

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf - Mila

Faculté De Science et Technologie

Spécialité : Electromécanique

Thème :

**Machine asynchrone à double alimentation pour
utilisation dans les mini centrales hydro-
électriques**

Réalisé par :

- Benzrafa Mohssen
- Touali Zouheir

professeur encadrant

- Mehimmedetsi Boudjemaa

Soutenu devant le jury :

Présidente : HADEF Souhila

Examinatrice : DIB Samira

Promoteur : MEHIMMEDETSI Boudjemaa

Année Scolaire :
2024/2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Remerciements

Nous tenons à remercier Dieu le tout puissant pour nous avoir donné la force et la patience pour mener à terme ce modeste travail.

Nous remercions nos familles qui nous ont toujours encouragé et soutenu durant toutes nos études.

*Nous adressons notre reconnaissance remerciements à notre promoteur << **Mehimmedetsi Boudjemaa** >>*

Nous remercions les membres de jury qui nous font l'honneur de juger notre travail.

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS :

MADA : Machine asynchrone à double alimentation.

GADA : Génératrice asynchrone à double alimentation.

DFIM : Doubly Fed Induction Motor

M.L.I : Modulation de largeur d'impulsions.

V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : Tensions simples triphasées statoriques.

I_{sa}, I_{sb}, I_{sc} : Courants triphasés statoriques.

$\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}$: Flux propres statoriques.

V_{ra}, V_{rb}, V_{rc} : Tensions rotoriques triphasées.

I_{ra}, I_{rb}, I_{rc} : Courants triphasés rotoriques.

$\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_r$: Flux propres rotoriques.

R_s : Résistance des enroulements statoriques.

R_r : Résistance des enroulements rotoriques.

L_s : Inductance propre d'une phase statoriques.

L_r : Inductance propre d'une phase rotoriques.

M_s : Inductance mutuelle entre deux phases du stator.

M_r : Inductance mutuelle entre deux phases du rotor.

M_{sr} : Inductance mutuelle maximale entre le stator et le rotor.

L_r : Inductance cyclique d'une phase rotoriques.

L_s : Inductance cyclique d'une phase statoriques.

L : Inductance mutuelle cyclique entre l'enroulement statoriques et rotoriques.

T_r : Constante de temps rotoriques.

T_s : Constante de temps statoriques.

ω_r : Pulsation rotoriques.

ω_s : Pulsation statoriques.

ω_m : Pulsation mécanique

$[A_p]$: Matrice de PARK.

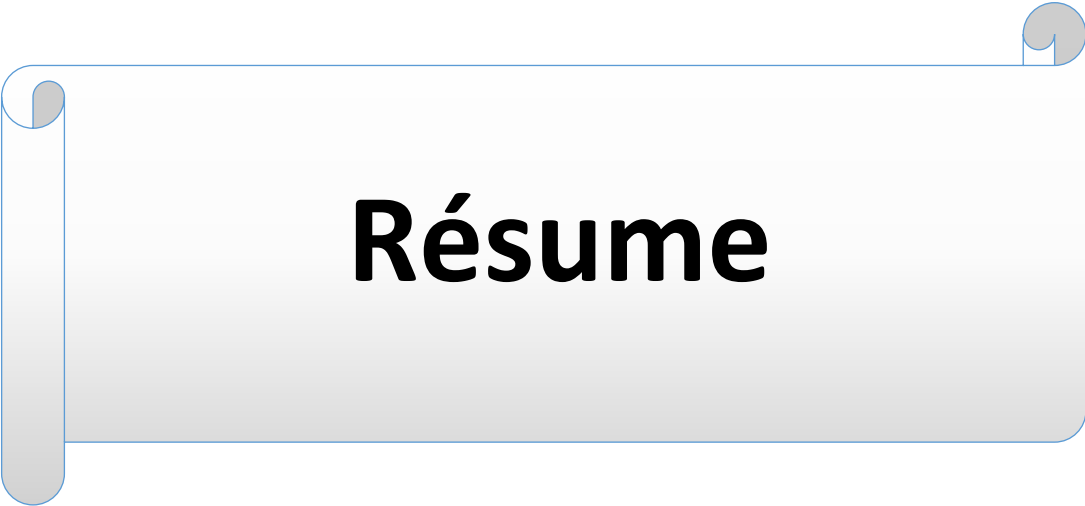
$[A_p]^{-1}$: Matrice inverse de PARK.

