les simulations étant donné la très faible durée des creux (quelques centaines de millisecondes au maximum).

3.1 RAPPELS SUR LES CREUX DE TENSION

3.1.1 DEFINITIONS

Il s'agit d'une diminution brusque (10% à 90% de la tension nominale en général) de la tension du réseau à laquelle succède un retour à la tension nominale après une courte durée. Le schéma ci-dessous illustre la forme d'un creux de tension.



Variation de la valeur efficace : de la tension

Fig.3.1 Forme et paramètres d'un creux de tension

L'amplitude du creux de tension ressentie par un élément est déterminée par sa distance avec le point de défaut. La durée du creux dépend du temps pendant lequel le défaut est maintenu : il est fonction de la rapidité de détection et de réaction des équipements de protection. En général, on considère les durées supérieures à 10ms pour l'étude.

La réglementation actuelle impose qu'une unité de production soit capable de supporter des creux de tension de 70% pendant 600ms et de 30% pendant 2.5s. C'est ces valeurs limites qui ont été considérées dans nos simulations de creux de longue durée [21].

3.1.2 CLASSIFICATION DES CREUX DE TENSION

Le tableau suivant présente les principaux types de creux de tension :

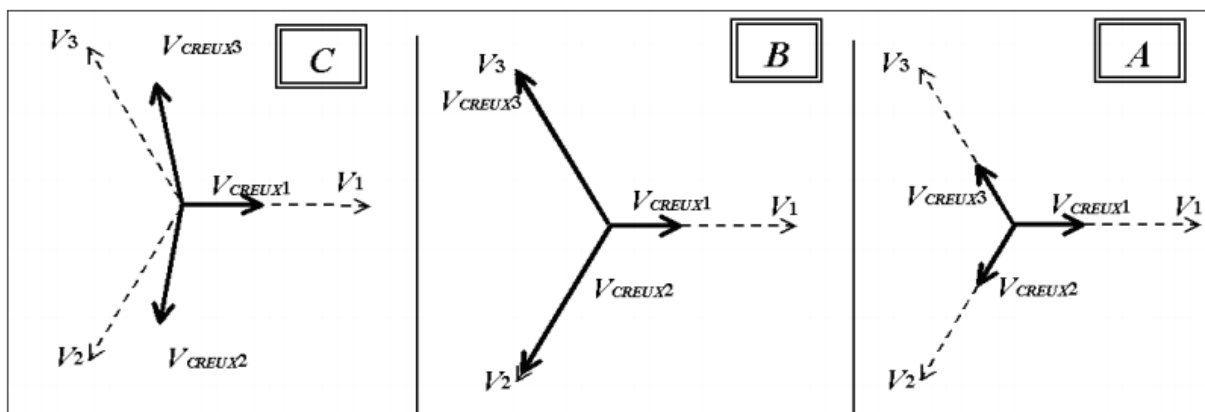


Tableau 3.1 Classification des principaux creux de tension

- **Classe A** : Creux triphasé équilibré
- **Classe B** : Creux monophasé
- **Classe C** : Creux biphasé avec saut de phase

Notre étude va porter sur les creux de classe A qui sont les plus fréquents et qui ont les plus fortes répercussions sur la machine.

3.2 MODELE SIMULINK

Dans cette partie, on présentera le schéma bloc du modèle de la MADA connectée au réseau en génératrice, de sa commande et des mesures qui sont associées au système.

Les courants générés en pratique dans la machine par des creux de tension étant très importants, ils sont atténués grâce à un système de protection appelé CROWBAR qui évacue le surplus de courant dans une résistance spécialement dimensionnée et ainsi protéger les convertisseurs placés au rotor. On ne modélise cependant pas ce système pour visualiser l'influence réelle des creux de tension sur la machine.

3.2.1 MODELE DU SYSTEME

Le modèle de la machine a été fait sur trois niveaux qu'on montre et décrit ici :

3.2.1.1 MODELE DE LA MACHINE

C'est dans cette partie que la machine est modélisée. On utilise les expressions des équations linéaires de la machine suivant Park pour obtenir les courants statoriques et rotoriques.

Les paramètres de la machine (Résistances et inductances) sont insérés sous forme de matrices.

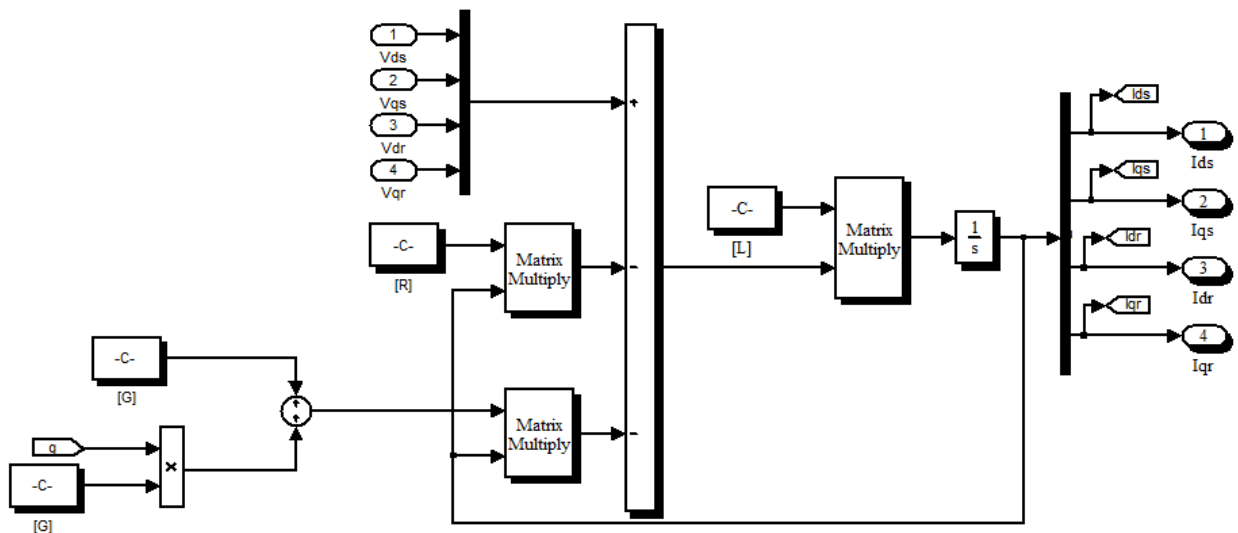


Fig.3.2 Modèle Simulink de la machine asynchrone à double alimentation

3.2.1.2 COMMANDE DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION

Dans cette partie, on voit la machine de l'extérieur avec en entrée ses tensions statoriques et rotoriques et un accès aux courants statoriques et rotoriques.

On montre ensuite le détail pour les blocs de commande indirecte, l'onduleur à MLI et l'estimateur de flux.

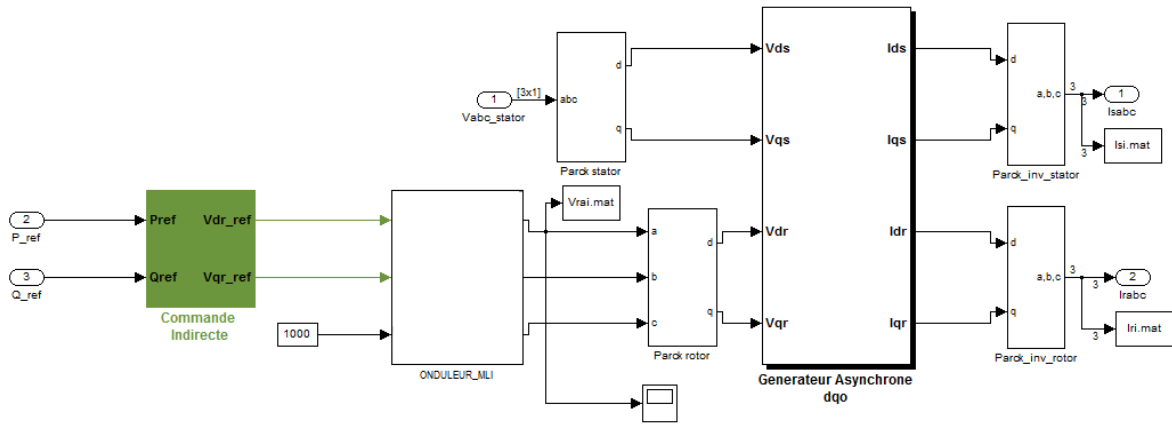


Fig.3.3 Modèle Simulink de la machine avec sa commande

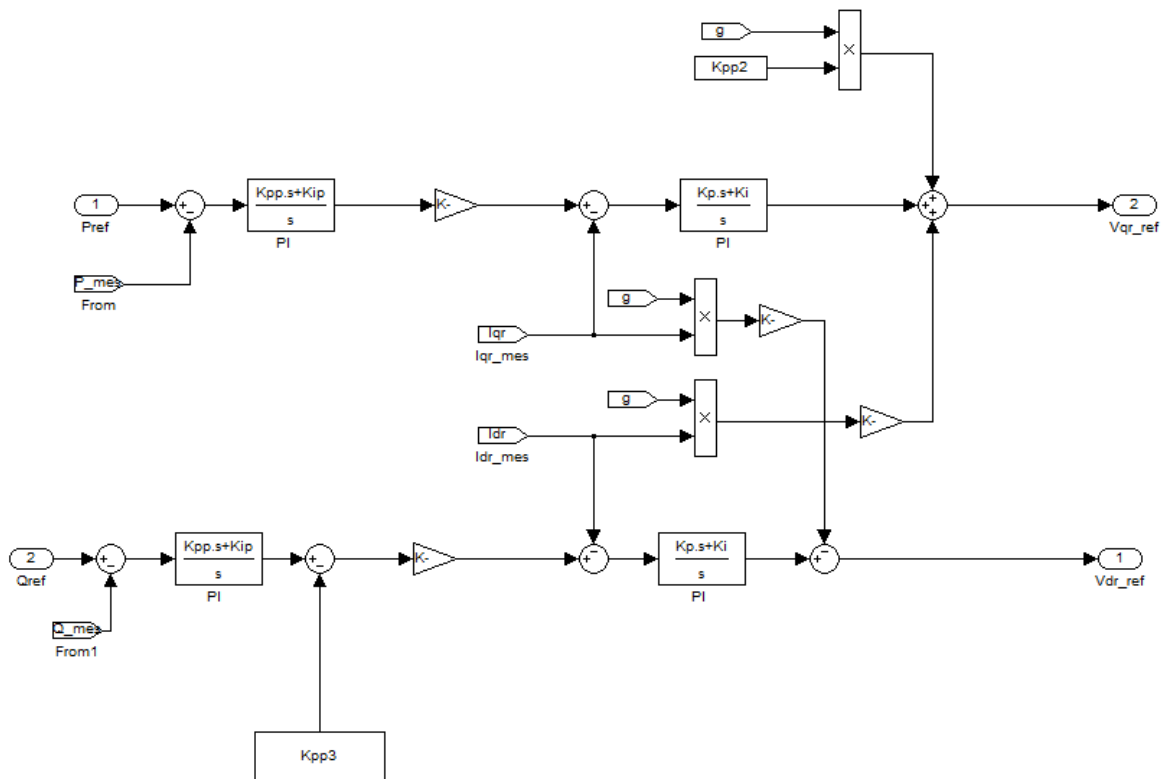


Fig.3.4 Modèle Simulink de la commande indirecte de la MADA

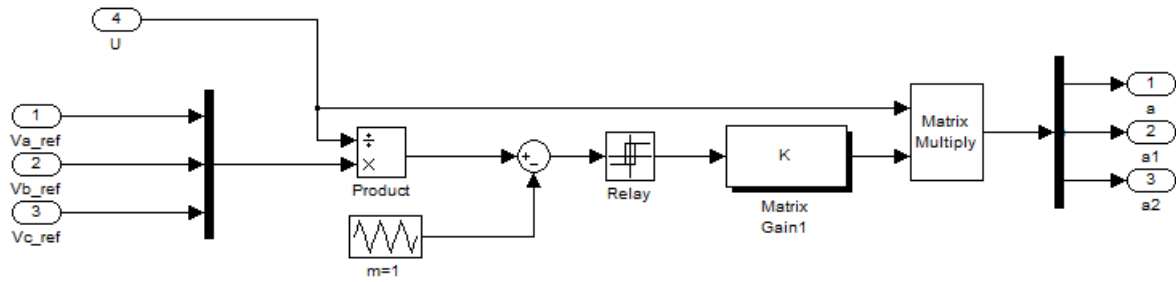


Fig.3.5Modèle SIMULINK de l'onduleur à MLI

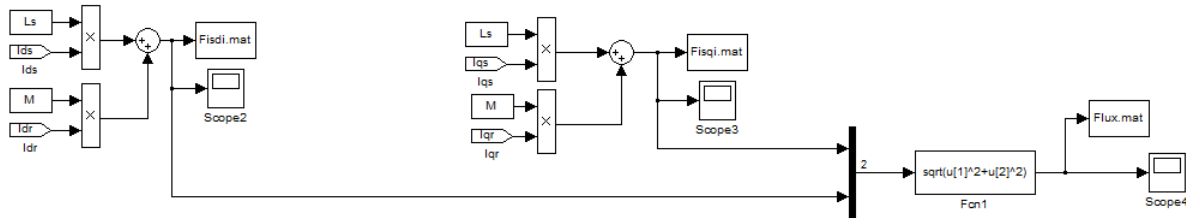


Fig.3.6Modèle SIMULINK de l'estimateur de flux

3.2.1.3 VARIATION DES PARAMETRES, GENERATEUR DE CREUX ET MESURES

Ce bloc permet d'agir directement sur les données principales qui influencent le fonctionnement de la machine qui sont le réseau, le creux de tension, les puissances active et réactive de référence et la vitesse d'entraînement.

Ce bloc nous donne accès aux courants statoriques et rotoriques, à la tension statorique et aux puissances statoriques et rotoriques.

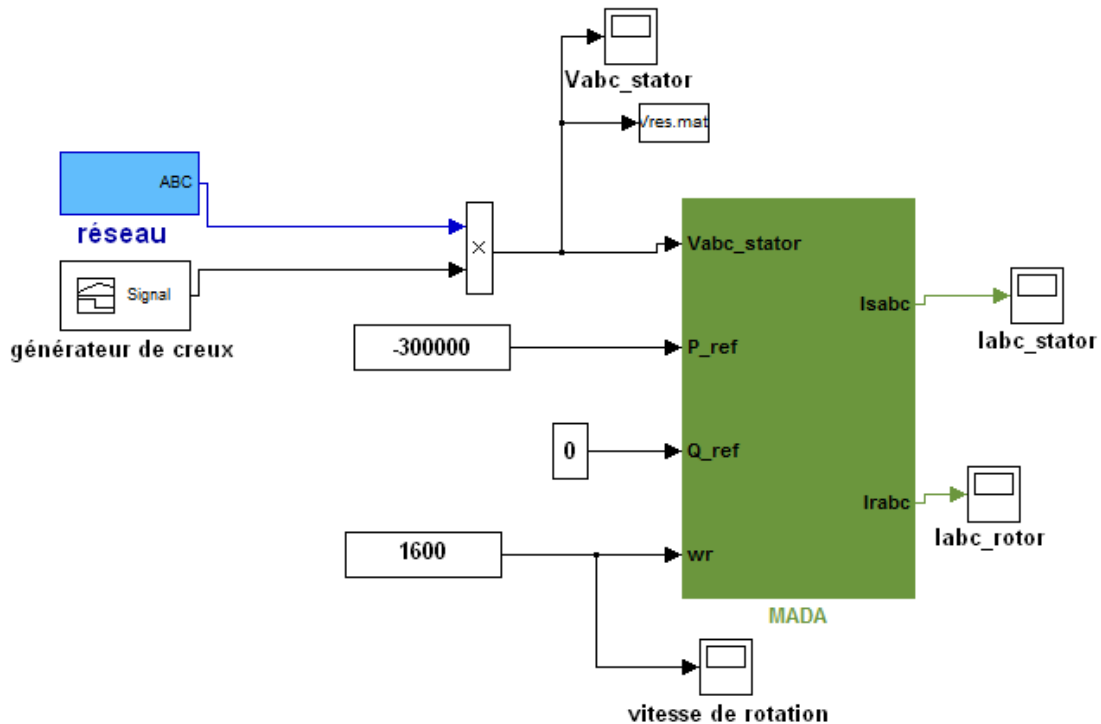


Fig.3.7Vue externe du modèle de la MADA avec ses entrées

Le bloc de mesure quant à lui nous permet de visualiser les puissances actives et réactives de la machine qu'il calcule en partant des courants et tensions directs et en quadrature.

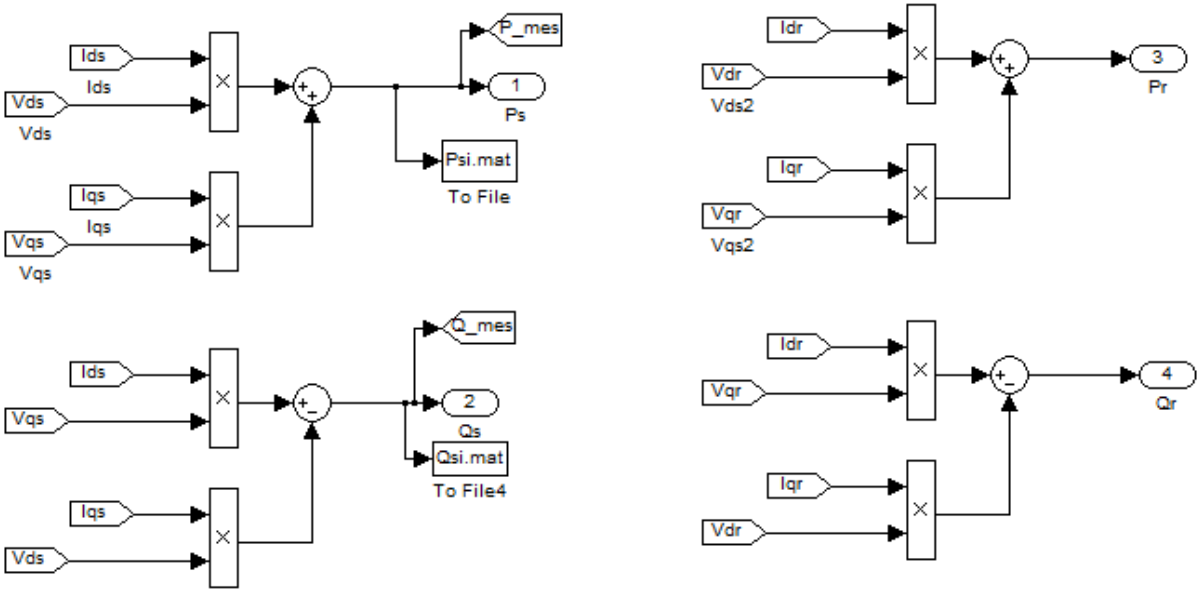


Fig.3.8 Représentation du bloc de mesures

3.3 SIMULATIONS POUR DES CREUX DE COURTE DUREE

3.3.1 SIMULATIONS POUR UN CREUX DE 30% D'UNE DUREE DE 10ms

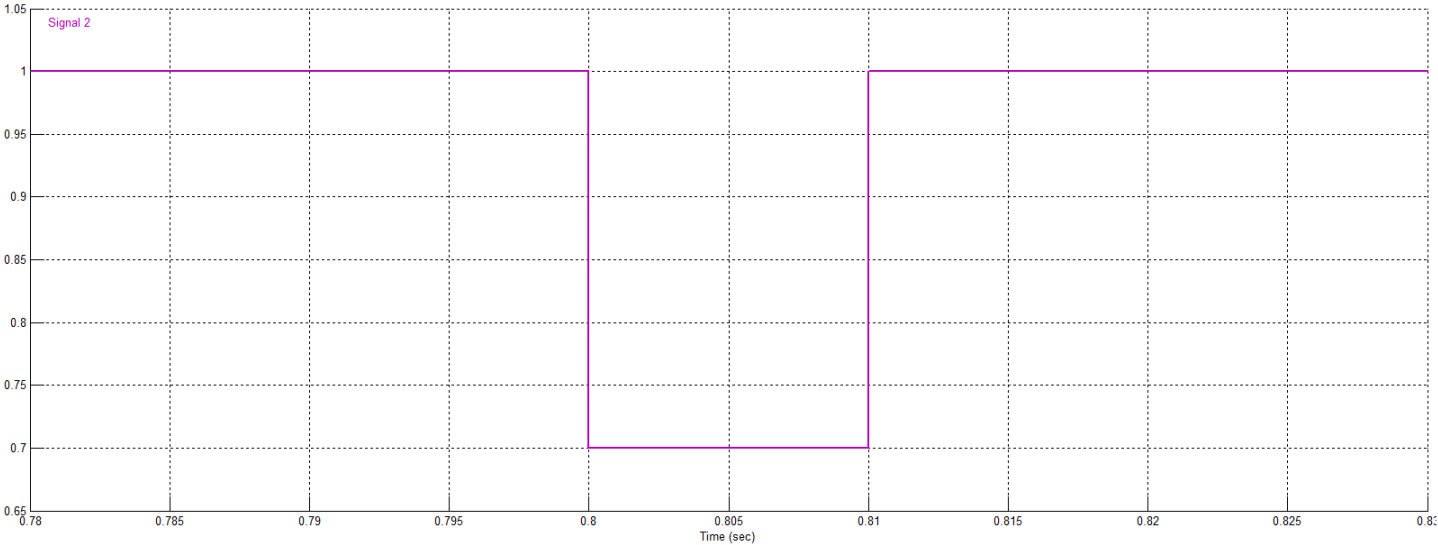


Fig.3.9 Creux de 30% -10ms appliqué aux deux machines

- **Courants statoriques**

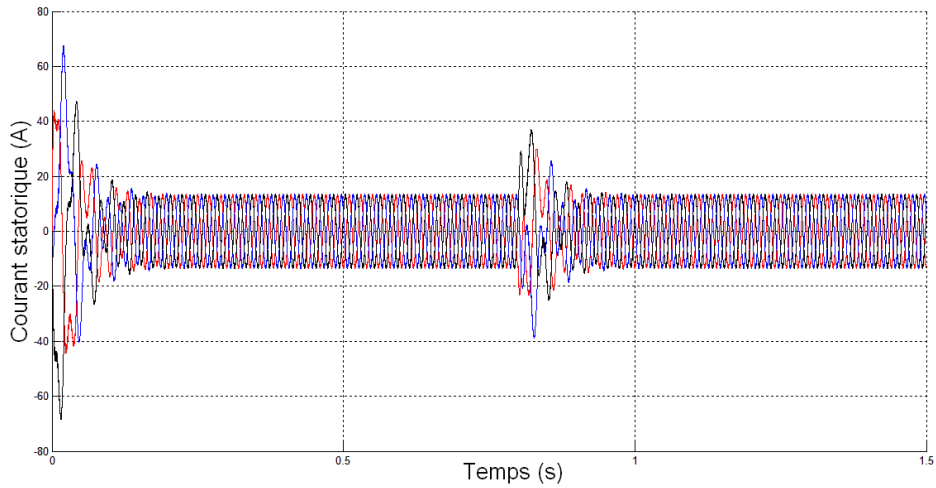


Fig.3.10 Courant statorique de la machine de 3.5kW pour un creux de tension de 30%