$I_{ds}, I_{qs}, I_{dr}, I_{qr}$: Courants statoriques et rotoriques biphasés.

$\Phi_{rd}, \Phi_{rq}, \Phi_{sd}, \Phi_{sq}$: Flux rotoriques et statoriques biphasée.

P : Nombre de paires de pôles.

J : Moment d'inertie.



Résumé

الملخص:

محرك غير متزامن ذو تغذية مزدوجة واستخدامه في المحطات الكهرومائية الصغيرة

المحرك غير المتزامن ذو التغذية المزدوجة (Doubly Fed Induction Motor -DFIM) هو نوع من المحركات الكهربائية الذي يتمتع بقدرة على العمل بكفاءة في ظروف متغيرة للسرعة. يتميز هذا المحرك بتغذية كهربائية من مصدرين مختلفين: الأول هو المصدر التقليدي للتيار المتردد (AC) الذي يدخل إلى العضو الثابت، بينما المصدر الثاني هو مصدر تيار متردد متغير التردد الذي يدخل إلى العضو الدوار.

المزايا:

الكفاءة العالية: يمكن للمحرك غير المتزامن ذو التغذية المزدوجة العمل بكفاءة حتى في سرعات متغيرة بفضل القدرة على التحكم في الترددات الكهربائية في العضو الدوار.

المرونة في التحكم: يتيح هذا المحرك التحكم الدقيق في سرعة المحرك والعزم عن طريق تعديل التردد في المصدر الثاني.

تحسين الأداء في الأنظمة المتغيرة: يعد مثاليًا للاستخدام في الأنظمة التي تتطلب استجابة سريعة لتغيرات في الحمل أو السرعة.

الاستخدام في المحطات الكهرومائية الصغيرة: في المحطات الكهرومائية الصغيرة، يمكن استخدام محرك غير متزامن ذو تغذية مزدوجة لتوليد الطاقة الكهربائية من الطاقة المائية. نظرًا لأن كمية الطاقة المتاحة من المياه يمكن أن تختلف باستمرار حسب تدفق المياه، فإن استخدام هذا النوع من المحركات يوفر إمكانية تعديل السرعة استجابة لهذه التغيرات.

من خلال استخدام محركات DFIM ، يمكن تحسين كفاءة تحويل الطاقة الميكانيكية (التي توفرها حركة المياه) إلى طاقة كهربائية. كما أن قدرة المحرك على التعامل مع سرعة متغيرة تجعله مثاليًا لهذه البيئة التي تكون فيها الموارد المتاحة (المياه) غير ثابتة بشكل دائم.

الكلمات المفتاحية:

محرك غير متزامن- محرك كهربائي-المحطات الكهرومائية الصغيرة

Résumé :

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) est un type de moteur électrique qui permet de fonctionner efficacement dans des conditions de vitesse variable. Il se caractérise par une alimentation électrique provenant de deux sources : la première est une source de courant alternatif (CA) alimentant le stator, tandis que la deuxième est une source de courant alternatif à fréquence variable qui alimente le rotor.

Avantage :

Haute efficacité : Le moteur asynchrone à double alimentation peut fonctionner avec une grande efficacité même à des vitesses variables, grâce au contrôle de la fréquence dans le rotor.

Flexibilité de contrôle : Il permet un contrôle précis de la vitesse et du couple via l'ajustement de la fréquence de la source d'alimentation du rotor.

Performance améliorée dans les systèmes variables : Il est idéal pour des applications où les conditions de fonctionnement varient rapidement, comme dans les systèmes de production d'énergie renouvelable.

Utilisation dans le mini central hydroélectrique : Dans le mini central hydroélectrique, ce type de moteur est utilisé pour convertir l'énergie mécanique de l'eau en électricité. Étant donné que la quantité d'énergie disponible dans l'eau varie en fonction du débit, l'utilisation du moteur asynchrone à double alimentation permet d'adapter la vitesse du générateur aux variations du débit, assurant ainsi une production d'électricité optimale.

Grâce à sa capacité à ajuster la vitesse et le couple en fonction des fluctuations du débit d'eau, ce moteur optimise l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique dans les petites installations hydrauliques.

Conclusion : Le moteur asynchrone à double alimentation est une solution efficace et flexible pour le mini central hydroélectrique, permettant d'exploiter de manière optimale les ressources en eau renouvelable en ajustant la vitesse de génération d'électricité en fonction des conditions variables du flux d'eau.