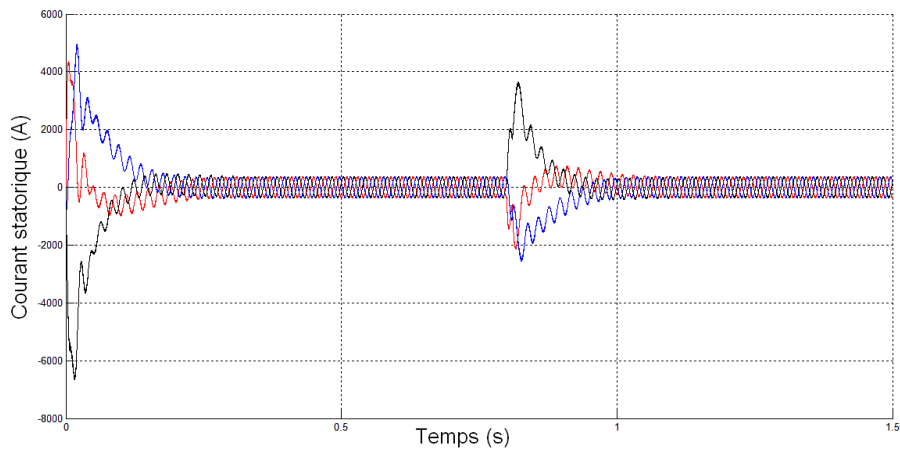


Fig.3.11 Courant statorique de la machine de 300kW pour un creux de tension de 30%

- **Courants rotoriques**

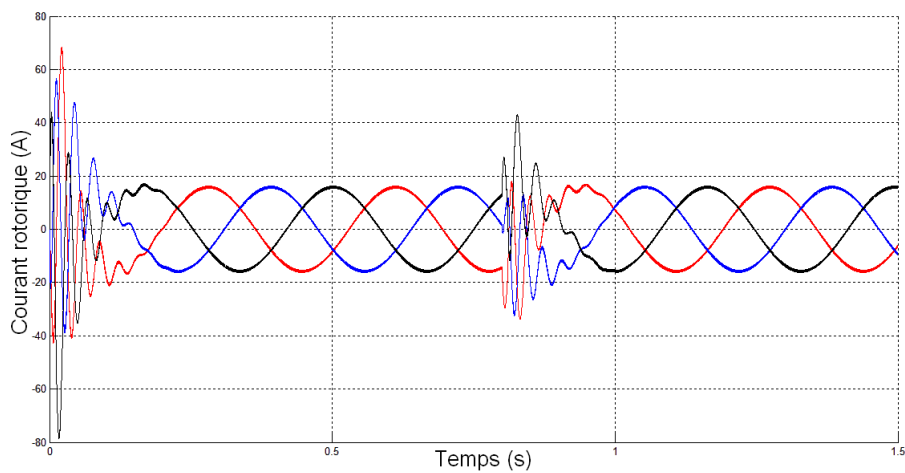


Fig.3.12 Courant rotorique de la machine de 3.5kW pour un creux de tension de 30%

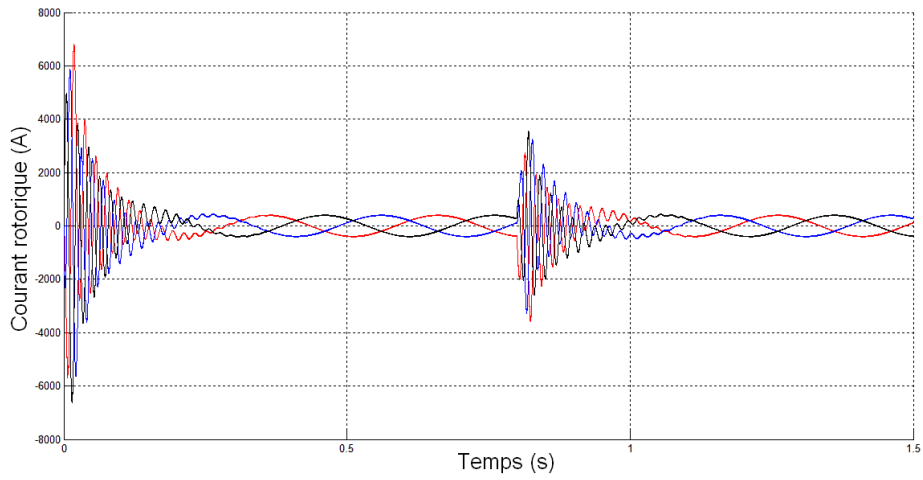


Fig.3.13 Courant rotorique de la machine de 300kW pour un creux de tension de 30%

- **Couples**

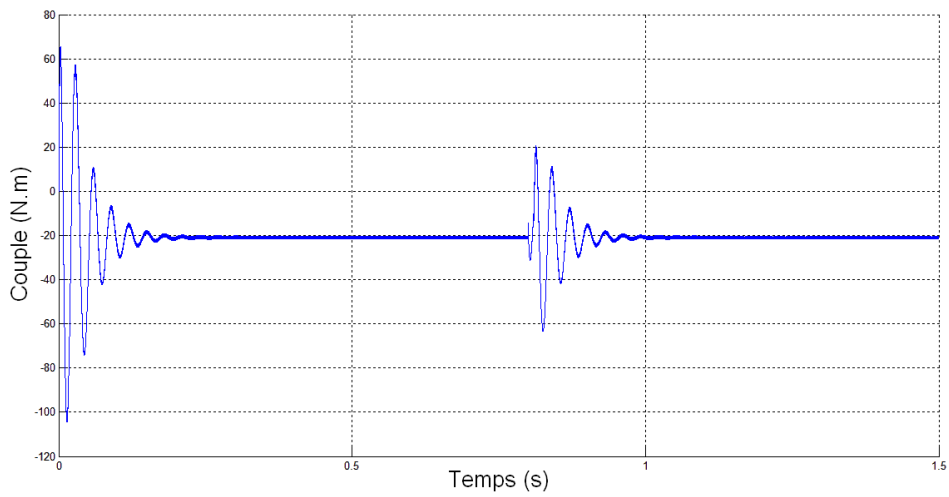


Fig.3.14 Couple de la machine de 3.5kW pour un creux de tension de 30%

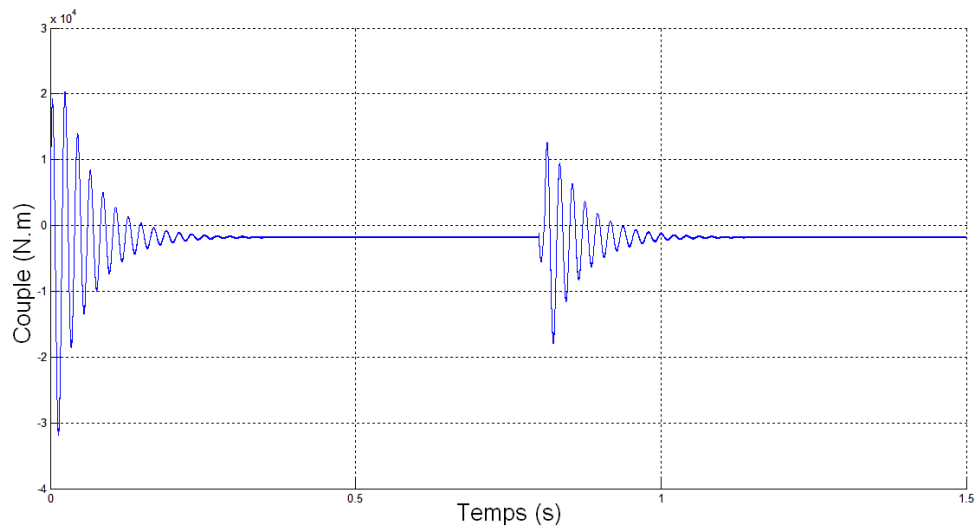


Fig.3.15 Couple de la machine de 300kW pour un creux de tension de 30%

Après application d'un creux de tension de 30% de la tension nominale et une durée de 10ms on constate :

- L'apparition de pics de courants importants au niveau des stators de deux machines jusqu'à 2 fois le courant statorique nominal pour la machine de 3.5kW et jusqu'à 10 fois le courant nominal pour la machine de 300kW.
- Des fluctuations tout aussi importantes en ce qui concerne le courant rotorique des deux machines, jusqu'à 2 fois pour la machine de 3.5kW et jusqu'à 4 fois pour la machine de 300kW.
- Des variations importantes pour les couples des deux machines pendant les creux.
- Un régime transitoires plus long pour la machine de 300kw que celui de la machine de 3.5kw après disparition du creux, elle met plus de temps à revenir au nominal.

Pour une meilleure appréciation des phénomènes nous allons effectuer des simulations pour un creux de tension d'une profondeur de 80% de la tension nominale.

3.3.2 SIMULATIONS POUR UN CREUX DE 80% D'UNE DUREE DE 10ms

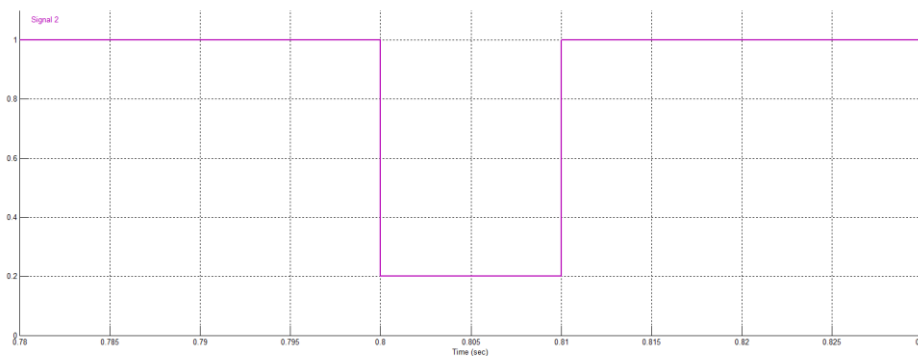


Fig.3.16 Creux de 80% appliqué aux deux machines

- **Courants statoriques**

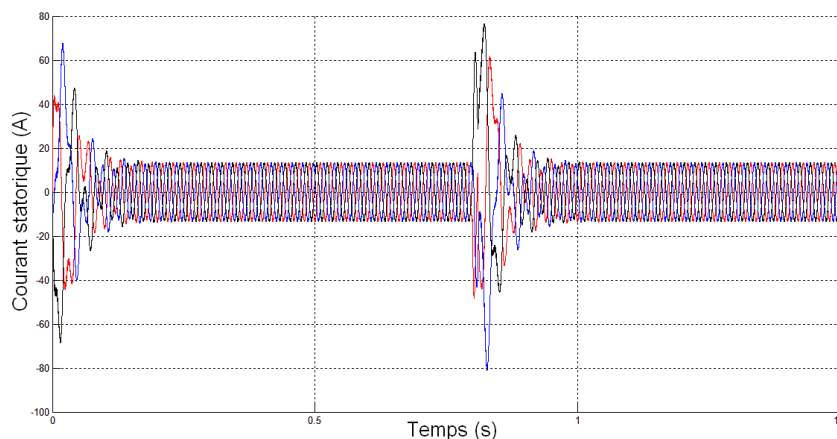


Fig.3.17 Courant statorique de la machine de 3.5kW pour un creux de tension de 80%

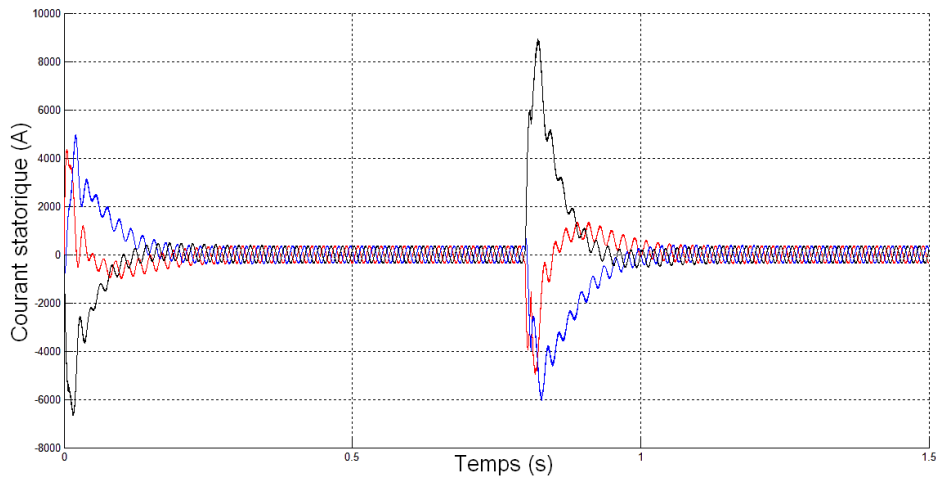


Fig.3.18 Courant statorique de la machine de 300kW pour un creux de tension de 80%

- **Courants rotoriques**

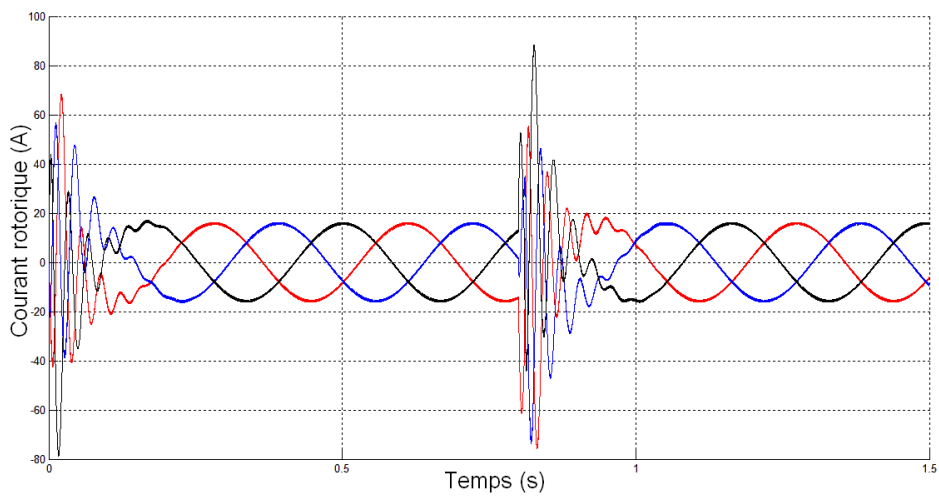


Fig.3.19 Courant rotorique de la machine de 3.5kW pour un creux de tension de 80%

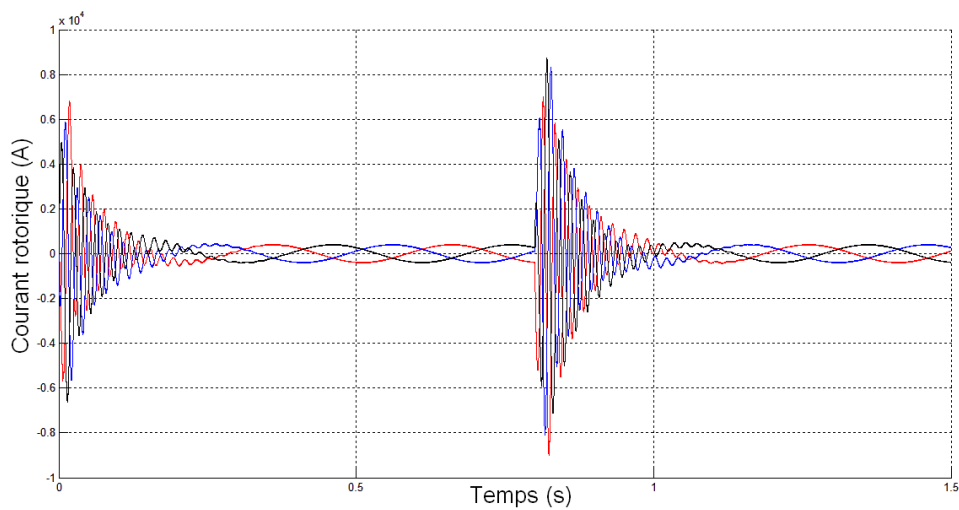


Fig.3.20 Courant rotorique de la machine de 300kW pour un creux de tension de 80%

- **Couples**

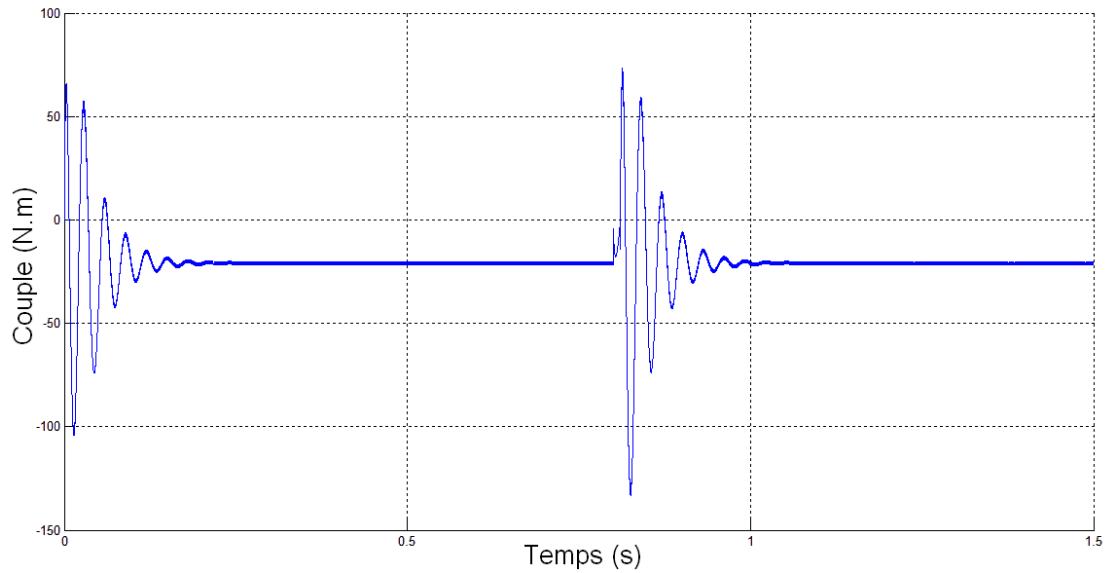


Fig.3.21 Couple de la machine de 3.5kW pour un creux de tension de 80%

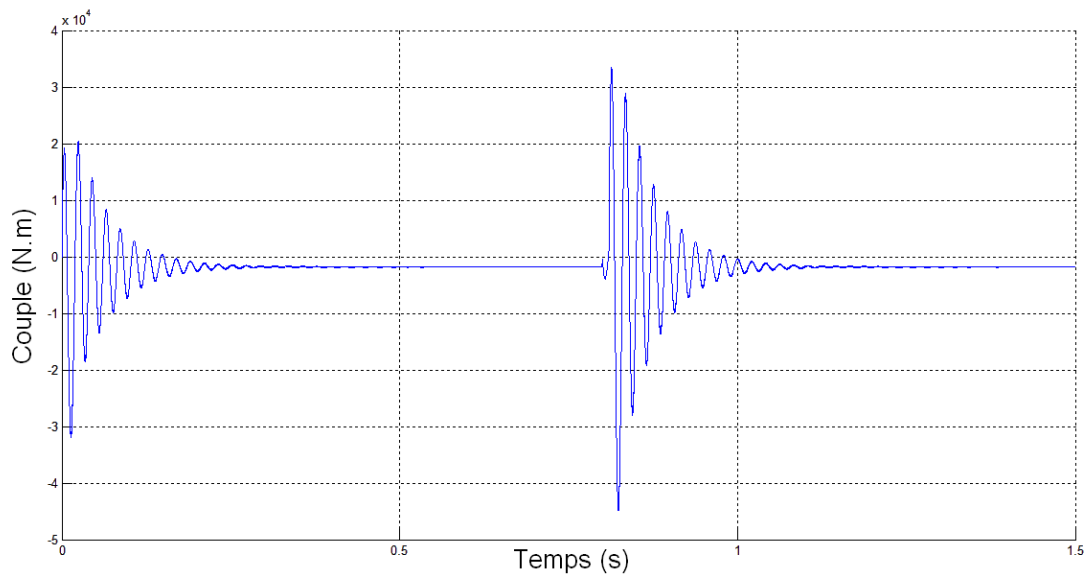


Fig.3.22 Couple de la machine de 300kW pour un creux de tension de 80%

Après application d'un creux de tension de 80% et une durée de 10ms, on constate un comportement global semblable à celui obtenu après application d'un creux de tension de 30% avec des pics beaucoup plus importants en amplitude.

Pour une meilleure analyse de l'effet de l'intensité des creux de tension nous allons superposer les résultats de simulations obtenus après application de plusieurs creux.

3.3.3 SUPERPOSITION DES CREUX DE TENSION

Dans cette partie, nous superposons les courants statoriques, rotoriques et couples des machines pour différents creux de tensions appliqués. Pour mieux observer l'influence de la profondeur des creux et de leur durée, nous commencerons par appliquer des creux de durée constante mais de profondeurs variables avant de fixer la profondeur des creux pour faire varier leurs durées.

3.3.3.1 SIMULATIONS POUR DES CREUX DE PROFONDEUR VARIABLE

Les creux de tension ont tous été appliqués à l'instant $t=0.8s$, pour une même durée d'application de 20ms et des amplitudes de 10%,30%,50%,80%,100%.

- **Courants statoriques**

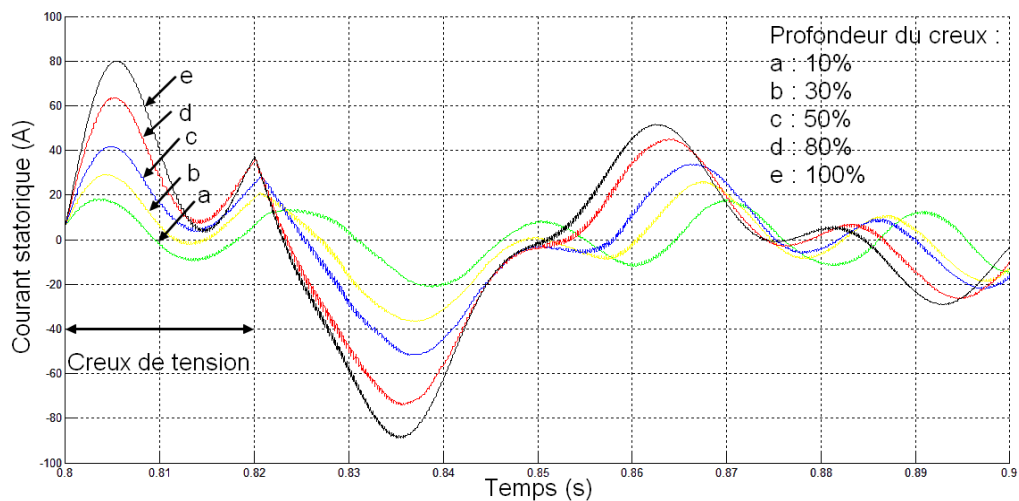


Fig.3.23 Représentation du courant statorique pour des creux de tension allant de 10% à 100% pour la machine de 3.5kW

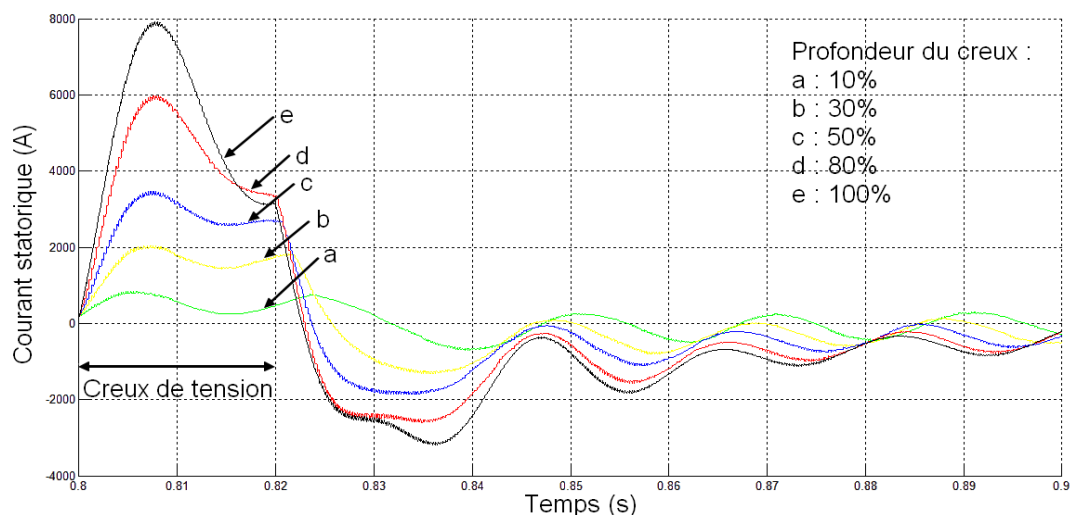


Fig.3.24 Représentation du courant statorique pour des creux de tension allant de 10% à 100% pour la machine de 300kW

Observations :

- Il y a apparition de deux pics, le premier juste après 0.8s (instant d'application du creux, 1^{er} régime transitoire) et le second juste après 0.82s (instant de disparition du défaut, 2nd régime transitoire)
- Les pics les plus importants sont ceux qui se produisent lors du rétablissement de la tension nominale pour la machine de 3.5kW.
- Une discontinuité dans l'évolution des courants apparait à 0.82 seconde et amorce le second pic du 2nd régime transitoire
- Les signaux représentant la même phase, ils se confondent après la disparition du 2nd régime nominal
- Nous constatons que plus l'intensité des creux de tension augmente plus l'amplitude des pics de courant augmente.

• Courants rotoriques

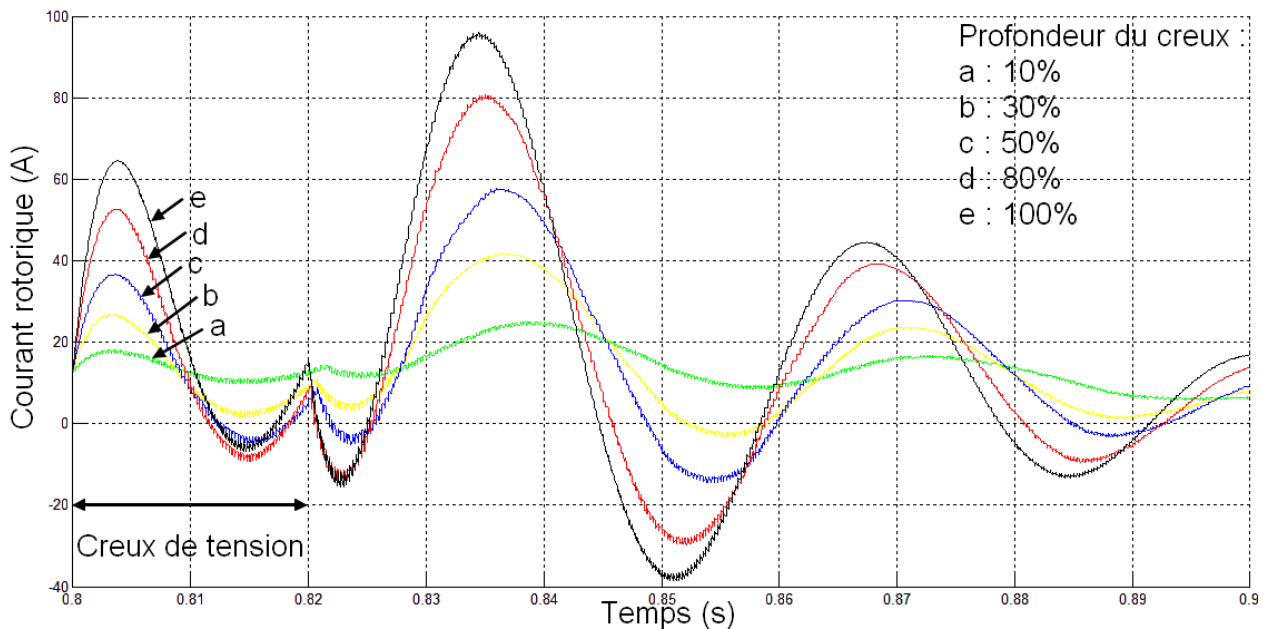


Fig.3.25 Représentation du courant rotoriques pour des creux de tension allant de 10% à 100% pour la machine de 3.5kW

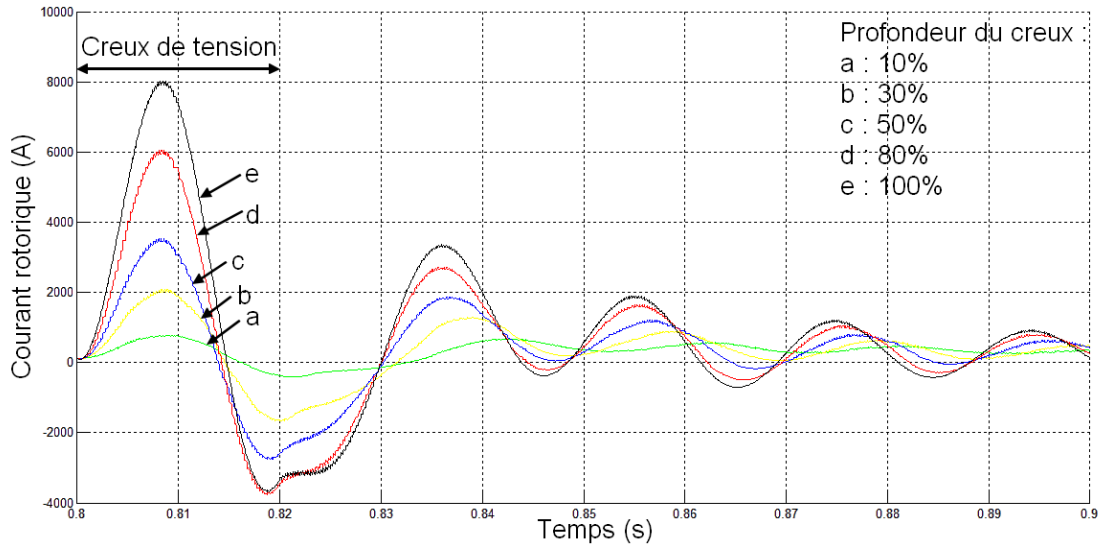


Fig.3.26 Représentation du courant rotoriques pour des creux de tension allant de 10% à 100% pour la machine de 300kW.

Observations

- Les pics les plus importants se produisent lors du rétablissement de la tension
- Le comportement des courants rotoriques est identique à celui observé dans les courants statoriques
- Les pics de courants sont plus importants pour la machine de 300kw, environ 20p.u le courant nominal, contrairement à la machine de 3.5kw qui n’atteint que 6p.u le courant nominal. Cela s’explique par la valeur des résistances statoriques des deux machines.

- **Couples**

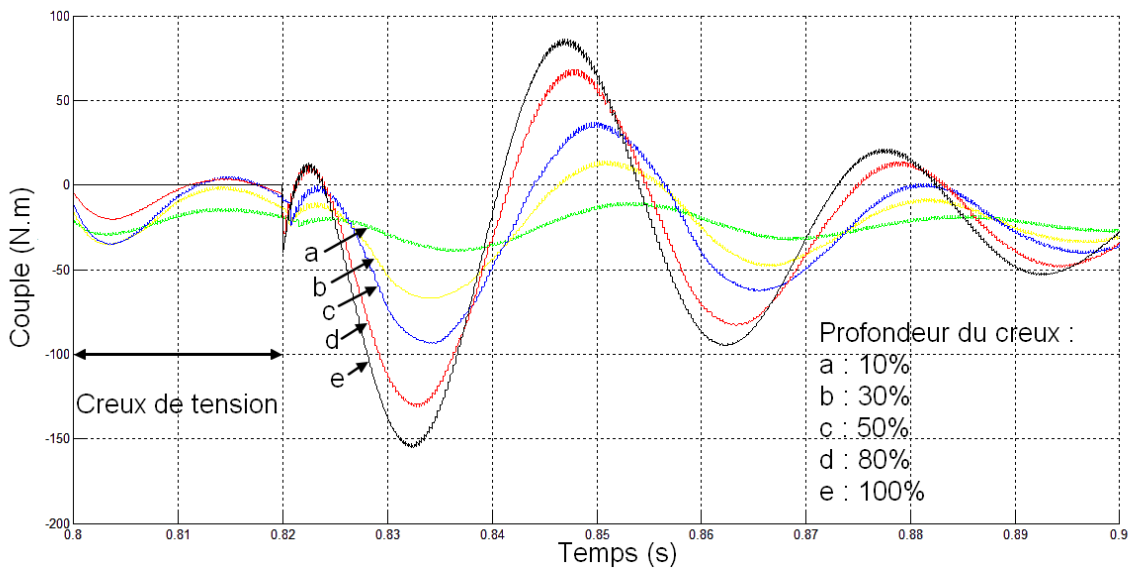


Fig.3.27 Représentation du couple pour des creux de tension allant de 10% à 100% pour la machine de 3.5kW

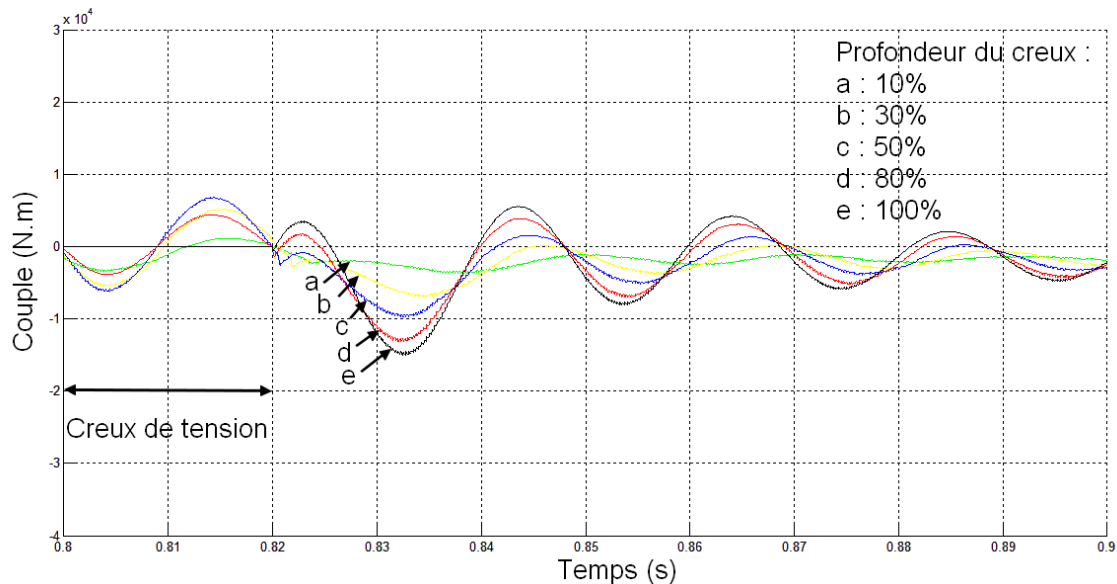


Fig.3.28 Représentation du couple pour des creux de tension allant de 10% à 100% pour la machine de 300kW

Observations

- Le couple s'annule pour un creux de tension de 100 % (coupure), cela jusqu'à la disparition du creux pour les deux machines.
- On observe de forts couples transitoires dans la machine à 3.5kW alors qu'ils sont relativement faibles sur la machine à 300kW.
- La machine à 300kW revient à son régime permanent plus rapidement que la machine à 3.5kW.

3.3.3.2 SIMULATIONS POUR DES CREUX DE DUREES VARIABLES

Le but de cette partie est l'étude de l'influence de la durée des creux. On a donc appliqué des creux de durées variables et d'une profondeur de 70% à la machine de 3.5 kW sur une même phase du stator, puis du rotor. Tous les creux commencent au début d'une période du courant statorique pour se terminer 5, 10, 15, 20 ou 25 ms plus tard. On pourra ainsi observer l'influence de la « position » de la phase au moment du rétablissement de la tension sur le pic de courant engendré.

En effet, il a été établi dans la partie précédente que les pics de courant les plus importants sont ceux qui se produisent lors de la disparition du creux. C'est pour cela que nous allons étudier l'influence du moment pendant lequel cette disparition se produit.

Ci-dessous, un schéma illustrant les creux de tension appliqués sur la phase considérée suivi des courants et des couples.

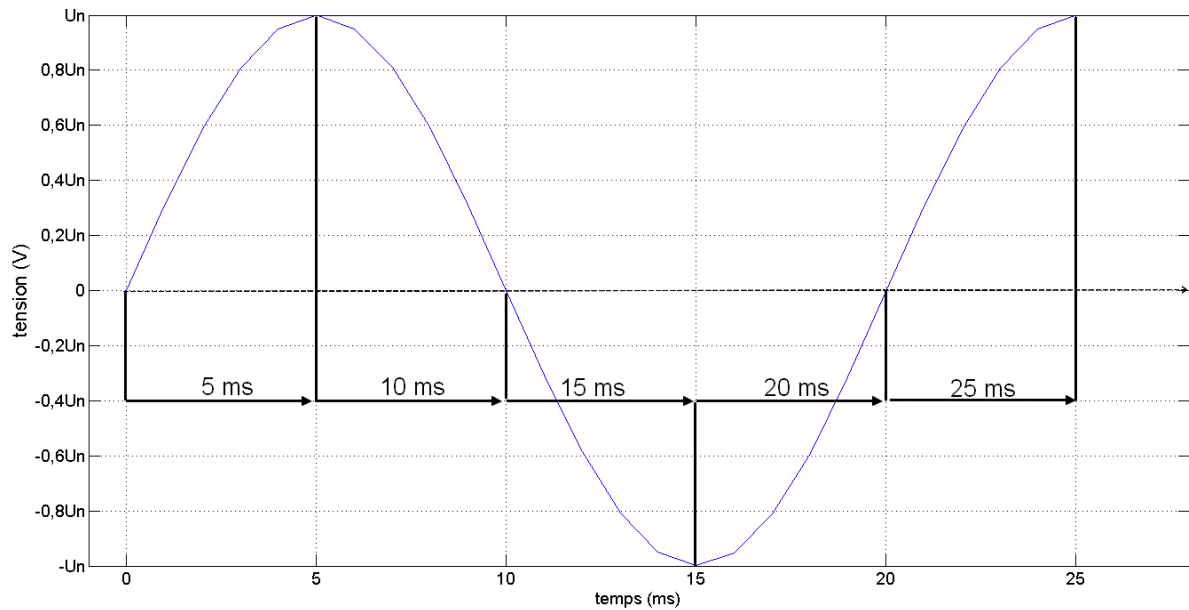


Fig.3.29 Représentation de la phase statorique et intervalles de temps durant lesquels les creux lui sont appliqués

- **Courant statoriques**

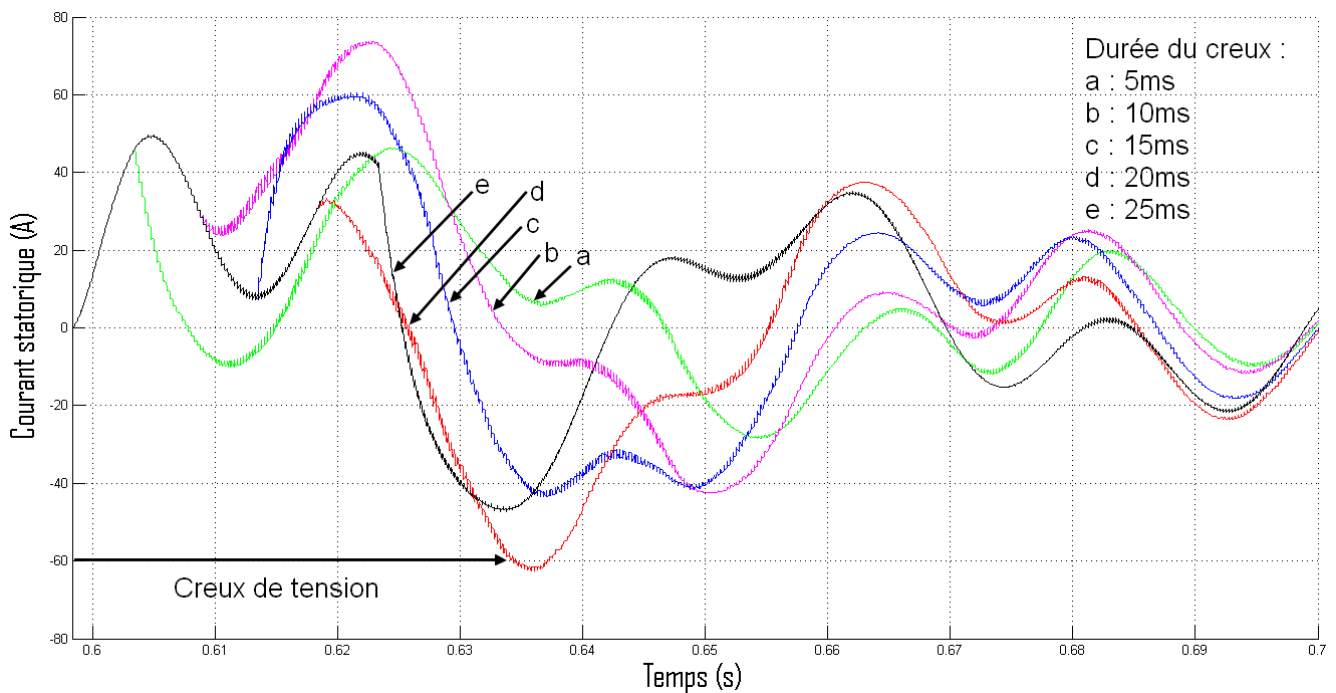


Fig.3.30 Représentation du courant statorique pour des creux d'une profondeur de 70% et des durées variables – machine de 3.5kW