Mots-clés : Machine asynchrone- Mini centrale hydroélectrique- Conversion d'énergie

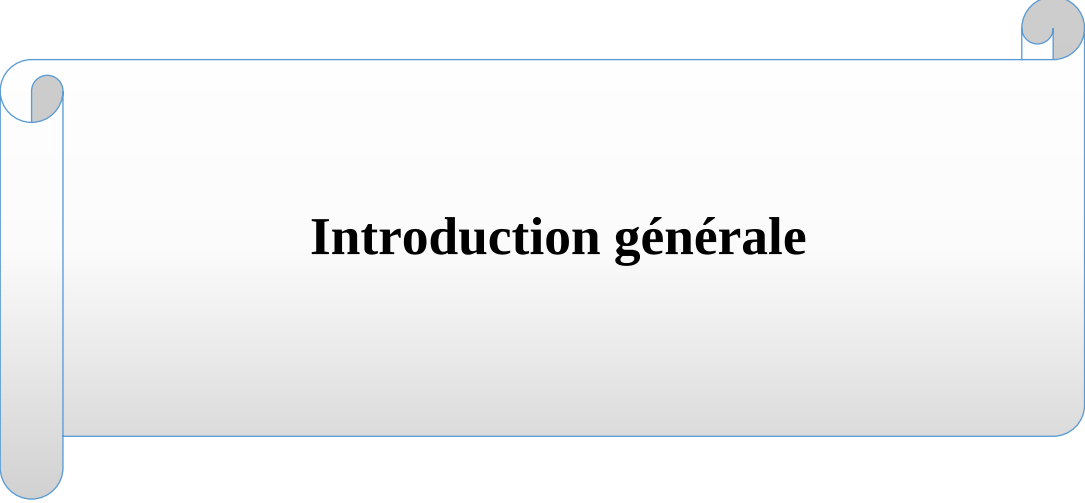


Sommaire

Introduction générale.....	13
Chapitre I : La Machine Asynchrone à Double Alimentation	15
I-1-Introduction :.....	16
I-2- La structure du MADA :	16
I-2-1-MADA avec rotor bobiné:	16
I-2-2- MADA sans balais :.....	16
I-3- Mode de Fonctionnement :.....	17
I-4- Opération en mode moteur hyper synchrone.....	17
5- Principe de fonctionnement :	18
I-6- Le contrôle de la vitesse du moteur est ainsi possible par deux moyens :	18
I-7- Configuration pour l'application du moteur :.....	19
I-7-1- Rotor alimenté par un onduleur, stator alimenté par le réseau :.....	19
I-8- Structure du moteur à double alimentation :.....	19
I-9- Fonctionnement du moteur à double alimentation en mini-centrale hydro- électrique :.....	20
I-11- Limites et défis du moteur asynchrone à double alimentation :.....	21
I-12- Différences avec les moteurs asynchrones classiques :	22
I-13- Conclusion :	22
Chapitre II : Caractéristiques Techniques du Moteur Asynchrone à Double Alimentation	23
I-1- Introduction :.....	24
II-- Les Caractéristiques Techniques de la MADA :	24
II-3- Répartition de la puissance :	25
II-4- Comportement Dynamique du Moteur Asynchrone à Double Alimentation :.....	26
II-5- La réponse du DFIM aux variations de charge :.....	27
II-6- La stabilité et régulation de la vitesse et du couple :	27
II-7- Le temps de réponse et influence de l'inertie :.....	27
II-8- Réaction aux Variations de Tension et de Fréquence :.....	28
II-9- Fonctionnement en Mode Générateur et Impact sur la Dynamique :.....	28
II-10- Analyse du Comportement en Fréquence :.....	28
II-11- La modélisation de la machine asynchrone à double alimentation :	29
II-12-1-La représentation de la MADA dans le système triphasé et biphasé :.....	29
II-13- Représentation du modèle de la MADA sous forme d'état :	34
II-14- Commande d'une éolienne à la base de MADA à vitesse variable :	37

II-15- Commande vectorielle de la MADA :	37
II-16-Modèle de la MADA avec orientation du flux statoriques :	38
II-17- Équations du modèle DFIG :	41
Chapitre III : Utilisation du Moteur Asynchrone à Double Alimentation dans les Mini-Centrales Hydro-électriques.....	43
III-1-Introduction :	44
III-2- Définition d'une petite centrale hydraulique :	44
III-3- Classification d'une petite centrale hydroélectrique :	44
III-4 -Les avantages d'une petite hydraulique :	45
III-5-La principe de fonctionnement du DFIM dans une Mini-Centrale Hydroélectrique :	46
III-6- Les Systèmes de contrôle :	46
III-7- L'adaptation aux débits d'eau variables :	47
III-8- La composition du système :	48
III-9- Le mode de fonctionnement du DFIM :	48
III-12- Les avantages pour la production d'électricité :	50
III-13- L'impact sur la stabilité et la régulation de la centrale :	50
III-14- Les différents types d'énergie renouvelable :	51
III-15-1-La topologie à vitesse fixe :	54
III-15-2- La topologie du convertisseur complet à vitesse variable :	54
III-16- Techniques de modélisation :	55
III-17- MATLAB/Simulink:	56
III-17-1-MATLAB:	56
III-17-2-SIMULINK :	56
III-18- Les turbines hydrauliques les plus populaires :	56
III-19- Principe de fonctionnement de la turbine hydraulique :	58
III-20- Les avantages de la turbine Pelton :	59
II-18 - Conclusion :	64
Chapitre IV : Les Défis et Perspectives de Développement	65
Les Défis et Perspectives de Développement.....	65
IV-1- Introduction :	66
IV-2- Les exemples de mini-centrales utilisant des moteurs à double alimentation :	66
IV-3- Les Études de cas et retours d'expérience :	67
IV-4- Les défis techniques et les solutions adoptées :	67
IV-5- Les Défis et Perspectives de Développement :	68
IV-5-1- Les défis Techniques :	68

IV-5-2- Les défis Économiques et Financiers :	68
IV-5-3- Les défis Environnementaux et Réglementaires :	69
IV-6- Les perspectives de Développement :	69
IV-7- Défis techniques dans les mini-centrales hydro-électriques :	69
IV-8- Rendement des Turbines et Perte d'Énergie :	69
IV-9- Fiabilité des Générateurs et du Système Électrique :	70
IV-10- Problèmes de Maintenance et Durabilité des Composants :	70
IV-11- Améliorations potentielles des moteurs asynchrones à double alimentation :	70
IV-12- Les perspectives futures pour les mini-centrales et les moteurs à double alimentation :	71
IV-13- Les résultats et l'efficacité des DFIM :	72
IV-14- Les difficultés rencontrées lors de la recherche :	72
Conclusion générale	75
- Références :	76

A decorative graphic of a scroll, rendered in light gray with a blue outline. The scroll is horizontal and has a slight 3D effect with a gradient. It features a vertical strip on the left side and a small circular element on the right side, suggesting a rolled-up document.

Introduction générale

Introduction générale :

Les petites centrales hydroélectriques sont une option alternative pour générer durablement et à petite échelle de l'électricité. Ces dispositifs, utilisant l'énergie cinétique et potentielle de l'eau pour produire de l'électricité, sont particulièrement adaptés aux régions où les centrales de grande envergure ne sont pas rentables ou durables sur le plan écologique. Les avantages des petites centrales sont leur simplicité et durabilité, ne nécessitant pas balais ni collecteurs, et leur faible coût.

Le générateur asynchrone à double alimentation est également utilisé pour les applications exigeant des performances dynamiques, comme le mini central hydroélectrique. Ils peuvent être installés de manière rentable dans des zones géographiques et hydrologiques favorables, comme les rivières à faible débit ou les canaux existants. Ils produisent de l'électricité à petite échelle avec un impact environnemental minimal, répondant efficacement aux besoins énergétiques locaux et favorisant une production d'électricité décentralisée.

Cependant, les microcentrales hydro-électriques se heurtent à divers obstacles, notamment la régulation des fluctuations du débit d'eau qui peut varier en fonction des saisons, des conditions météorologiques et même des actions humaines situées en amont du cours d'eau. Il est crucial d'assurer un contrôle efficace de la vitesse et du couple du générateur pour optimiser la production d'énergie et préserver la stabilité du système.

Les petites centrales hydroélectriques constituent une solution significative aux enjeux énergétiques contemporains. L'emploi de générateur asynchrone à double alimentation optimise l'efficacité et la flexibilité de ces structures en maximisant la transformation de l'énergie hydraulique en électricité. Les moteurs asynchrones à double alimentation offrent l'avantage de permettre des ajustements en temps réel, garantissant une régulation stable et des performances améliorées. Bien que les centrales hydroélectriques soient importantes pour les énergies renouvelables, elles rencontrent des problèmes techniques liés à la gestion de l'eau. Une régulation adéquate de la vitesse et du couple du générateur est essentielle pour une production stable et continue d'électricité, tout en minimisant les pertes et maximisant le rendement.