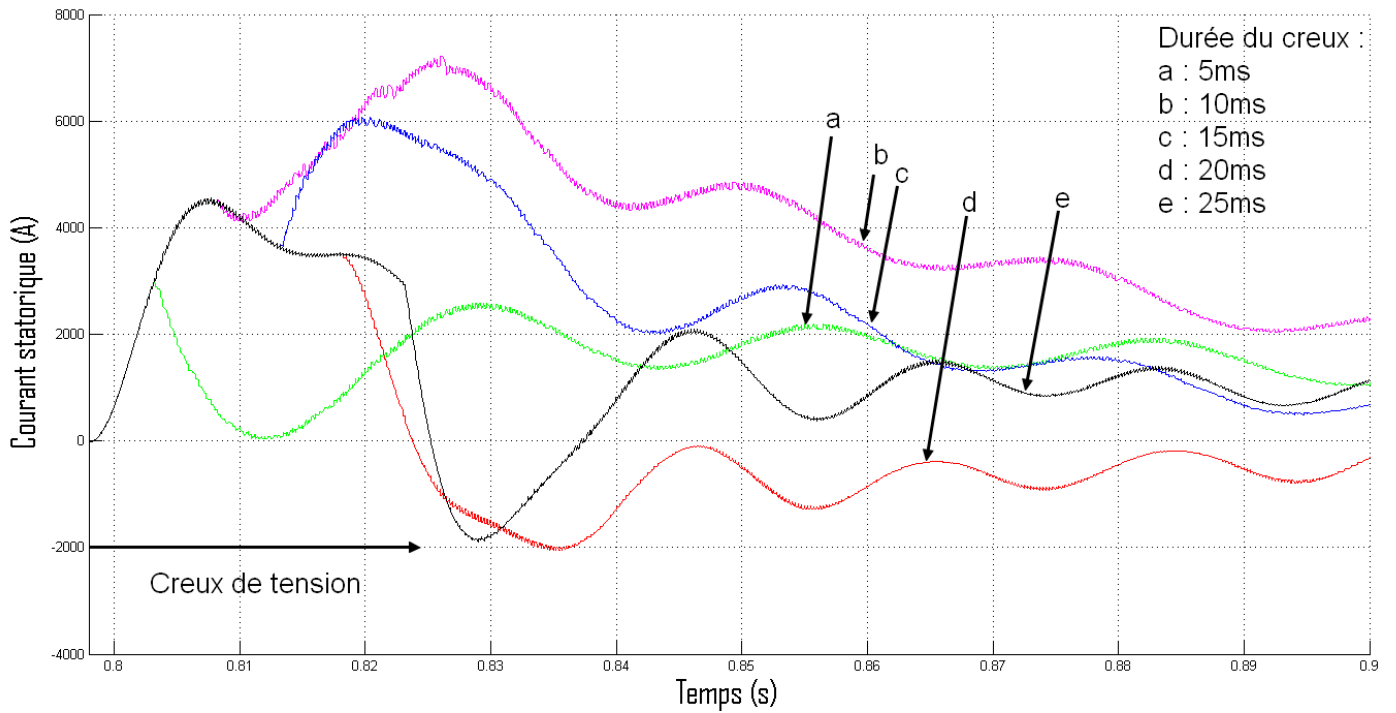


Fig.3.31 Représentation du courant statorique pour des creux d'une profondeur de 70% et des durées variables – machine de 300kW

• **Courants rotoriques**

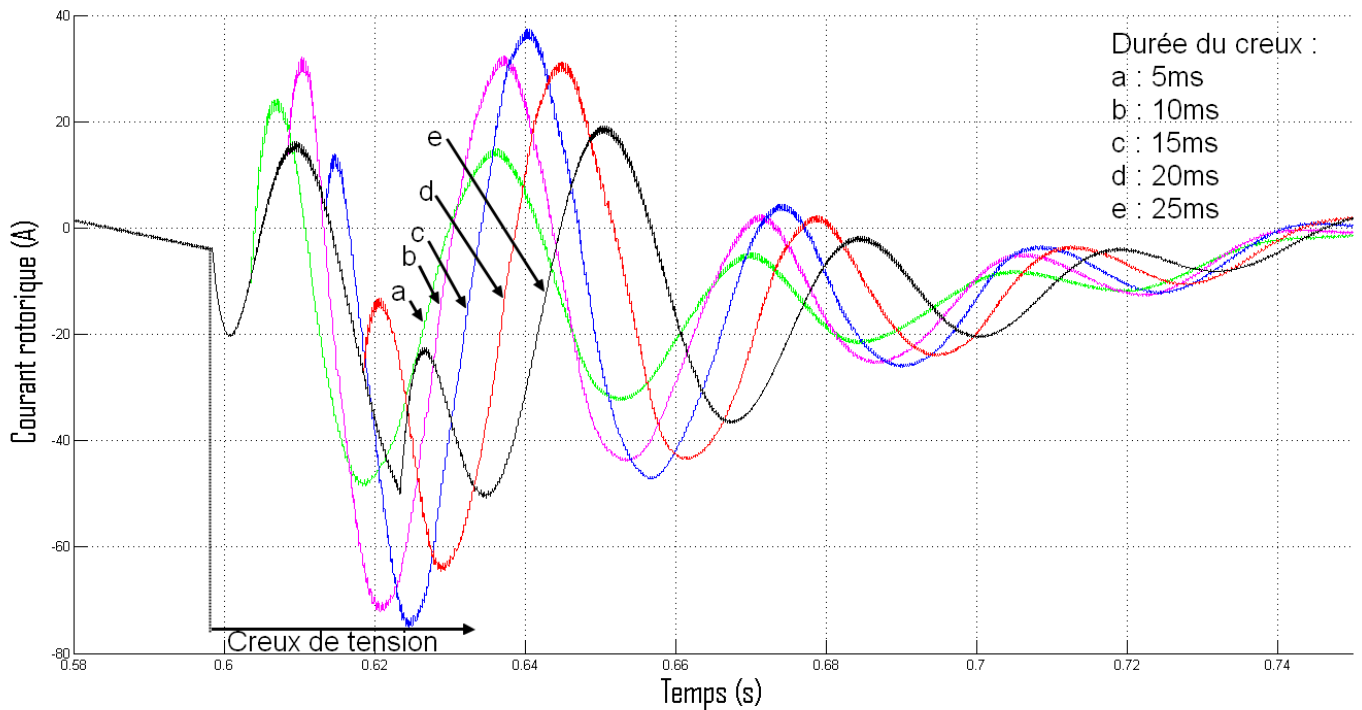


Fig.3.32 Représentation du courant rotorique pour des creux d'une profondeur de 70% et des durées variables – machine de 3.5kW

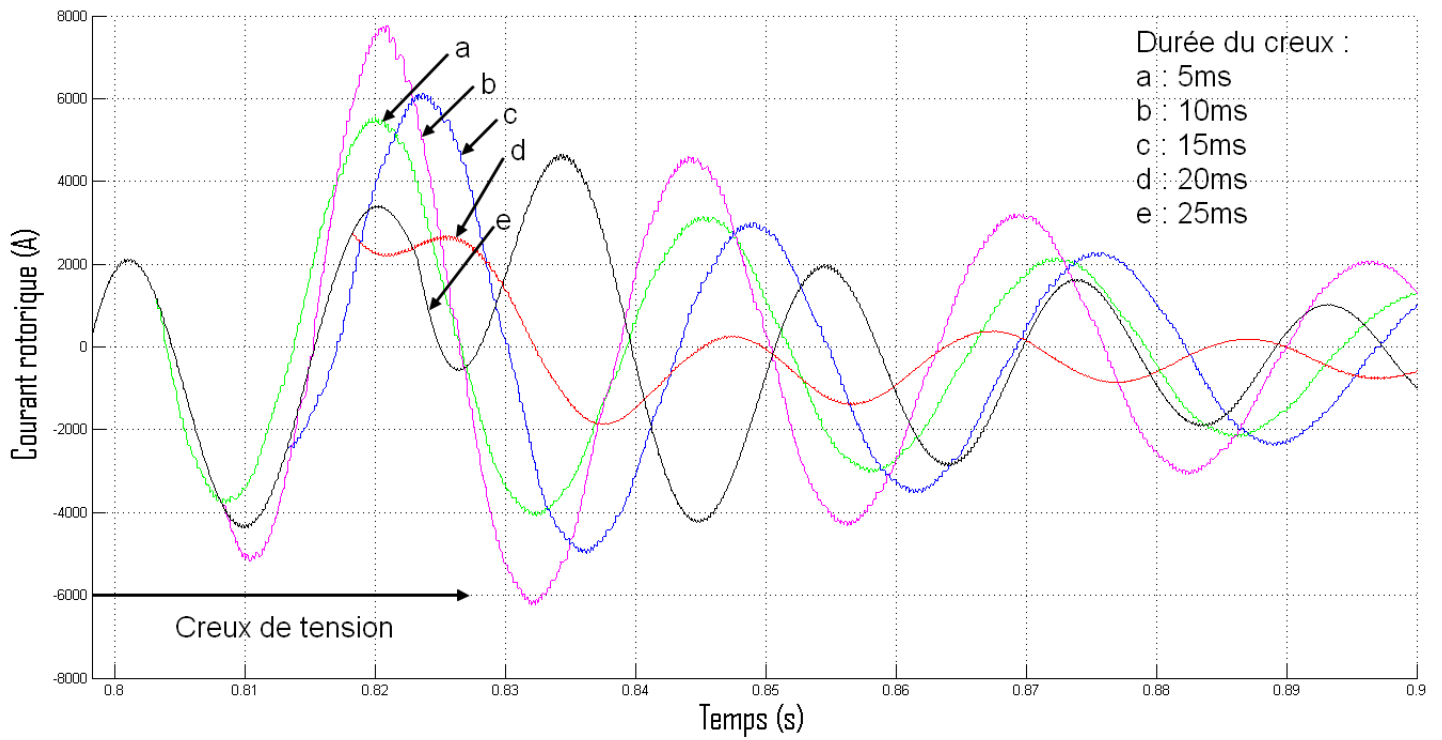


Fig.3.33 Représentation du courant rotorique pour des creux d'une profondeur de 70% et des durées variables – machine de 300kW

• **Couples**

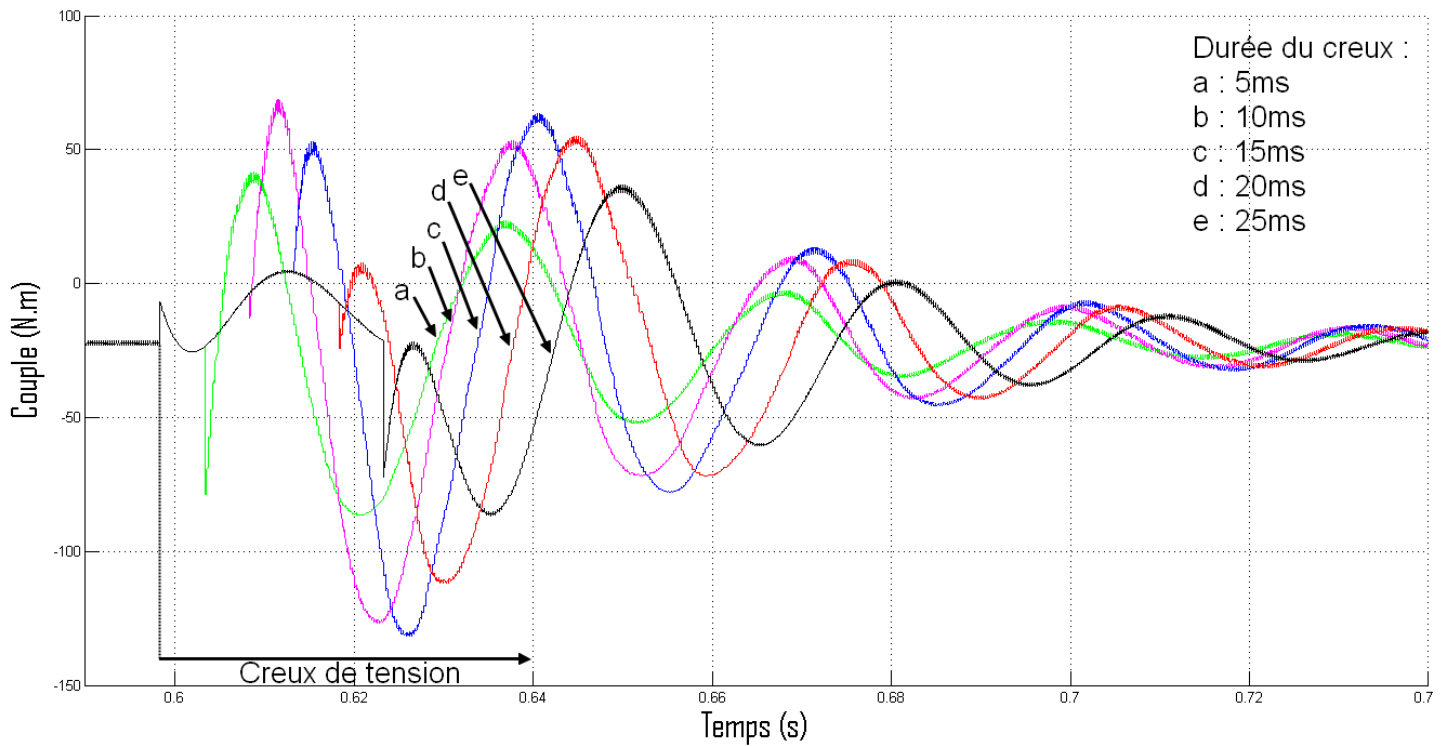


Fig.3.34 Représentation du couple pour des creux d'une profondeur de 70% et des durées variables – machine de 3.5kW

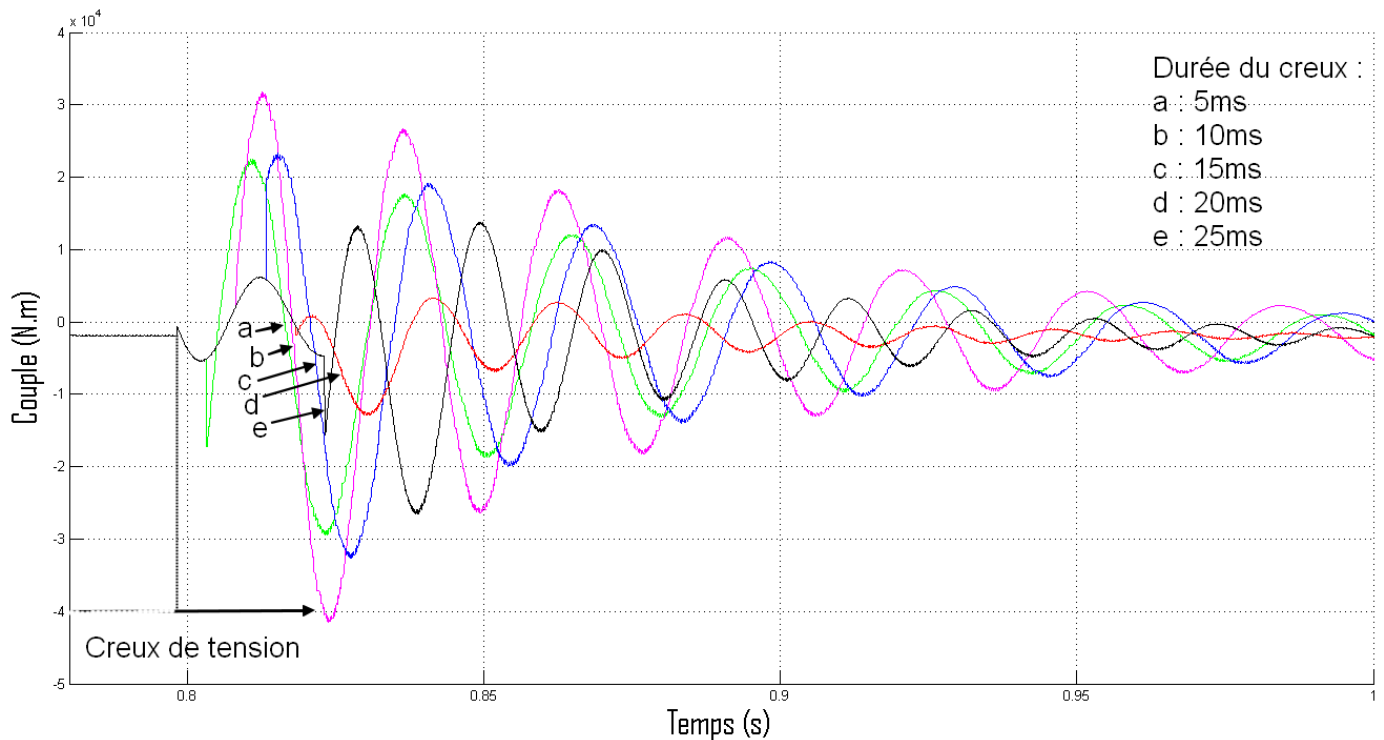


Fig.3.35 Représentation du couple pour des creux d’une profondeur de 70% et des durées variables – machine de 300kW

Observations et interprétations :

- Lorsque le creux de tension apparait, tous les courants et les couple sont confondus. Cela est normal car pendant les premières 5ms, toutes les machines sont soumises à la même tension.
- A $t_1=5ms$ après l’apparition du creux, un premier pic de courant se produit. Il est dû au rétablissement de la tension pour le creux de 5ms.
- Le même phénomène est successivement observé pour tous les creux.
- Les simulations montrent que le moment où la tension revient au nominal influe sur la forme du régime transitoire des courants statoriques et rotoriques.
- Ces simulations, effectuées sur une phase, expliquent pourquoi les pics de courant qui se produisent sur trois phases de la machine au même moment ne sont pas identiques. Le déphasage explique ce phénomène.
-

3.3.4 SYNTHÈSE

Pour une vue généralisée les courbes ci-dessous montrent respectivement les courbes en 3D des maximums des courants statoriques, rotoriques et couples des machines de 3.5kw et 300kw obtenues après simulations de leurs comportements vis-à-vis de creux de tension allant de 0 à 100% et pour des durées d’application allant de 0 à 2T (de 0 à 40 ms).