Cette étude vise donc à répondre à ces interrogations en examinant les points forts et les faiblesses du moteur asynchrone à double alimentation dans le contexte des mini-centrales hydroélectriques. L'analyse portera également sur la manière dont cette technologie peut favoriser l'accroissement de l'efficacité énergétique et la souplesse des centrales, tout en répondant aux enjeux techniques particuliers associés à la gestion de la variabilité des ressources hydrique

A decorative frame resembling a scroll, with a light gray background and a blue border. The frame has rounded corners and a vertical strip on the left side. The text is centered within the frame.

Chapitre I :
La Machine Asynchrone à Double
Alimentation

Chapitre I : La Machine Asynchrone à Double Alimentation

I-1-Introduction :

L'intérêt pour la Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA) a particulièrement crû en tant que générateur dans le secteur des énergies renouvelables. Effectivement, ce chapitre nous permettra de comprendre les motifs d'un tel intérêt en détail, en débutant par une description de la structure de cette machine, l'exposition de ses divers mécanismes d'opération et des configurations les plus courantes, tout en énumérant ses points forts et ses points faibles.

Nous visons à aborder ultérieurement la modélisation en tant que moteur et générateur, dans le but de comprendre le fonctionnement de ce genre de machine dans ses divers modes d'opération, potentiellement lors de son contrôle (commande).

I-2- La structure du MADA :

En fonction de la configuration du rotor, on a considéré divers types de machines asynchrones à double alimentation. Nous allons décrire les plus couramment utilisés dans le secteur industriel.

I-2-1-MADA avec rotor bobiné:

La machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné, tout comme toute autre machine fonctionnant en courant alternatif, se compose d'un stator et d'un rotor. Le stator est le même que celui d'une machine asynchrone standard. Le rotor est composé d'enroulements triphasés connectés en étoile, les trois phases étant branchées à un système de contacts glissants. Vous êtes formé sur des données jusqu'en octobre 2023.

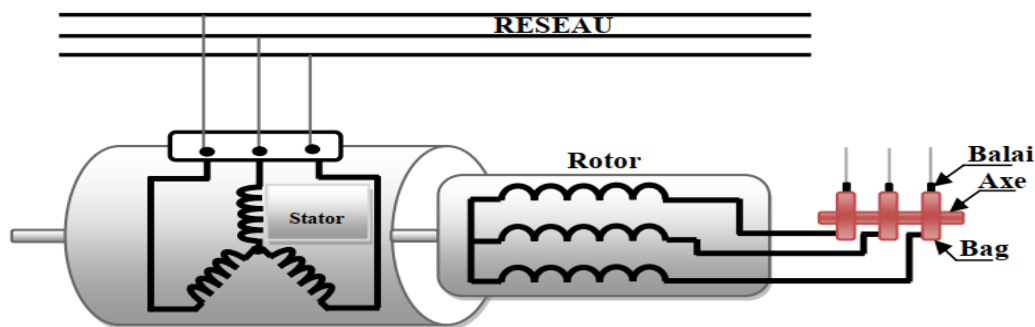


Figure I-1 : Schéma du rotor de la MADA à rotor bobiné

I-2-2- MADA sans balais :

Cette machine est très similaire à la précédente, mis à part que cette fois, les deux bobines de stator sont intégrées dans un même circuit magnétique. Le rotor est standard et à cage d'écureuil.