- Représentation 3D des courants statoriques des deux machines

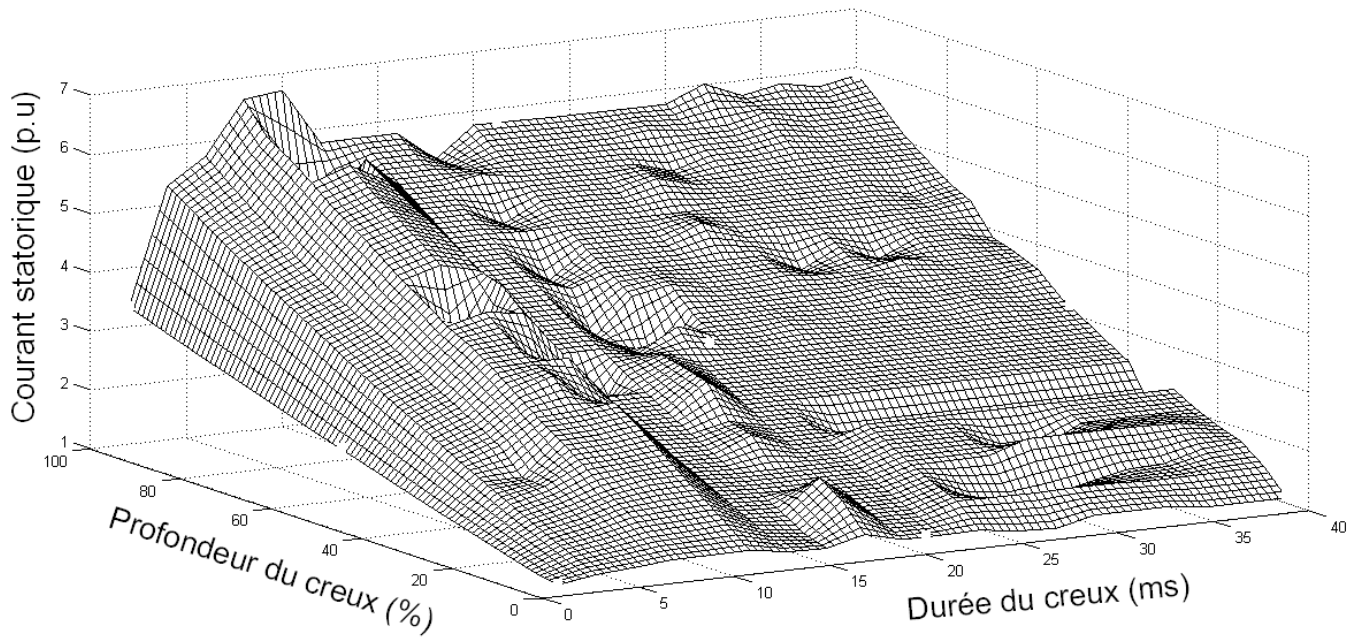


Fig.3.36 Courant statorique de la machine de 3.5kW

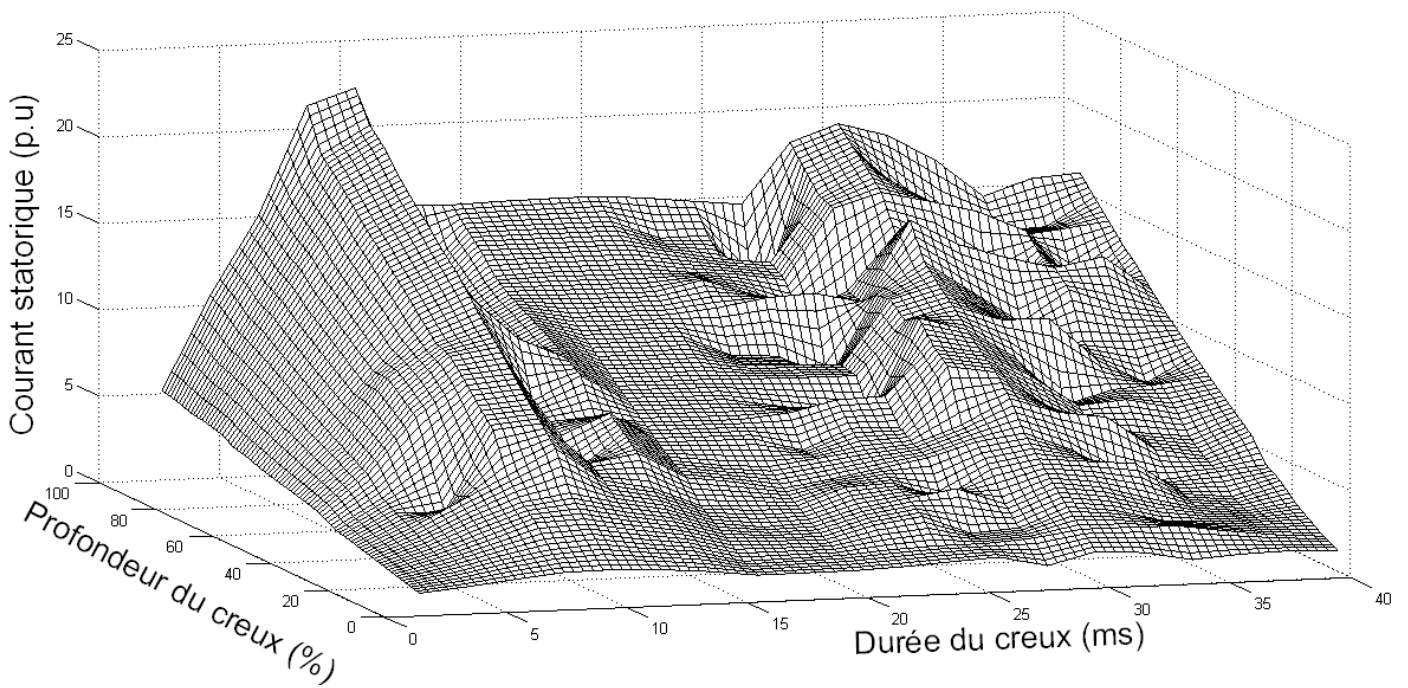


Fig.3.37 Courant statorique de la machine de 300kW

- Représentation 3D des courants rotoriques des deux machines

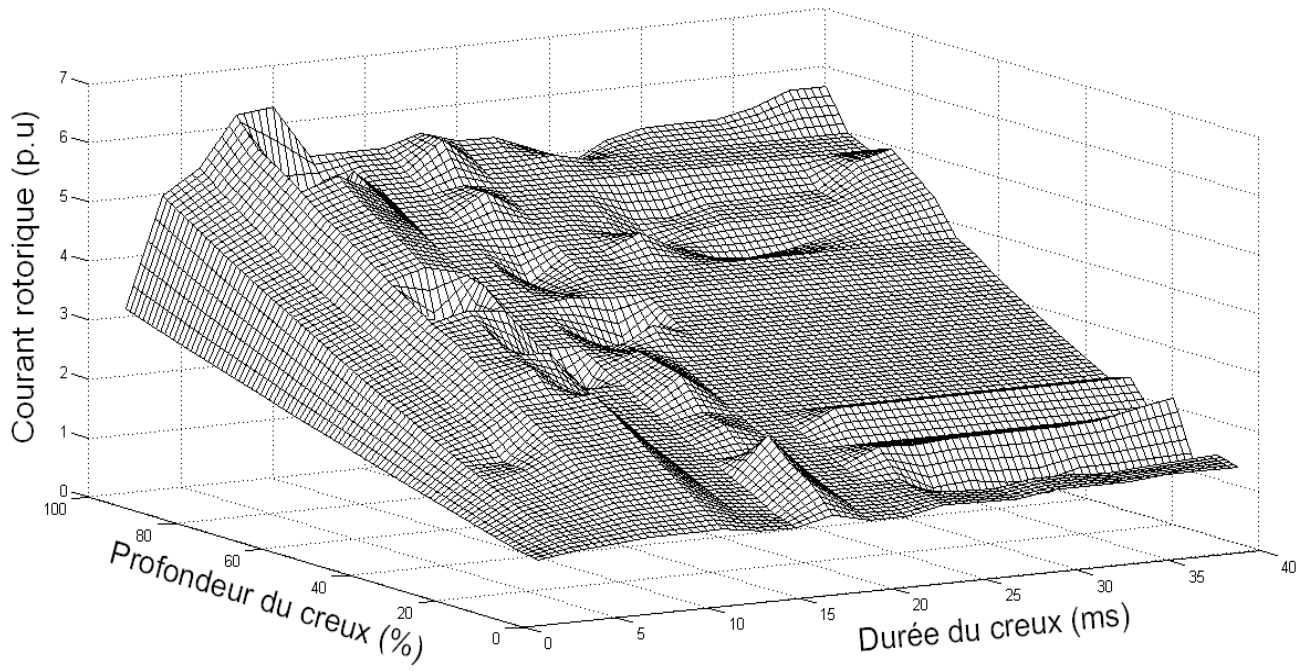


Fig.3.38 Courant rotorique de la machine de 3.5kW

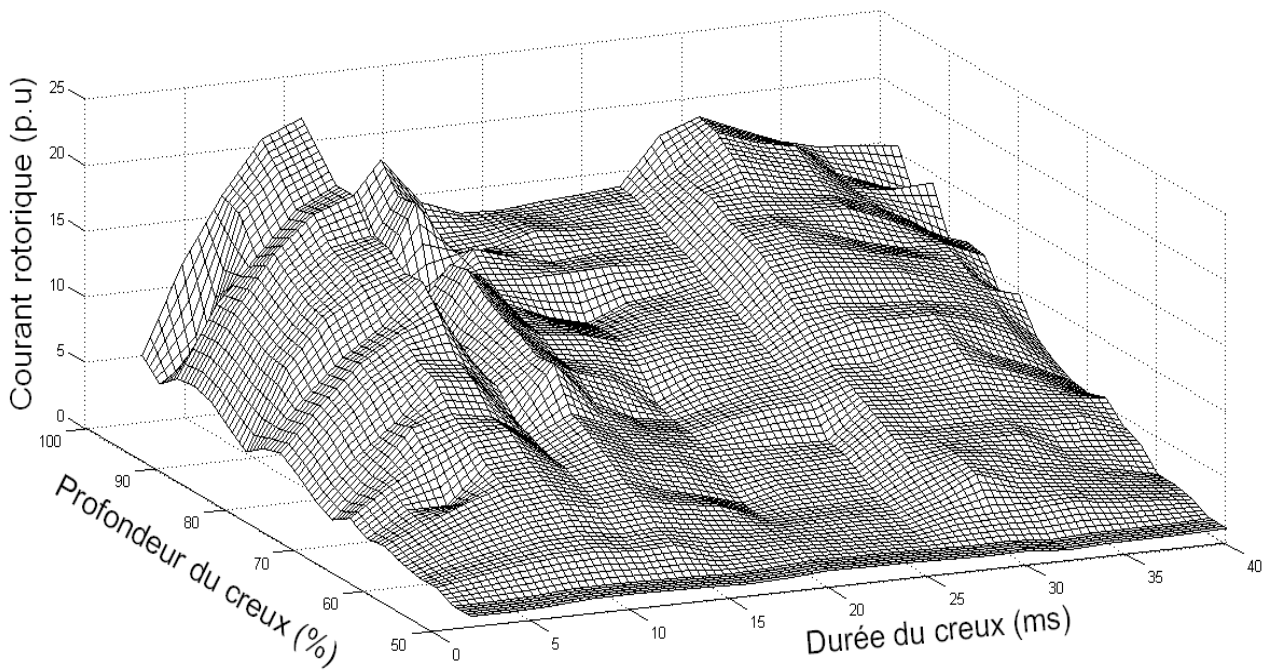


Fig.3.39 Courant rotorique de la machine de 300kW

- **Représentation 3D des couples des deux machines**

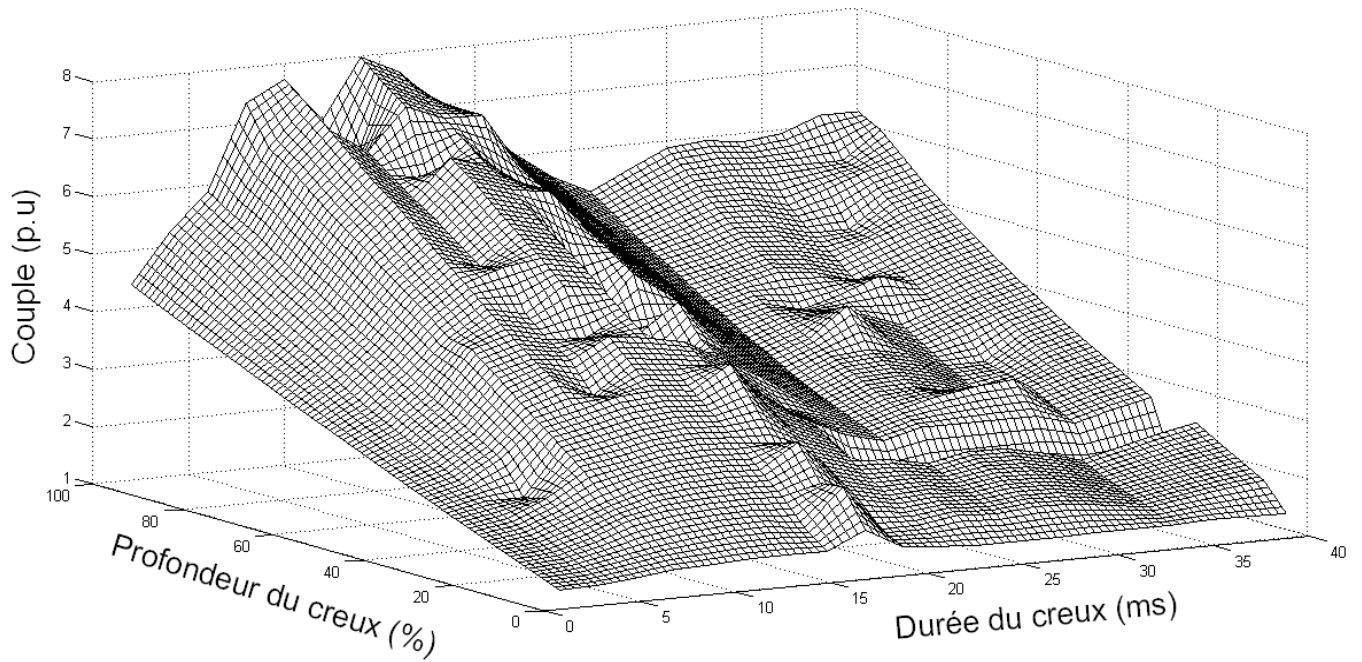


Fig.3.40 Couple de la machine de 3.5kW

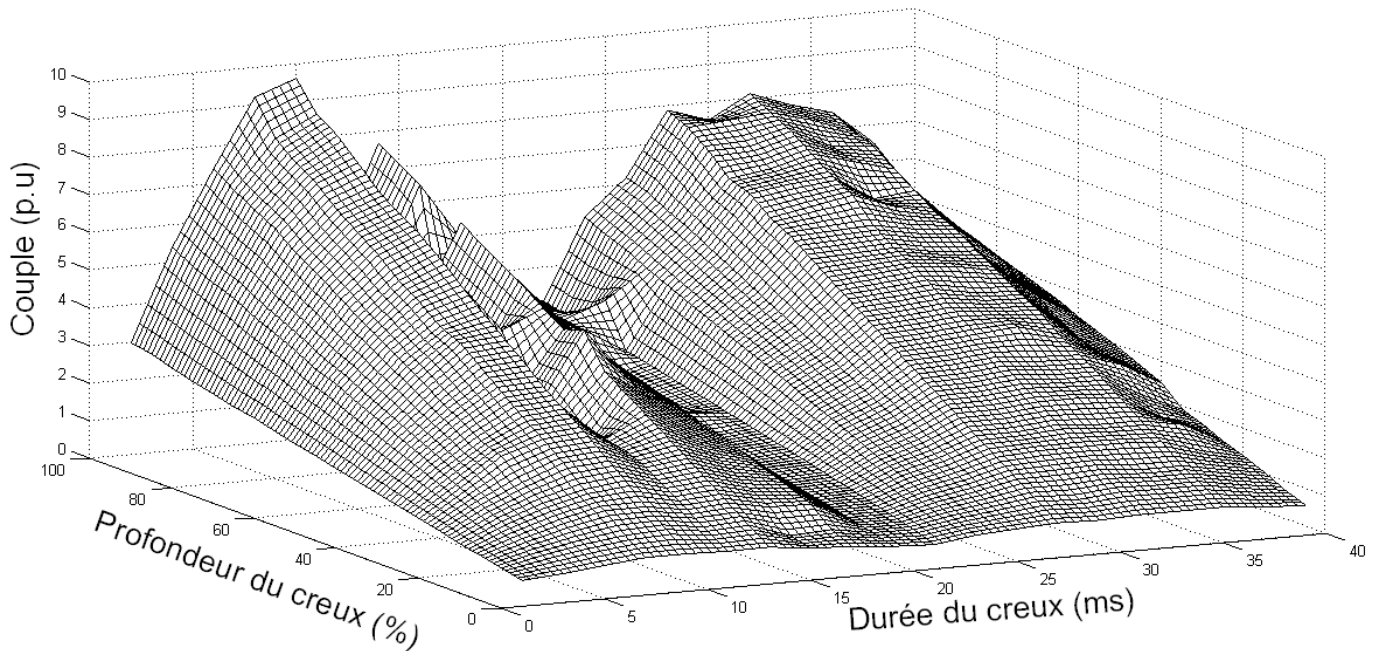


Fig.3.41 Couple de la machine de 300kW

Observations

- Les pics pour toutes les grandeurs étudiées sont plus importants quand le creux est plus profond pour les deux machines. Elles réagissent qualitativement de la même manière aux creux de tension.

- Les courants statoriques atteignent des valeurs très importantes qui peuvent endommager les enroulements : Jusqu'à 7 fois le courant nominal pour la machine de 3.5kW et 25 fois le courant nominal pour la machine de 300kW.
- On n'observe pas de grandes fluctuations sur le rotor de la machine de 3.5kW (environ 6 fois le courant nominal pour les creux les plus profonds), contrairement à la machine de 300kw ou le courant rotorique peut atteindre 21 fois le courant rotorique nominal.
- Le comportement des deux machines est similaire vis-à-vis du couple, on remarque que les variations en amplitude sont plus faibles, ils n'atteignent que 10 fois le couple nominale pour la machine de 300kw et 8 fois le nominal pour la machine de 3.5kw.
- Enfin, quelle que soit la machine, les pics de courant restent trop importants et ne permettent pas de la laisser connectée au réseau lorsqu'un creux de tension survient. Elle engendrerait en effet une détérioration des convertisseurs de la cascade hyposynchrone et elle se détruirait elle-même si jamais ces creux venaient à durer.

Interprétations

Lorsqu'un creux de tension se produit, la baisse de tension est très brusque (durée estimée à 1ms). Le flux statorique est le premier touché par cette avarie, étant directement lié à la tension du réseau. Cependant, le flux étant une variable d'état, il ne peut pas passer brusquement d'une valeur à une autre, il y a donc création d'un autre flux, au rotor, qui va compenser cette baisse jusqu'à ce qu'il y ait stabilisation [27].

Intéressons-nous au creux de tension vu du rotor de la machine.

L'expression générale de la machine nous indique que la tension rotorique varie lorsqu'il y a passage de courant, on a donc l'expression suivante de la tension rotorique qui nous permettra d'établir un schéma équivalent :

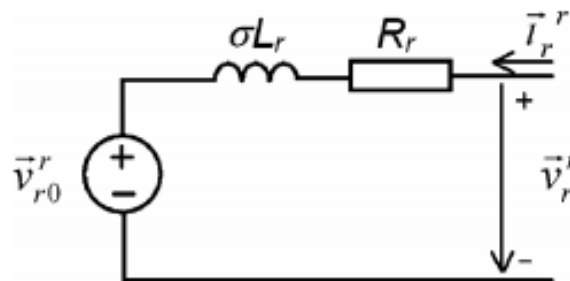


Fig.3.42 Schéma équivalent au rotor de la MADA durant un creux de tension

D'où l'expression :

$$V_r = V_{r0} + (R_r + j * \omega * \sigma * L_r) I_r \quad (3.1)$$

L'apparition d'un creux de tension au stator à $t=t_0$ est perçue par le rotor de la manière suivante :

$$V_s = \begin{cases} V_1 e^{j\omega_s t} & \text{pour } t < t_0 \\ V_2 e^{j\omega_s t} & \text{pour } t > t_0 \end{cases} \quad (3.2)$$

Pour passer du 1^{er} flux, pré-creux au 2^{ème}, post-creux, la machine crée un flux qui s'atténue ensuite. C'est ce flux qui crée les fortes tensions (et donc courants) transitoires de la machine [28].

Les expressions de ces flux sont les suivantes :

$$\Phi = \begin{cases} \frac{V_1}{j\omega_s} e^{j\omega_s t} & \text{pour } t < t_0 \\ \frac{V_2}{j\omega_s} e^{j\omega_s t} & \text{pour } t > t_0 \end{cases} \quad (3.3)$$

Ci-dessous les courbes représentatives du flux pour deux creux de tension auxquels est soumise la machine de 3.5kW.

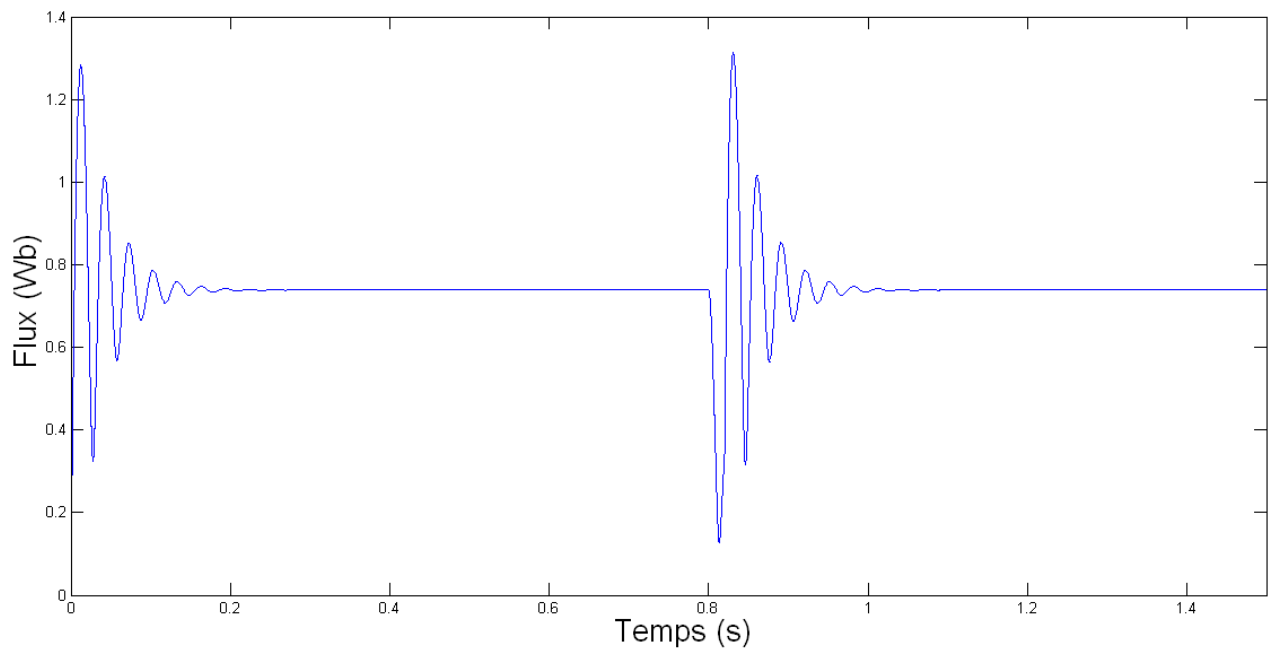


Fig.3.43 Flux de la machine de 3.5kW soumise à un creux de tension d'une profondeur de 80% et d'une durée de 20ms

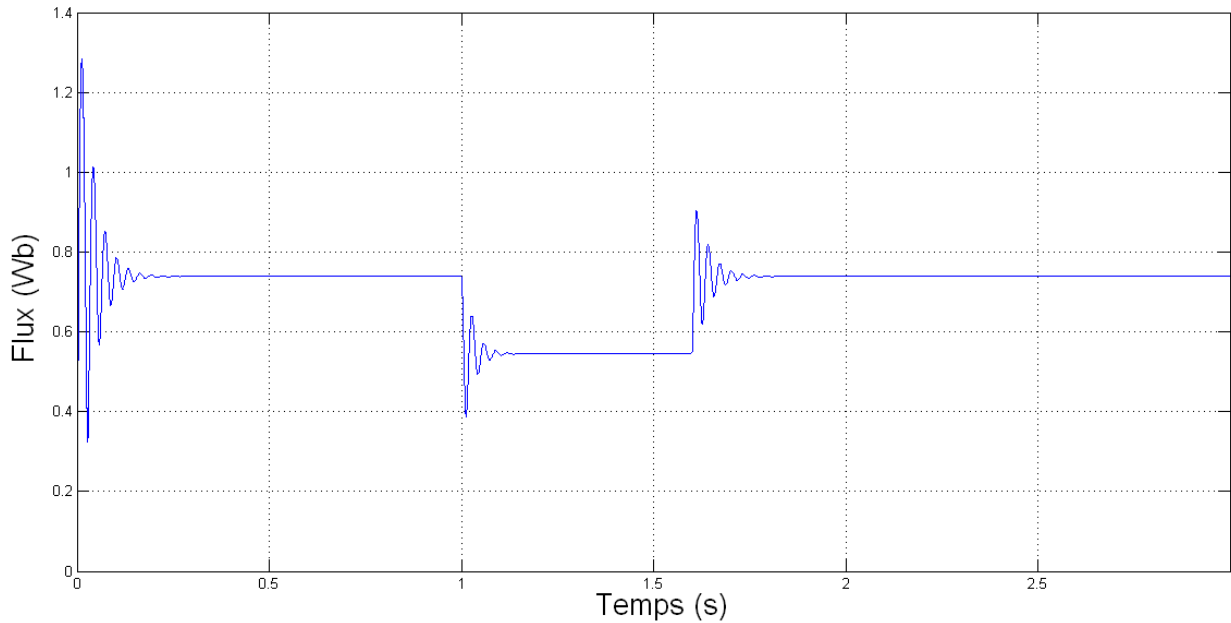


Fig.3.44 Flux de la machine de 3.5kW soumise à un creux de tension d'une profondeur de 30% et d'une durée de 600ms

Ces deux courbes nous montrent une variation très brusque du flux de la machine, le premier pic se déroulant dans un intervalle de temps de l'ordre de la milliseconde.

Les tensions induites dans les enroulements statoriques et rotoriques sont alors très importantes ($e = -d\Phi/dt$) et c'est cela qui provoque les pics de courant et de couple observés dans la machine.

Lorsque les creux sont longs, la commande impose une nouvelle valeur du flux pour maintenir P et Q aux valeurs consignes. Cela se voit clairement dans la **Fig.3.44** qui représente le flux pour un creux long. Un autre point de fonctionnement est donc trouvé. Cet aspect sera examiné plus en détail dans ce qui suit.

3.4 SIMULATIONS POUR DES CREUX DE LONGUE DUREE

Dans le but de déterminer les points limites de stabilité pendant les creux, nous avons soumis les machines à des creux de tension de longues durées et d'intensité en amplitude variable. Les creux simulés sont ceux définis par les normes comme étant la limite que les machines doivent supporter.

3.4.1 SIMULATIONS POUR UN CREUX DE 30% ET UNE DUREE DE 2.5S

- **Courants statoriques**

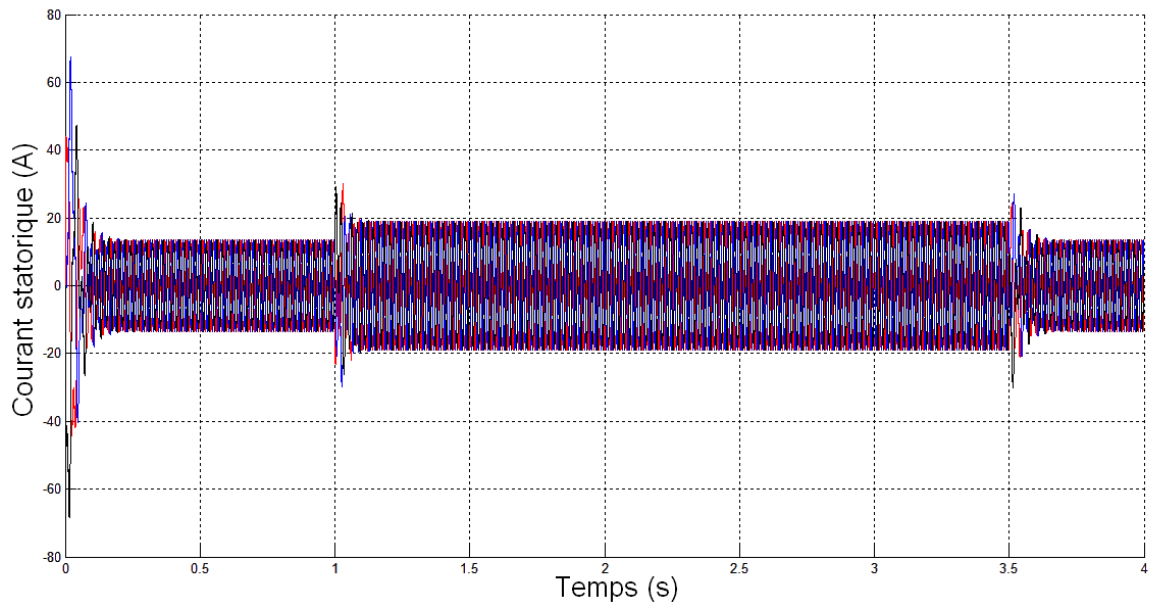


Fig.3.45 Courant statorique de la machine de 3.5kW pour un creux de tension de 30% et une durée de 2.5 s

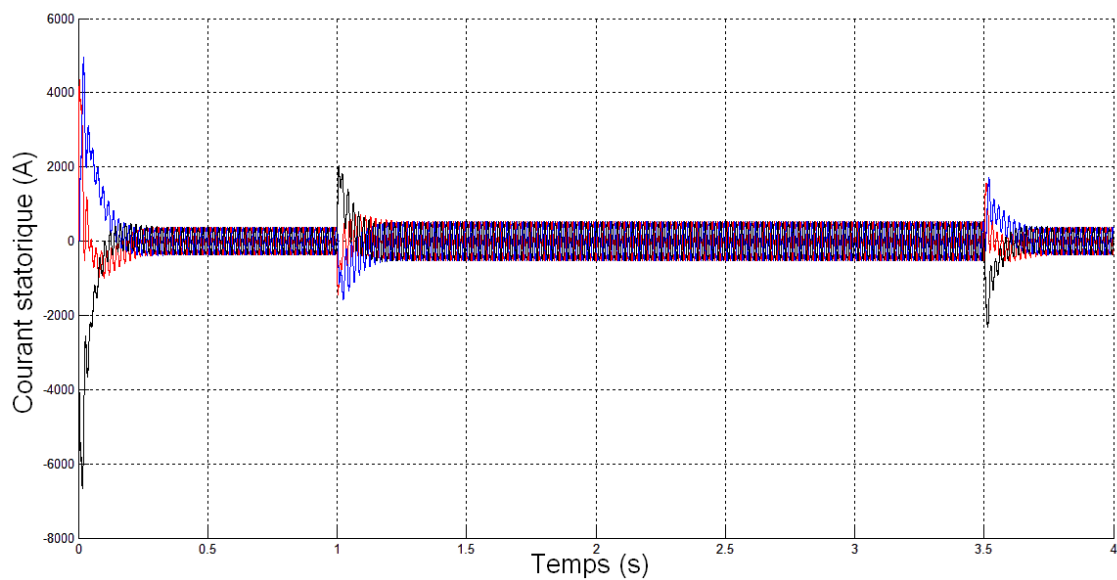


Fig.3.46 Courant statorique de la machine de 300kW pour un creux de tension de 30% et une durée de 2.5 s

- **Courants rotoriques**

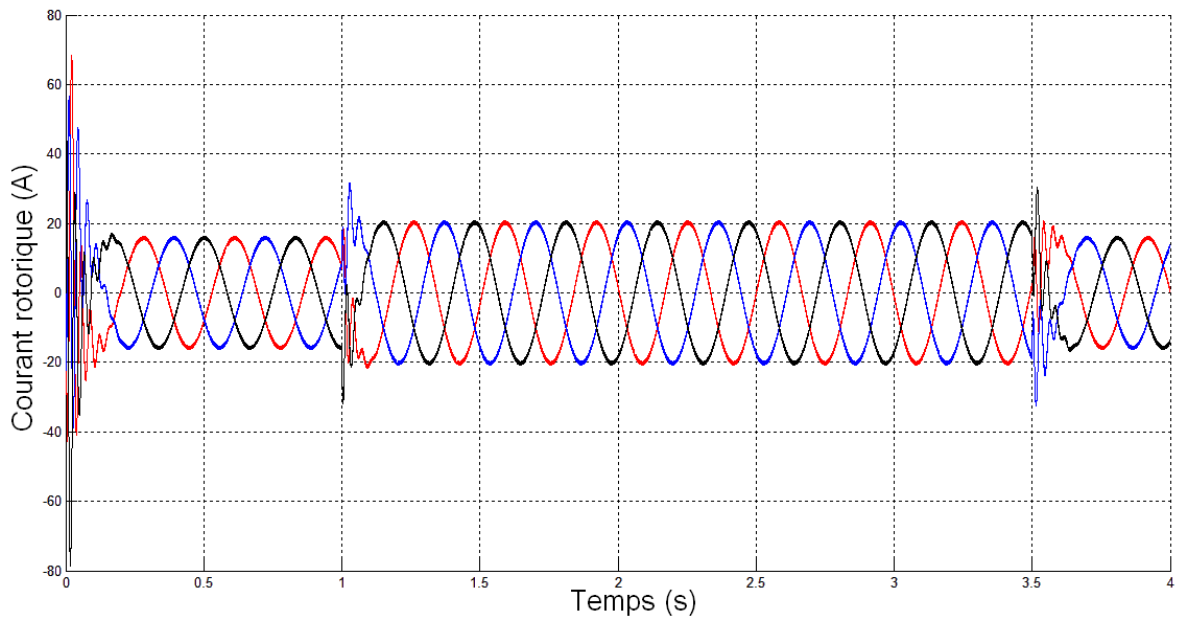


Fig.3.47 Courant rotorique de la machine de 3.5kW pour un creux de tension de 30% et une durée de 2.5 s

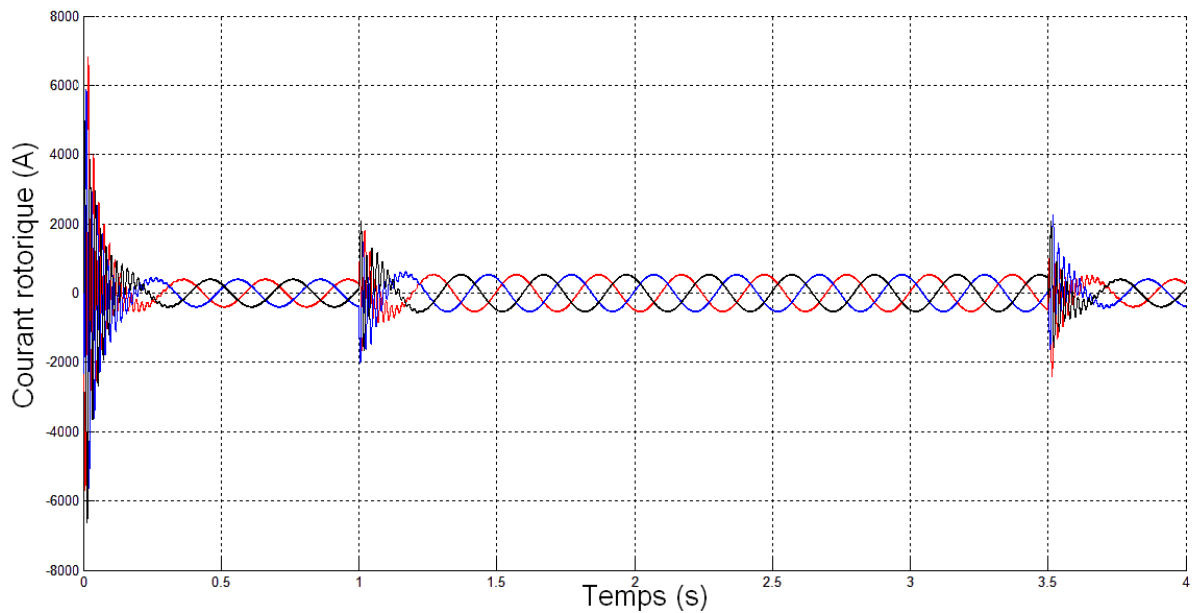


Fig.3.48 Courant rotorique de la machine de 300kW pour un creux de tension de 30% et une durée de 2.5 s

- **Puissances**

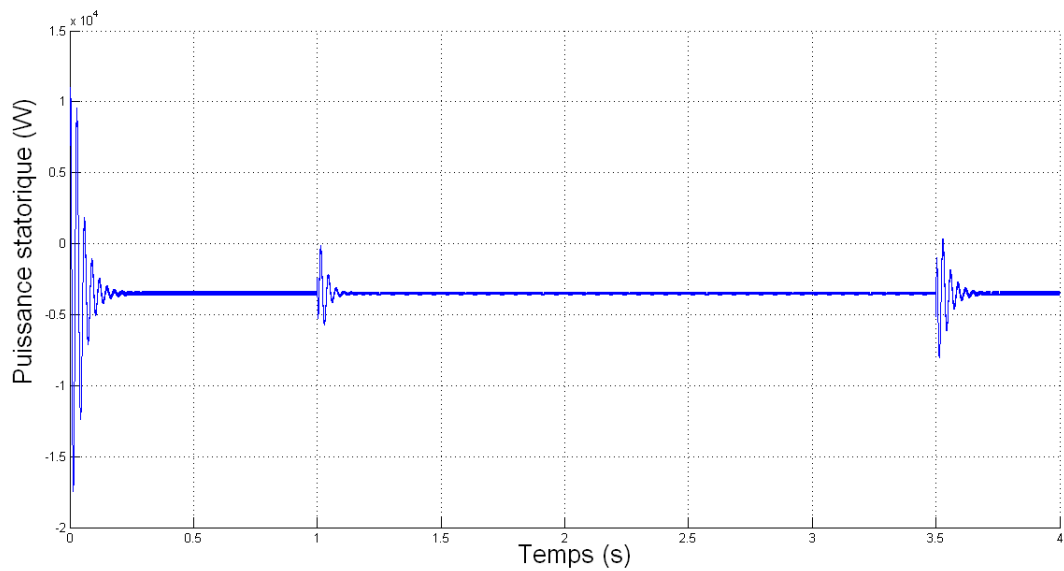


Fig.3.49 Puissance de la machine de 3.5kW pour un creux de tension de 30% et une durée de 2.5 s

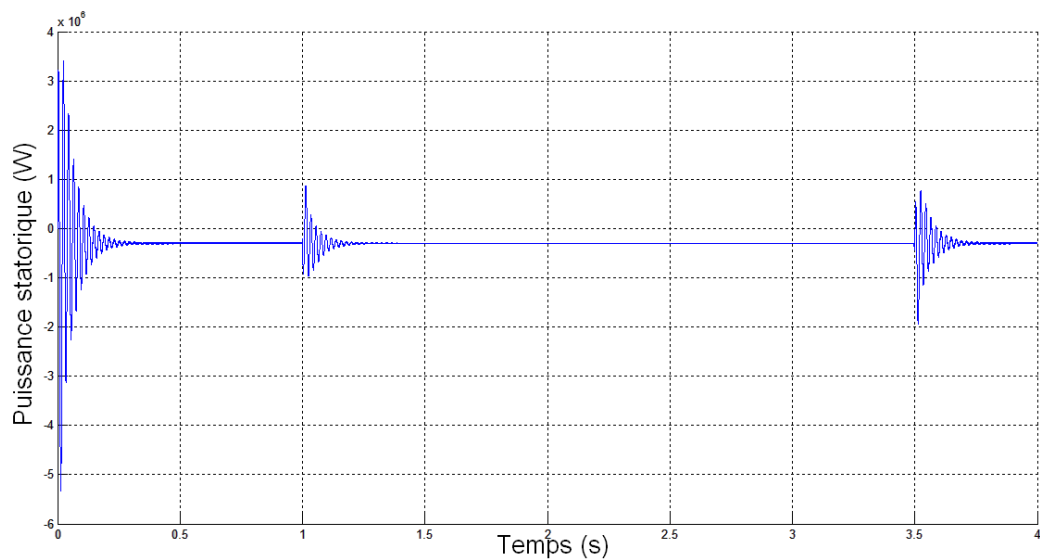


Fig.3.50 Puissance de la machine de 300kW pour un creux de tension de 30% et une durée de 2.5 s

Observations et interprétations

- Installation d'un régime permanent pendant toute la durée du creux.
- On observe deux régimes transitoire : lors de l'établissement et lors de la disparition du défaut.
- Le courant lors du « régime permanent de défaut » est plus important que le courant nominal pour que la machine puisse respecter la consigne de la commande en puissance.

3.4.2 SIMULATIONS POUR UN CREUX DE 70% ET UNE DUREE DE 600ms

- **Courants statoriques**

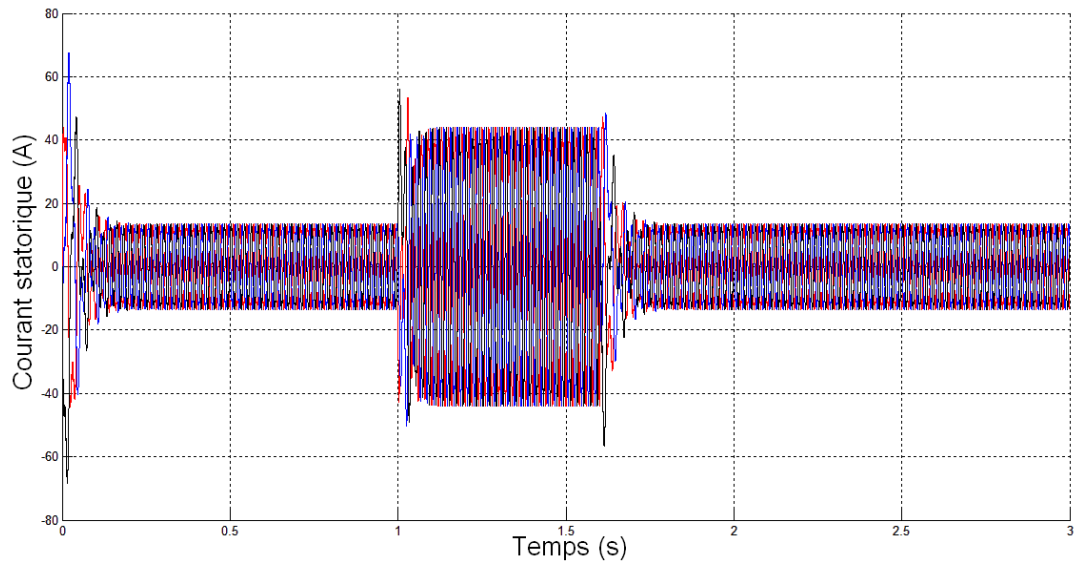


Fig.3.51 Courant statorique de la machine de 3.5kW pour un creux de tension de 70% et une durée de 600 ms

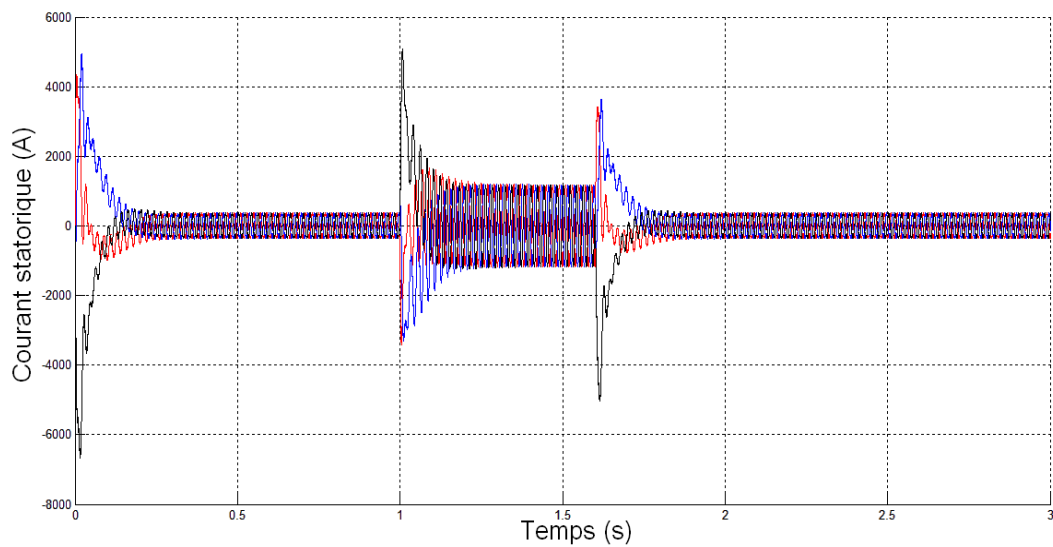


Fig.3.52 Courant statorique de la machine de 300kW pour un creux de tension de 70% et une durée de 600 ms