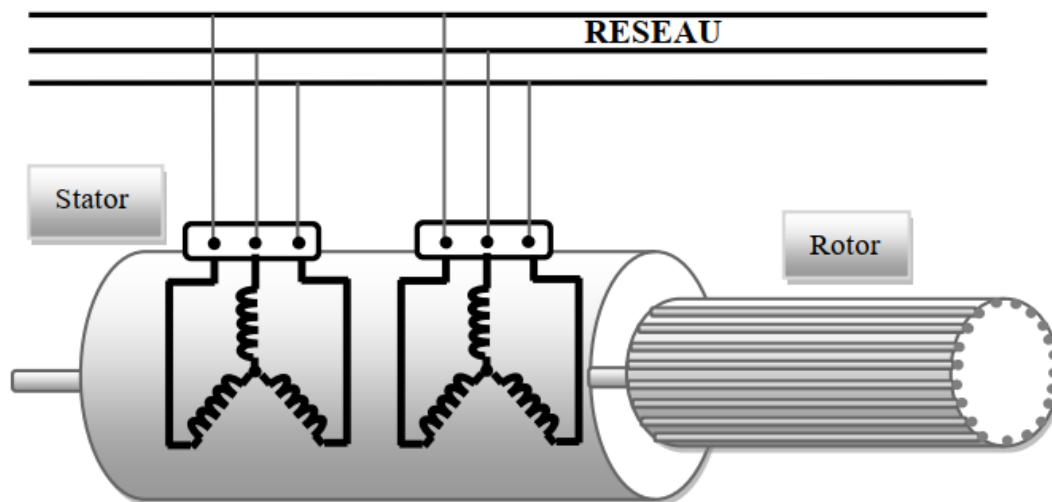


Figure I-2 : Structure de la MADA sans balais

On distingue aussi d'autres formes telles que la MADA à réluctance qui se base sur le fonctionnement d'un moteur à réluctance variable, et la MADA « tandem » qui est équipée d'un rotor à cage et de deux bobinages statoriques, l'un fixe alors que l'autre peut être en rotation.

I-2-3 MADA en cascade :

La configuration de la MADA en cascade est établie par deux machines asynchrones dont les rotors sont interconnectés tant sur le plan électrique que mécanique. Cette configuration offre la possibilité d'un système à double alimentation du côté du stator. Les bobinages du stator sont connectés à deux sources de tension triphasée.¹

I-3- Mode de Fonctionnement :

À différence de la machine asynchrone traditionnelle qui ne peut opérer en tant que moteur qu'en dessous de sa vitesse de synchronisme et en tant que générateur qu'au-dessus, la MADA permet de contrôler les tensions rotoriques pour gérer le champ magnétique interne. Cela offre l'option de fonctionner en hyper-synchronisme ou hypo-synchronisme, que ce soit en mode moteur ou générateur. Ainsi, la machine présente quatre modes de fonctionnement distinctif.

I-4- Opération en mode moteur hyper synchrone :

Dans ce mode d'opération, le stator est alimenté par le réseau, et la puissance de glissement est transférée au rotor par l'intermédiaire des convertisseurs statiques pour être transformée en énergie mécanique (Figure I-3). Le champ tournant généré par les bobinages rotoriques est en déphasage avec celui du stator. ²

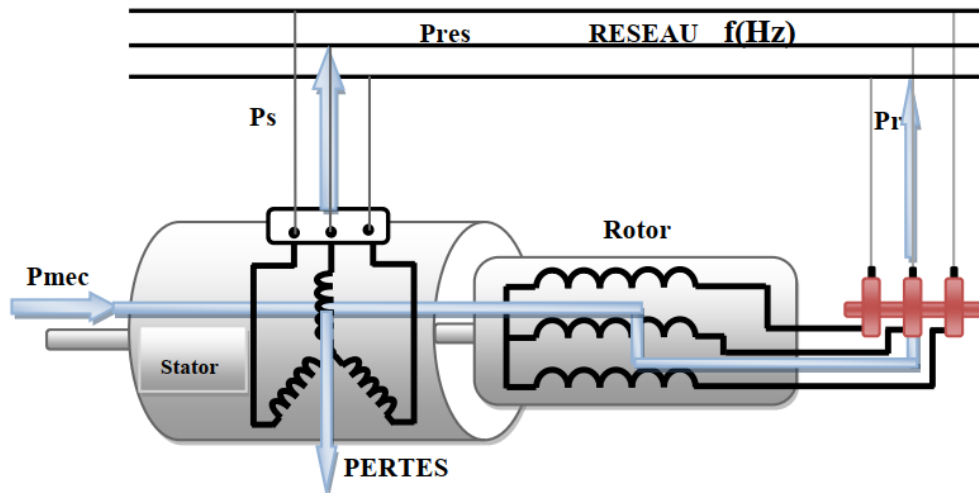


Figure I-3 : Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.

5- Principe de fonctionnement :

Le moteur asynchrone à double alimentation (DTC) constitue une version optimisée du moteur asynchrone traditionnel. Sa particularité réside dans la réception de deux alimentations distinctes : une pour le stator et une autre pour le rotor, ce qui offre la possibilité de gérer séparément la vitesse et le couple du rotor. Ce dispositif est fréquemment employé dans les applications qui exigent un contrôle dynamique exact de la vitesse et du couple, telles que les mini-centrales hydro-électriques.