- **Courants rotoriques**

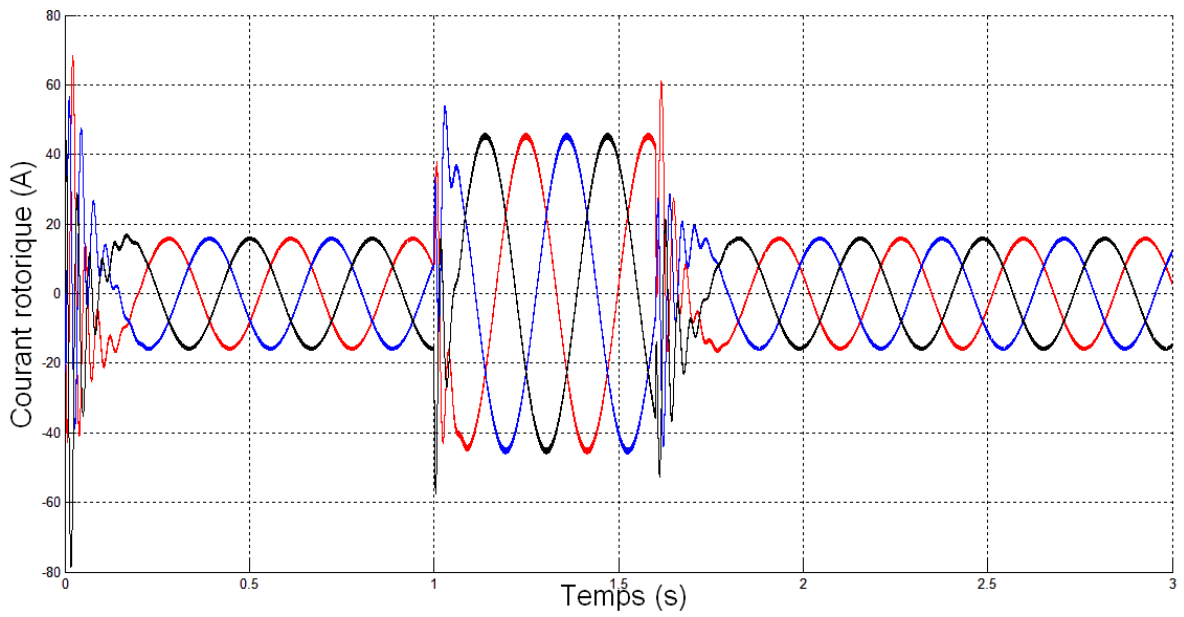


Fig.3.53 Courant rotorique de la machine de 3.5kW pour un creux de tension de 70% et une durée de 600 ms

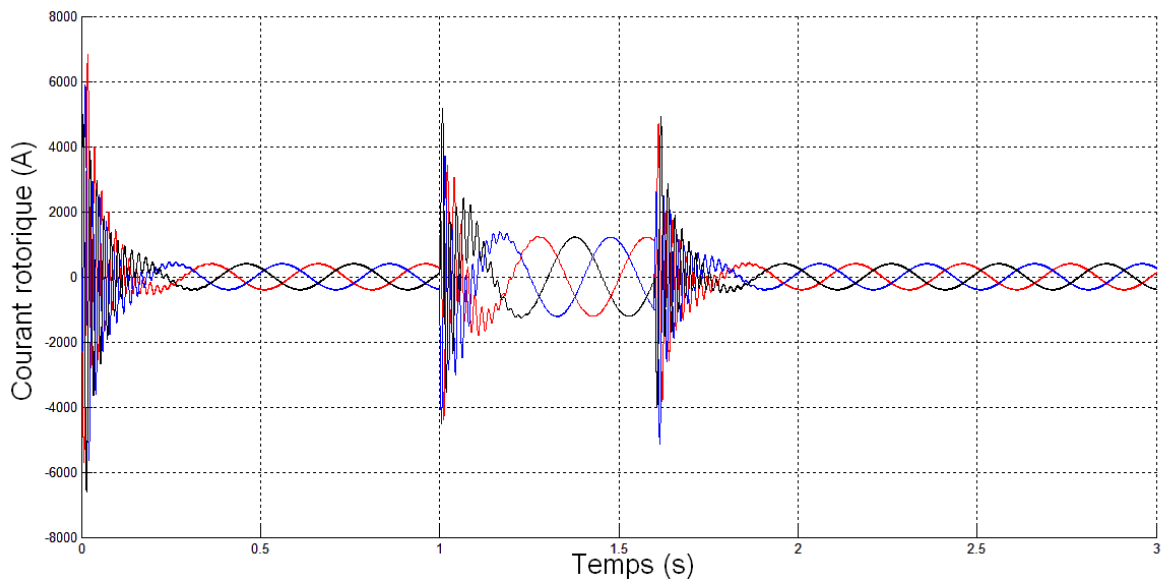


Fig.3.54 Courant rotorique de la machine de 300kW pour un creux de tension de 70% et une durée de 600 ms

- Puissances

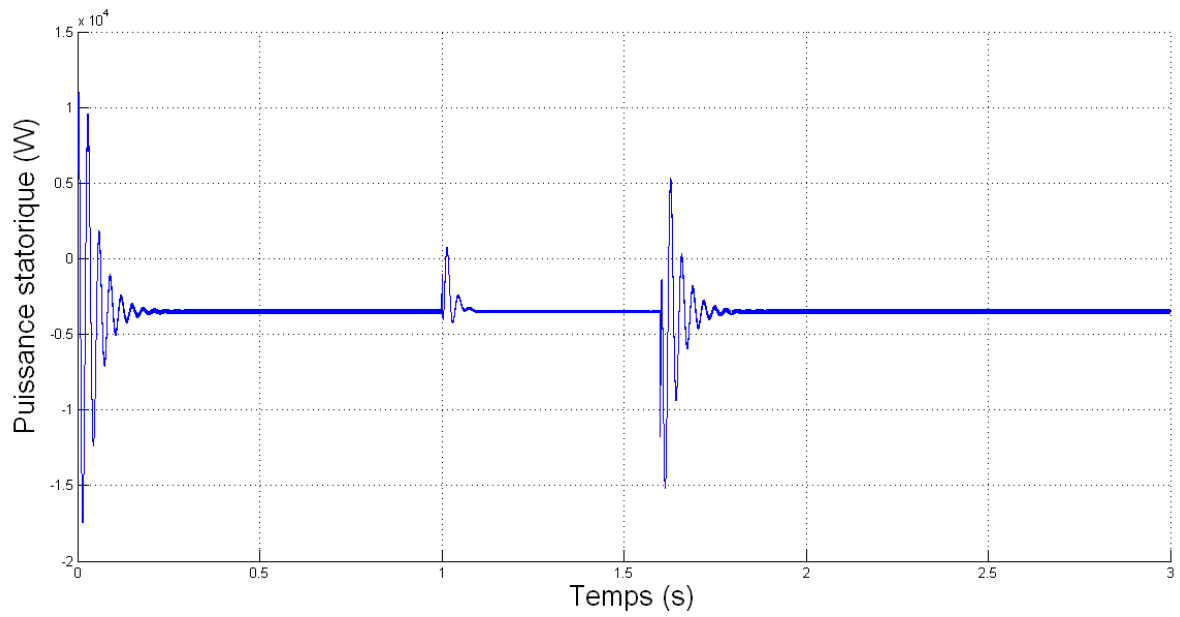


Fig.3.55 Puissance de la machine de 3.5kW pour un creux de tension de 70% et une durée de 600 ms

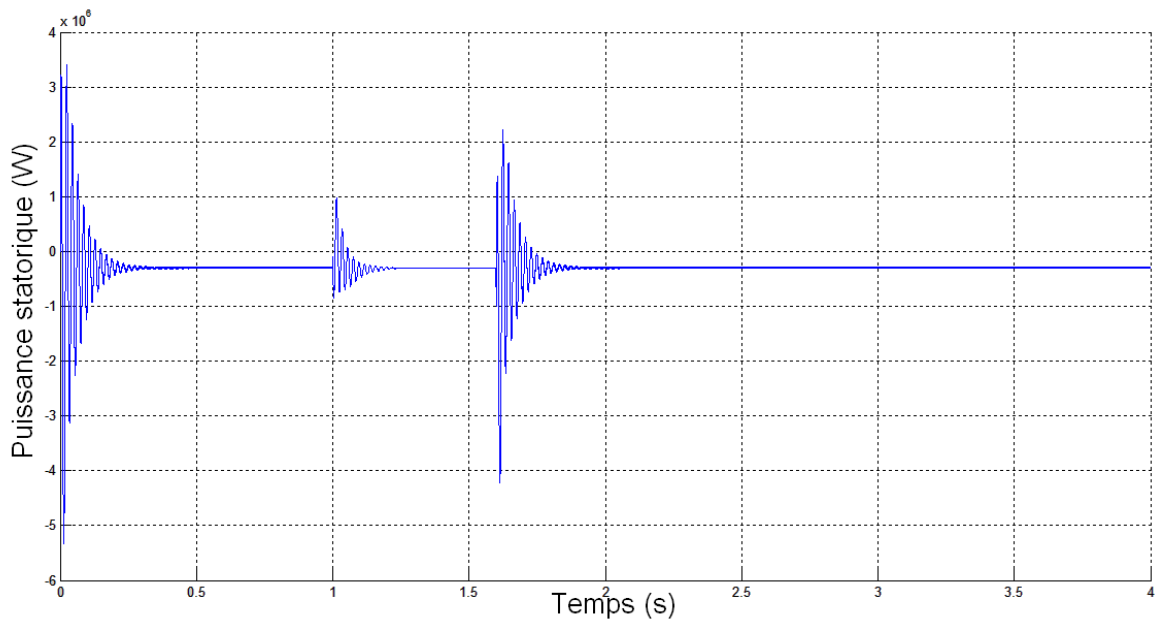


Fig.3.56 Puissance de la machine de 300kW pour un creux de tension de 70% et une durée de 600 ms

Observations et interprétations

- Les phénomènes observés sont les mêmes que ceux de l'essai précédent à une différence près : Les pics de courant sont ici beaucoup plus importants. Cela est dû à la profondeur du creux comme nous l'avons mis en évidence plus haut.

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons soumis les deux machines asynchrones à double alimentation à différents types de creux de tension pour comprendre leur effet.

Il apparait clairement que plus les creux sont profonds, plus les pics de courant engendrés ont une amplitude importante. Les courants transitoires dépendent aussi du moment d'apparition du creux et de rétablissement de la tension sur la phase. Nous avons aussi mis en évidence les régimes permanents lorsque la machine subit des creux de longue durée.

L'étude ayant porté sur deux machines de puissances différentes (3.5kW et 300kW) ; celle-ci a montré qu'elles réagissent qualitativement de la même manière, même si les pics de courant sont beaucoup plus importants pour la machine à forte puissance.

CHAPITRE 4 : EFFET DES CREUX DE
TENSION SUR LA MADA EN REGIME
SATURE

INTRODUCTION

L'étude de la MADA modélisée en régime linéaire pendant les creux de tension nous a donné une bonne vision des phénomènes qui s'y produisent. Cependant, la génératrice asynchrone fonctionnant en général en régime saturée, il apparaît nécessaire de simuler ces mêmes phénomènes sur un modèle saturé de la machine pour compléter nos résultats. Cela se traduira par la prise en compte de la variation de la valeur de l'inductance magnétisante.

Dans ce qui suit, nous nous concentrons sur l'observation de l'influence de la profondeur des creux de tension en régime saturé avant de comparer les résultats obtenus à ceux du modèle linéaire pour évaluer l'impact de la saturation.

Nous allons considérer la machine de 3.5kW dont le modèle saturé sera présenté.

4.1 MODELISATION DE LA MADA EN REGIME SATURE

4.1.1 CONCEPT

La saturation est un phénomène complexe qui a pour effet un accroissement non linéaire de l'induction magnétique lorsque le courant augmente. Cette saturation ne nous permet plus de considérer la valeur de l'inductance magnétisante comme étant constante. On doit donc adapter le modèle pour trouver les nouvelles valeurs de cette inductance afin de mieux refléter les phénomènes qui se produisent dans la machine. [29]

La littérature fait généralement état de trois méthodes qui permettent de prendre en compte la saturation. Ces méthodes sont :

- La modélisation par éléments finis de la machine. Cette méthode permet l'obtention de résultats très précis mais demande des temps de calcul très longs.
- Le réseau de perméances qui permet de découper la machine en un grand nombre d'éléments homogènes d'un point de vue magnétique et de leur associer leurs perméances respectives. Elle présente des temps de calcul corrects mais la représentation de l'entrefer par cette méthode est complexe.
- La prise en compte de la variation de l'inductance magnétisante en utilisant la courbe associant les valeurs de l'inductance au courant.

Cette dernière méthode est celle qui a été utilisée pour l'élaboration du modèle de simulation. Nous allons présenter les équations qui régissent la machine en régime saturé.

4.1.2 EXPRESSION DES FLUX

Les flux dans la machine ont deux composantes : le flux de fuite et le flux de magnétisation. Ils s'expriment au stator et au rotor par les expressions suivantes :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = \Phi_{\sigma ds} + \Phi_{dm} = L_{\sigma s} * I_{ds} + \Phi_{dm} \\ \Phi_{qs} = \Phi_{\sigma qs} + \Phi_{qm} = L_{\sigma s} * I_{qs} + \Phi_{qm} \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = \Phi_{\sigma dr} + \Phi_{dm} = L_{\sigma r} * I_{dr} + \Phi_{dm} \\ \Phi_{qr} = \Phi_{\sigma qr} + \Phi_{qm} = L_{\sigma r} * I_{qr} + \Phi_{qm} \end{cases} \quad (4.2)$$

Les tensions de la machine s'écrivent donc :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s * I_{ds} + L_{\sigma s} \frac{dI_{ds}}{dt} + \frac{d\Phi_{dm}}{dt} \\ V_{qs} = R_s * I_{qs} + L_{\sigma s} \frac{dI_{qs}}{dt} + \frac{d\Phi_{qm}}{dt} \end{cases} \quad (4.3)$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r * I_{dr} + L_{\sigma r} \frac{dI_{dr}}{dt} + \frac{d\Phi_{dm}}{dt} + \omega r * \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r * I_{qr} + L_{\sigma r} \frac{dI_{qr}}{dt} + \frac{d\Phi_{qm}}{dt} - \omega r * \Phi_{dr} \end{cases} \quad (4.4)$$

Afin de pouvoir modéliser notre machine en prenant en compte la saturation, il faut trouver les expressions des flux dans ce cas.

4.1.2.1 REPRESENTATION DU FLUX

Ci-dessous une représentation du flux et du courant magnétisants. Nous allons nous appuyer sur cette représentation pour exprimer le flux magnétisant dans le repère dq .

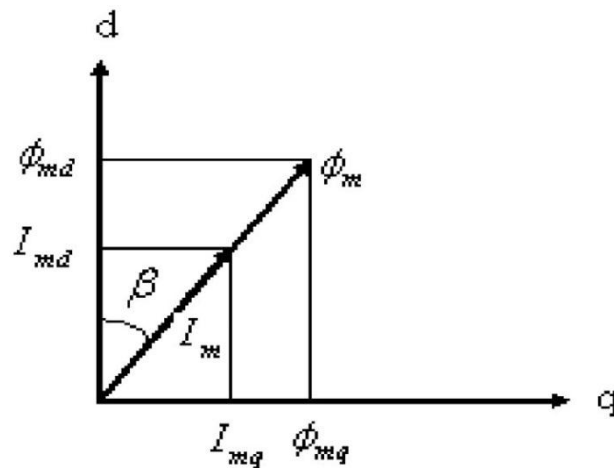


Fig.4.1 Représentation du flux et du courant magnétisants suivant les axes d et q

C'est ainsi que nous exprimons $d\Phi_{dm}/dt$:

$$\frac{d\Phi_{dm}}{dt} = \frac{d(\Phi_m * \cos(\beta))}{dt} = \frac{d\Phi_m}{dt} \cos(\beta) - \frac{d\beta}{dt} \Phi_m * \sin(\beta) \quad (4.5)$$

Sachant que :

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi_m}{dt} \cos(\beta) &= \frac{d\Phi_m}{dI_m} \frac{dI_m}{dt} \cos(\beta) = \frac{d\Phi_m}{dI_m} \cos(\beta) * \frac{d}{dt} \left(\frac{I_{dm}}{\cos(\beta)} \right) \\ \frac{d\Phi_m}{dI_m} \cos(\beta) &= \frac{d\Phi_m}{dI_m} \left[\frac{dI_m}{dt} + I_{dm} * tg(\beta) \frac{d\beta}{dt} \right] \end{aligned} \quad (4.6)$$

Et que :

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{d}{dt} \left[\arctan \left(\frac{I_{qm}}{I_{dm}} \right) \right] = \frac{\cos(\beta)}{I_m} \left[\frac{dI_{qm}}{dt} - tg(\beta) \frac{dI_{dm}}{dt} \right] \quad (4.7)$$

On obtient l'expression finale de $d\Phi_{dm}/dt$, et, par un raisonnement analogue, celle de $d\Phi_{qm}/dt$:

$$\begin{cases} \frac{d\Phi_{dm}}{dt} = \left[\frac{d\Phi_m}{dI_m} + \sin(\beta)^2 \left(\frac{\Phi_m}{I_m} - \frac{d\Phi_m}{dI_m} \right) \right] \frac{dI_{md}}{dt} + \left[\left(\frac{\Phi_m}{I_m} - \frac{d\Phi_m}{dI_m} \right) \sin(\beta) \cos(\beta) \right] \frac{dI_{mq}}{dt} \\ \frac{d\Phi_{qm}}{dt} = \left[\frac{d\Phi_m}{dI_m} + \cos(\beta)^2 \left(\frac{\Phi_m}{I_m} - \frac{d\Phi_m}{dI_m} \right) \right] \frac{dI_{mq}}{dt} + \left[\left(\frac{\Phi_m}{I_m} - \frac{d\Phi_m}{dI_m} \right) \sin(\beta) \cos(\beta) \right] \frac{dI_{md}}{dt} \end{cases} \quad (4.8)$$

Ces expressions font apparaitre deux termes importants qui permettent de prendre en compte la saturation dans le modèle de la machine :

- L'inductance mutuelle statique $M_{st} = \frac{\Phi_m}{I_m}$
- L'inductance mutuelle dynamique $M_{dy} = \frac{d\Phi_m}{dI_m}$

On explique dans ce qui suit la manière d'obtenir ces deux inductances pour la machine considérée.

4.1.2.2 INDUCTANCES SATURABLES

La courbe caractéristique de magnétisation d'une machine asynchrone est relevée lors d'un essai à vide. Elle nous permet de calculer les inductances saturées de la machine pour chaque point de fonctionnement. [28]

On utilise des tangentes à la courbe de magnétisation pour faire le calcul. Elles sont illustrées dans le schéma qui suit :

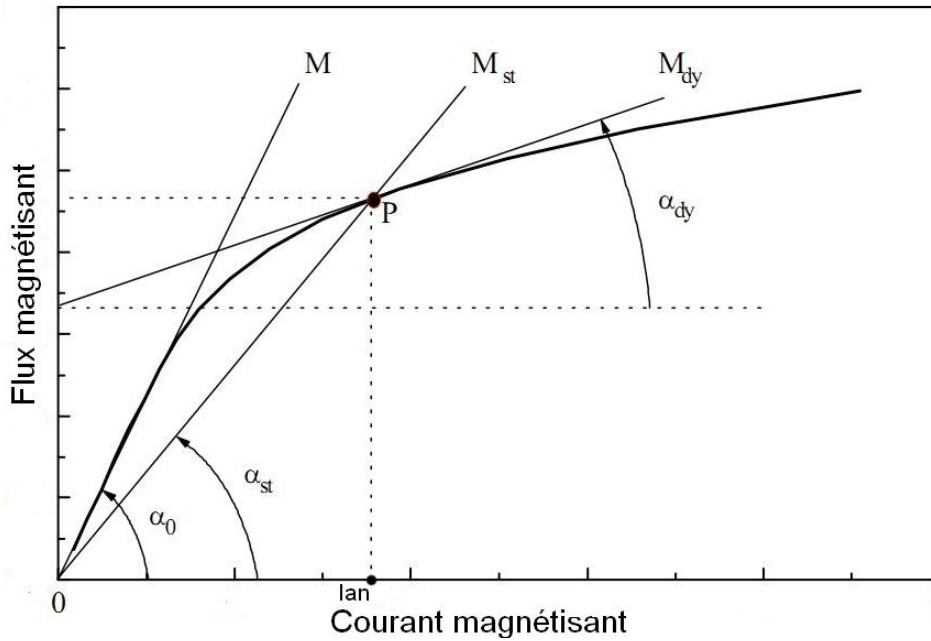


Fig.4.2 Représentation d'une courbe de magnétisation avec les paramètres qui permettent d'extraire les inductances saturées

Ce schéma montre la tangente au point initial qui permet de trouver l'inductance linéaire de la machine M , et deux droites qui passent par le point de fonctionnement P pour lequel on veut calculer nos inductances saturées.

La droite OP nous permet de trouver l'inductance mutuelle statique M_{st} et la tangente à la courbe de magnétisation au même point P l'inductance mutuelle dynamique M_{dy} .

Les expressions de ces trois inductances sont les suivantes :

$$M = tg(\alpha_0)$$

$$M_{st} = \frac{\Phi_{mP}}{I_{mP}} = tg(\alpha_{st})$$

$$M_{dy} = tg(\alpha_{dy})$$

En posant :

$$\begin{aligned} L_d &= \frac{d\Phi_m}{dI_m} + \sin(\beta)^2 \left(\frac{\Phi_m}{I_m} - \frac{d\Phi_m}{dI_m} \right) \\ L_q &= \frac{d\Phi_m}{dI_m} + \cos(\beta)^2 \left(\frac{\Phi_m}{I_m} - \frac{d\Phi_m}{dI_m} \right) \\ L_{dq} &= \left(\frac{\Phi_m}{I_m} - \frac{d\Phi_m}{dI_m} \right) \sin(\beta) \cos(\beta) \end{aligned} \tag{4.9}$$

On parvient à écrire les équations en tension de la machine sous la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s * I_{ds} + L_{\sigma s} \frac{dI_{ds}}{dt} + L_d \frac{dI_{dm}}{dt} \\ V_{qs} = R_s * I_{qs} + L_{\sigma s} \frac{dI_{qs}}{dt} + L_q \frac{dI_{qm}}{dt} \end{cases} \quad (4.10)$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r * I_{dr} + L_{\sigma r} \frac{dI_{dr}}{dt} + L_d \frac{dI_{dm}}{dt} + \omega r (M_{st} + L_{\sigma s}) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r * I_{qr} + L_{\sigma r} \frac{dI_{qr}}{dt} + L_q \frac{dI_{qm}}{dt} - \omega r (M_{st} + L_{\sigma s}) I_{dr} \end{cases} \quad (4.11)$$

Il faut noter qu'on retrouve les équations de la machine en régime linéaire si on pose $M = M_{st} = M_{dy}$.