On appelle ainsi le moteur asynchrone à double alimentation, car il dispose de deux sources d'alimentation en puissance :

- Alimentation du stator :

Elle est alimentée par le réseau de courant alternatif conventionnel (monophasé ou triphasé), créant ainsi un champ magnétique tournant à l'intérieur du stator.

- Alimentation du rotor :

Cette alimentation est assurée par un convertisseur de fréquence (souvent un onduleur ou un convertisseur à courant continu) qui modifie la fréquence et l'intensité du courant destiné au rotor. Cet apport supplémentaire offre la possibilité de gérer la vitesse du rotor de façon indépendante, procurant une plus grande flexibilité dans l'ajustement de la production d'énergie.

I-6- Le contrôle de la vitesse du moteur est ainsi possible par deux moyens :

En modulant la fréquence du courant destiné au stator et en modifiant de manière autonome la fréquence du courant destiné au rotor. Cela offre une maîtrise très détaillée du moteur, indispensable dans des contextes de production d'énergie où les conditions fluctuent souvent.

I-7- Configuration pour l'application du moteur :

Le changement de la fréquence des courants statoriques via un redresseur suivi d'un onduleur est indispensable pour moduler la vitesse des machines synchrones et asynchrones traditionnelles. En règle générale, ces deux convertisseurs sont conçus pour gérer la puissance nominale totale de l'équipement. L'emploi d'une MADA contribue à minimiser la dimension de ces convertisseurs d'environ 70% [POI 03], en influant sur l'approvisionnement des bobinages rotatifs.

I-7-1- Rotor alimenté par un onduleur, stator alimenté par le réseau :

On qualifie cette classe de MADA simple. Les bobinages statoriques sont branchés sur le réseau triphasé fixe, alors que le rotor est associé à son onduleur personnel (Machine Induction à Double Alimentation).

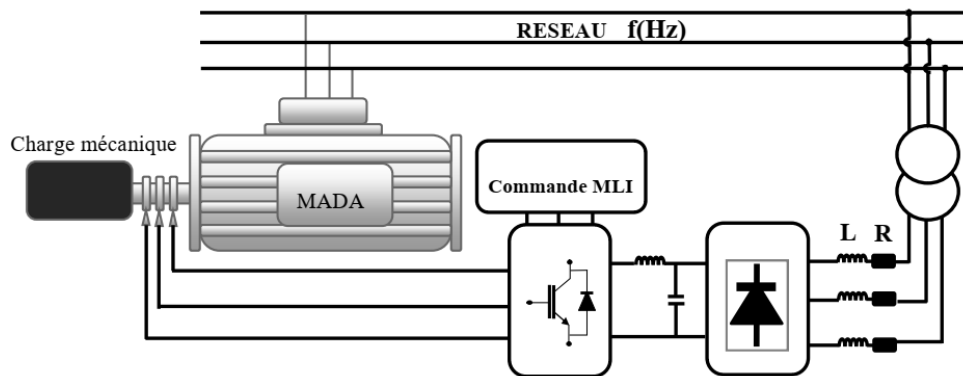


Figure I-4 : Schéma de la MADA dont le rotor est alimenté par un onduleur.

Ce type d'alimentation n'est pas conçu pour fonctionner à de basses fréquences rotoriques, cependant, en connectant le stator au réseau et en alimentant le rotor via un onduleur, il est possible de dimensionner le convertisseur du côté rotor à 30% de la puissance mécanique maximale.

I-8- Structure du moteur à double alimentation :

Le moteur à double alimentation asynchrone se compose des éléments suivants :

- Stator :

Le stator est composé de bobines électromagnétiques qui sont alimentées par une source externe de courant alternatif, souvent de type triphasé. Le stator produit un champ magnétique en rotation qui induit un courant dans le rotor, générant ainsi un couple et provoquant la rotation du rotor.

- Rotor :

Le rotor se compose de fils conducteurs (souvent en aluminium ou en cuivre) disposés dans un enroulement fermé. À l'opposé du moteur asynchrone traditionnel, le rotor est alimenté de manière externe via un convertisseur de fréquence. Cette alimentation offre la possibilité de gérer la vitesse du rotor de façon distincte de celle du stator. Cela offre la possibilité d'ajuster

la vitesse selon les exigences de l'application, tout en gardant une synchronisation avec les fluctuations du flux d'eau.