4.2 SIMULATIONS ET INTERPRETATIONS

4.2.1 SIMULATIONS POUR DES CREUX DE PROFONDEUR VARIABLE

Les creux de tension ont tous été appliqués à l'instant $t=0.8s$, pour une même durée d'application de 20ms et des amplitudes de 10%,30%,50%,80%,100%, pour la machine de 3.5kW.

Courants statoriques

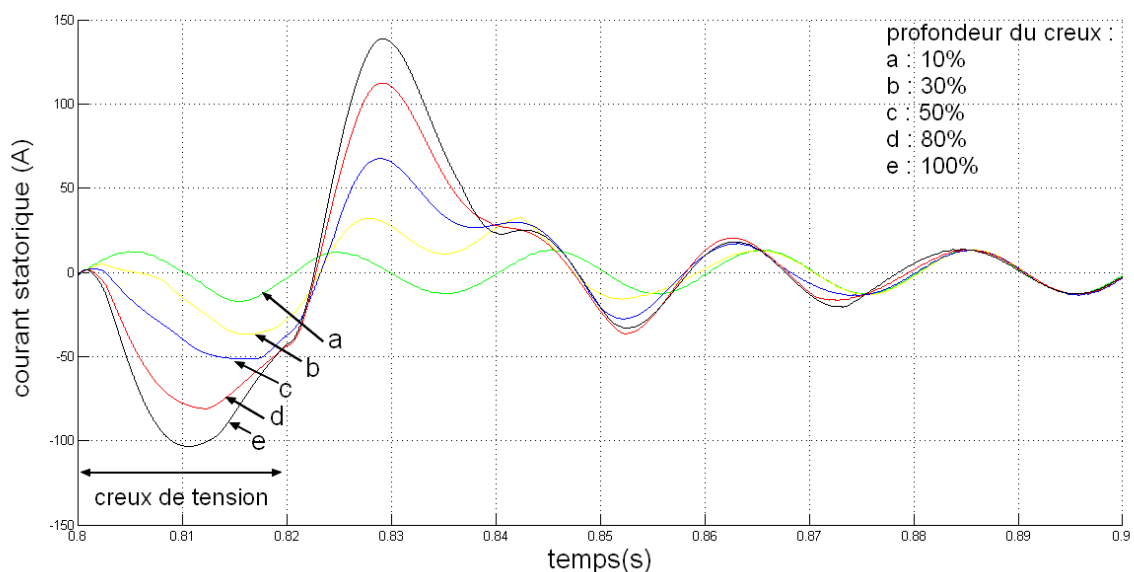


Fig.4.3 Représentation du courant statorique pour des creux de tension allant de 10% à 100% pour la machine de 3.5kW en régime saturé

Courants rotoriques

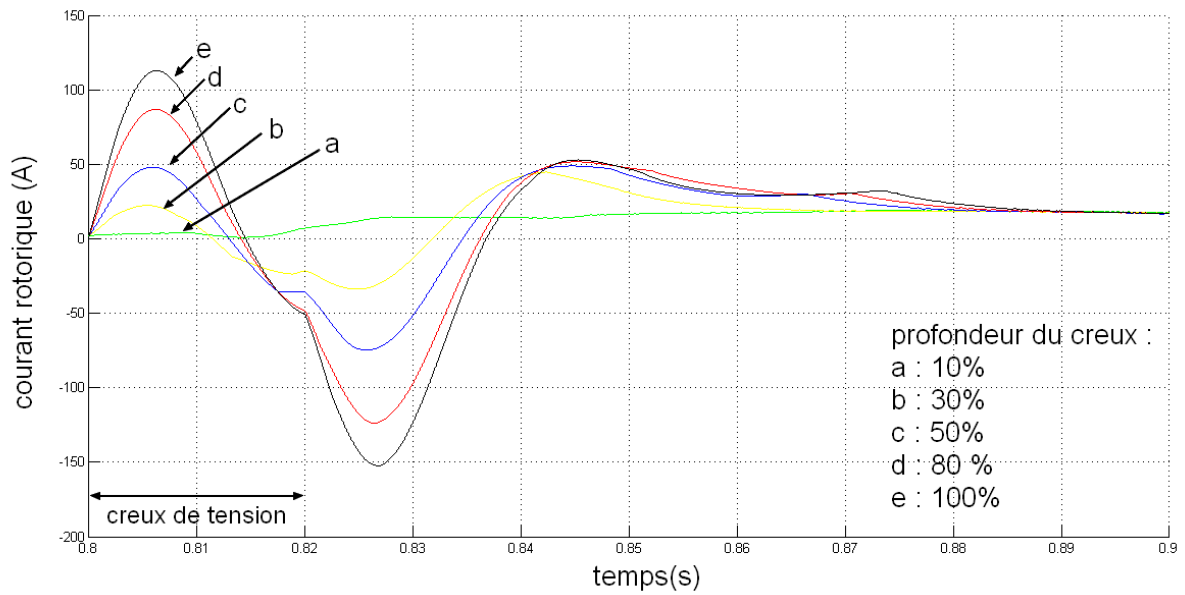


Fig.4.4 Représentation du courant rotorique pour des creux de tension allant de 10% à 100% pour la machine de 3.5kW en régime saturé

Couples

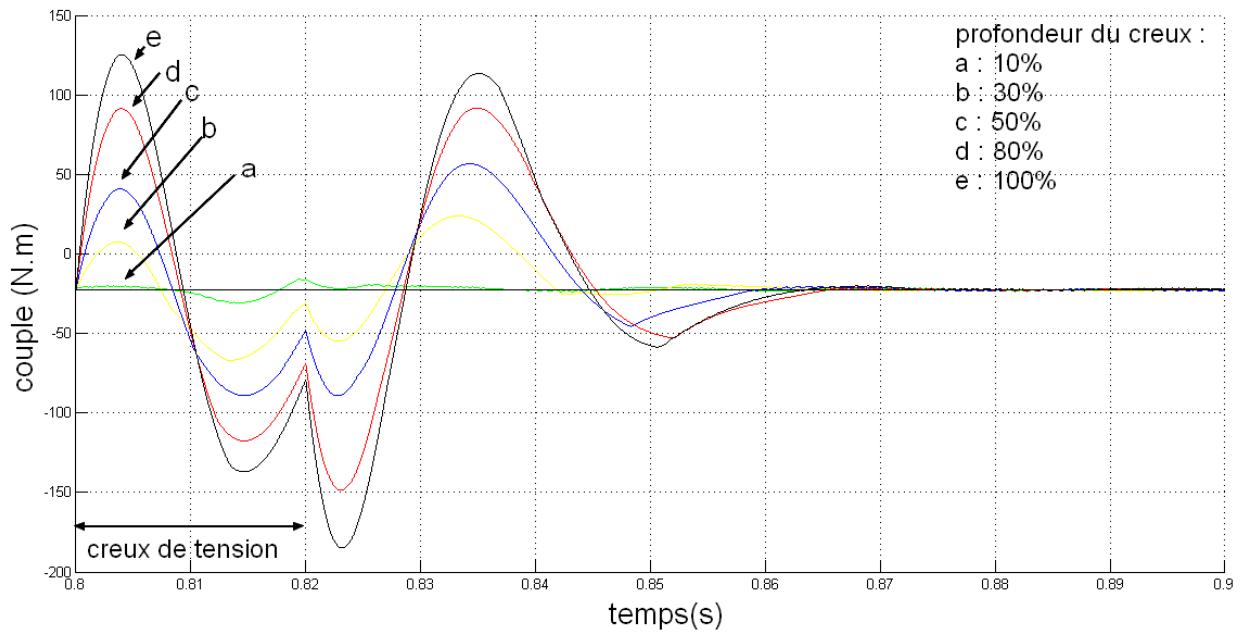


Fig.4.5 Représentation du couple pour des creux de tension allant de 10% à 100% pour la machine de 3.5kW en régime saturé

Observations

Le comportement global de la machine est semblable à celui observé en régime linéaire :

- Il y a apparition de deux pics, le premier juste après 0.8s (instant d'application du creux, 1er régime transitoire) et le second juste après 0.82s (instant de disparition du défaut, 2nd régime transitoire).
- Les pics les plus importants sont ceux qui se produisent lors du rétablissement de la tension nominale.
- Une discontinuité dans l'évolution des courants apparaît à 0.82 seconde et amorce le second pic du 2nd régime transitoire.
- Nous constatons que plus l'intensité des creux de tension augmente plus l'amplitude des pics de courant augmente.
- Le couple s'annule pour un creux de tension de 100 % (coupure), cela jusqu'à la disparition du creux pour les deux machines.

4.2.2 COMPARAISON DES ESSAIS EN REGIME LINEAIRE/SATURE

Nous avons superposé les courants statoriques et rotoriques d'une même phase pour des essais effectués en régime linéaire et saturé pour des creux de tension de 30% et 70%, Les creux de tension ont tous été appliqués à l'instant $t=0.8s$, pour une même durée d'application de 20ms.

Courant statorique

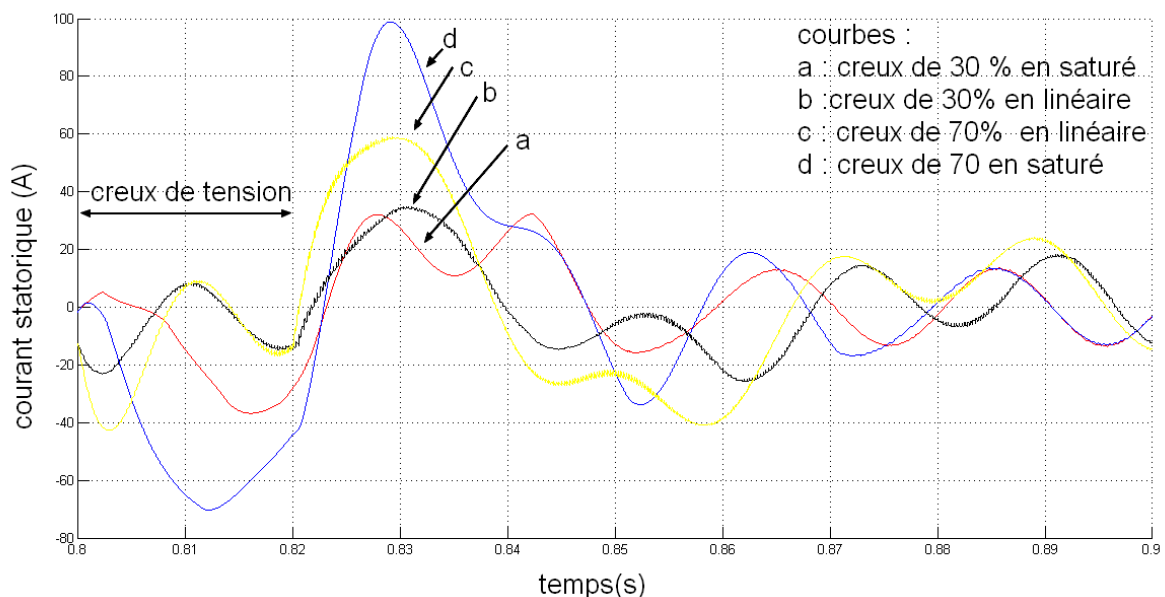


Fig.4.6 Représentation des courants statoriques en régime linéaire et saturé pour des creux de tension allant de 10% à 100%

Courants rotoriques

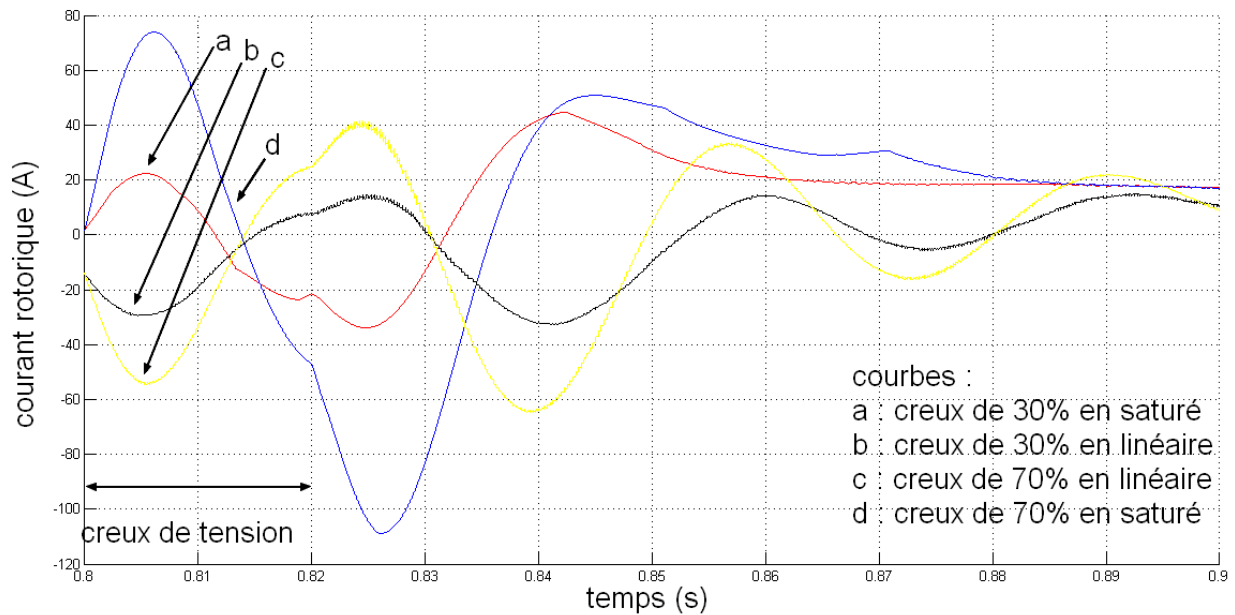


Fig.4.7 Représentation des courants rotoriques en régime linéaire et saturé pour des creux de tension allant de 10% à 100%

Observations

- Les pics de courants sont plus importants en régime saturé.
- Les signaux représentant la même phase, ils se confondent après retour au régime nominal, le retour au nominal est beaucoup plus rapide en régime saturé.

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons pu observer l'effet des creux de tension sur une MADA modélisée en régime saturé avant de le comparer aux résultats de simulation précédemment obtenus en régime linéaire.

Globalement, l'effet est le même : apparition de pics de courant. Ces pics sont toujours plus importants lors du rétablissement de la tension en comparaison avec le moment où la tension baisse.

Quelques différences sont cependant observées avec les simulations faites en régime linéaire. Le modèle nous montre des pics de courant plus importants en régime saturé. Les régimes transitoires y sont aussi plus courts qu'en linéaire.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Dans ce travail, nous avons expliqué le fonctionnement général des principales génératrices éoliennes et mis en évidence la puissance importante qu'il nous est possible d'extraire à partir de l'énergie cinétique du vent, nous avons mis en évidence que l'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation est la plus intéressante pour générer de l'électricité dans ce contexte.

Après avoir rappelé les modèles de la machine en régimes linéaire et saturé, nous avons simulé l'effet des creux de tension sur une machine à faible puissance (3.5kW) et une machine à forte puissance (300kW). Notre étude a montré que des régimes transitoires très importants apparaissent.

L'influence de deux paramètres a été observée : La profondeur des creux de tension qui a une influence évidente sur les pics de courant et leur durée.

La profondeur a une influence directe sur les pics de courant qui se produisent dans la machine tandis que la durée des creux a une influence indirecte, le moment où le creux apparaît sur la phase étant déterminant pour la valeur du courant lors du régime transitoire induit par le creux.

Par ailleurs, l'étude a aussi montré la similitude du comportement des deux machines même si les valeurs des pics de courant sont beaucoup plus important dans la machine à 300kW, ce qui est notamment dû aux paramètres des machines et bien entendu à la puissance.

Enfin, l'étude en régime saturée a montré un comportement semblable à celui observé en régime linéaire mais avec des régimes transitoires plus courts et des pics de courant un peu plus importants. La génératrice asynchrone à double alimentation fonctionnant constamment en régime saturé, il demeure intéressant de modéliser le système en régime saturé pour avoir des résultats plus proches de la réalité.

Ce travail a montré l'importance de la prise en compte des creux de tension lors du dimensionnement des installations éolienne. La puissance installée générée par des machines asynchrones à double alimentation étant de plus en plus importante, on ne peut plus se permettre d'arrêter la production lorsque des creux surviennent. On voit donc la nécessité de développer des systèmes qui, tout en protégeant la machine et les convertisseurs, la maintiennent connectée au réseau.

ANNEXE

PARAMETRES DES MACHINES

Les machines utilisées sont des machines asynchrones à rotor bobiné de 300kW et de 3.5kW dont les paramètres sont les suivants :

Paramètres de la machine de 300kW :

Paramètre	Valeur numérique
Puissance nominale Pn	300kW
Tension nominale Vn	400/690 V
Résistance statorique Rs	0.0063Ω
Résistance rotorique Rr	0.0048Ω
Inductance statorique Ls	0.0118H
Inductance rotorique Lr	0.0116H
Inductance Magnétisante	0.0115H
Nombre de paires de pôles	2
Courant nominal statorique Isn	370 A
Courant nominal rotorique Irn	380 A

Paramètres de la machine de 3.5kW :

Paramètre	Valeur numérique
Puissance nominale Pn	3.5kW
Tension nominale Vn	220/380 V
Résistance statorique Rs	0.76Ω
Résistance rotorique Rr	0.74Ω
Inductance statorique Ls	0.077H
Inductance rotorique Lr	0.077H
Inductance Magnétisante M	0.074H
Nombre de paires de pôles	2
Courant nominal statorique Isn	14A
Courant nominal rotorique Irn	9A

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] www.transition-energetique.gouv.fr
- [2] « Key wordenergystatistics ». Agence internationale de l'énergie. 2009.
- [3] U.S. Energy Information Administration. International energy statistics–electricity. *eia.doe.gov*, 2010.
- [4] www.reuters.com
- [5] Agence Internationale de l'Energie. Manuel des statistiques en énergie. Novembre 2011.
- [6] [www. Energieeolienne.com](http://www.Energieeolienne.com)
- [7] : HORS-SÉRIE le journal de l'éolien N° 10 – 2012 Baromètre éolien –Euroobserver – Février 2012
- [8] Désiré Le GOURIERE, Energie éolienne, Théorie, Conception et calcul pratique des installations, édition Eyrolles, 1982.
- [9] GIPE (P.) . – Wind Energy. Comes of Age. Wiley (1995).
- [10] www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16656
- [11] PHILIPPE (J.-L.) . – Hélices aériennes. Traité Génie Mécanique [BM 4 540], janv. 1999.
- [12] S. Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-97143-X, 1998.
- [13] H.BEN AHMED, B.MULTON, C.NICHITA, et Al "Aérogénérateurs électriques", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie électrique [D3960].
- [14] RUELLE (G.). – Alternateurs hydrauliques et compensateurs. Techniques de l'ingénieur, traité de génie électrique. [D 3 540] 09-1992.
- [15] WETZER (P.). – Machines synchrones. Chapitre Excitation. Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie électrique [D 3 545].
- [16] NICHITA (C.). – Étude et développement de structures et lois de commande numériques pour la simulation en temps réel d'actionneurs. Application à la réalisation d'un simulateur d'aérogénérateur de 3 kW. Thèse de Doctorat, Université du Havre, 1995.
- [17] G.Abad, M. Rodrigue, G.Iwanski, « Applications de la machine asynchrone à double alimentation ». Cours de génie électrique. Université de Mondragon, Espagne. 2009.

- [18] Frédéric POITIERS, Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'utilisation de l'énergie Eolienne, Machine asynchrone à cage autonome ; Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau, Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 2003
- [19] G. Salloum : Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation, thèse de doctorat institut polytechnique de Toulouse, 2007.
- [20] : F. MERRAHI. "Alimentation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation (application à l'énergie éolienne)", école nationale polytechnique, 2007.
- [21] : R. KRISHNAN. "*Electric motor drives modeling, analysis and control*". Prentice Hall, 2001.
- [22] O. Chee-Mun. "*Dynamic simulation of electric machinery using matlab/Simulink*". Printice hall, 1998.
- [23] A. Petersson, Analysis, modeling and control of doubly-fed induction generators for wind turbines, Chalmers Univ., Göteborg, Sweden, 2003.
- [24] V. Akhmatov, "Modeling of variable-speed wind turbines with doubly-fed induction generators in short-term stability investigations," in Proc. 3rd Int. Workshop Transmission Networks for Offshore Wind Farms, Stockholm, Sweden, Apr. 11-12, 2002, pp. 1-23.
- [25] A. Merlin « Les grandes pannes des réseaux électriques (Europe, USA) sont-elles dues à l'ouverture du marché de l'électricité ? » REE, N°03, Mars 2004, pp 78-85.
- [26] Arrêté du 17 Mars 2003 relatif aux prescriptions techniques de conception et de fonctionnement pour le raccordement à un réseau public de distribution d'une installation de production d'énergie électrique, publié au journal officiel de la république française N°93 du 19 avril 2003, page 7005, texte 32.
- [27] G. D. Marques, M. Sousa, "Understanding the Doubly Fed Induction Generator During Voltage Dips", IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 27, NO. 2, JUNE 2012.
- [28] Luigi Piegari', Member. IEEE, Renato Rizzo, Member, IEEE, Study of saturation phenomenon asynchronous generators used in wind farms, Electrical Engineering Department, University of Naples "Federico II", Via Claudio 21, Naples, Italy.