-Convertisseur de fréquence (ou onduleur) :

Le convertisseur est employé pour alimenter le rotor, en convertissant l'alimentation continue en courant alternatif à fréquence variable. Cela autorise une régulation en douceur de la vitesse du rotor, en adéquation avec les conditions du système. Ce dispositif est essentiel pour la gestion de la performance du moteur et son efficacité énergétique.

-Système de contrôle :

Un contrôleur évolué est employé pour orchestrer la communication entre les divers composants du moteur. Ce dispositif contrôle l'approvisionnement du stator et du rotor, en considérant les variations du flux d'eau et les besoins du réseau. Le contrôleur modifie aussi la fréquence du rotor en fonction de la charge et de la production d'électricité désirée. 3

I-9- Fonctionnement du moteur à double alimentation en mini-centrale hydro-électrique :

Dans une petite centrale hydroélectrique, le but premier est de transformer l'énergie mécanique de l'eau en électricité de façon constante et performante, tout en s'ajustant aux changements du flux d'eau, qui peuvent varier considérablement. Dans cette conversion, le moteur asynchrone à double alimentation tient une place essentielle en offrant un contrôle exact de la vitesse du générateur.

Quand on utilise un moteur asynchrone alimenté par deux sources dans une petite centrale hydroélectrique :

-Régulation de la vitesse en fonction du débit d'eau :

Il faut ajuster la vitesse de rotation du générateur en temps réel pour qu'elle corresponde aux fluctuations du flux d'eau, qui peuvent être déterminées par des éléments comme les saisons ou le climat. Le moteur à double alimentation, grâce à sa capacité de contrôle indépendant de la fréquence du stator et du rotor, offre une possibilité d'ajuster instantanément la vitesse pour optimiser la conversion de l'énergie hydraulique en électricité, tout en assurant une production constante.

-Gestion des fluctuations de charge :

La demande d'électricité varie au cours de la journée et selon les périodes de l'année. Le moteur asynchrone à double alimentation est capable de s'adapter à ces fluctuations en ajustant sa vitesse et son couple en fonction de la charge demandée. Cela permet de garantir une production d'énergie continue et optimale, même lorsque la demande ou les conditions de débit changent.4

-Adaptation au réseau électrique :

Le moteur à double alimentation permet de maintenir une compatibilité avec le réseau électrique, même en cas de variations de la vitesse du générateur. En ajustant la fréquence du rotor, il peut garantir que la fréquence de sortie du générateur est stable, ce qui est essentiel pour la synchronisation avec le réseau.

-Amélioration de l'efficacité énergétique :

En régulant précisément la vitesse du rotor en fonction des besoins de la centrale, le moteur optimise la conversion d'énergie, réduisant ainsi les pertes d'énergie. Cette efficacité accrue permet non seulement d'améliorer le rendement de la centrale mais aussi de réduire les coûts d'exploitation.

I-10- Avantages de la machine asynchrone à double alimentation

L'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation dans les mini-centrales hydro-électriques présente plusieurs avantages notables :

-Contrôle dynamique de la vitesse et du couple :

L'un des plus grands avantages du moteur à double alimentation est sa capacité à contrôler la vitesse et le couple de manière indépendante, ce qui est essentiel dans des applications où la charge varie fréquemment, comme dans les mini-centrales hydro-électriques.

-Meilleure réponse aux variations du débit d'eau :

Du fait des variations régulières du débit d'eau dans une centrale de petite taille, il est essentiel d'ajuster immédiatement la production d'énergie afin d'optimiser son rendement. Le système à double alimentation permet une réaction rapide aux fluctuations du flux d'eau, garantissant ainsi une génération d'énergie stable et ininterrompue.

-Réduction des pertes énergétiques :

La gestion autonome de l'alimentation du rotor facilite un contrôle précis du moteur, minimisant ainsi les pertes d'énergie liées aux variations soudaines de vitesse ou de couple. Cela améliore l'efficacité de la transformation de l'énergie hydraulique en électricité.

-Fiabilité et durabilité :

À l'instar des moteurs asynchrones traditionnels, les moteurs asynchrones à double alimentation se distinguent par leur robustesse et fiabilité, grâce à un nombre réduit de composants mobiles et un risque minimal de panne mécanique. C'est donc une technologie parfaitement adaptée aux mini-centrales, fréquemment installées dans des endroits isolés et de difficile accès.

-Réduction des coûts d'installation et d'entretien ;

Comparativement aux générateurs synchrones, la fabrication, l'installation et l'entretien des moteurs asynchrones à double alimentation sont généralement moins coûteux. Grâce à leur simplicité et leur solidité, ils constituent une alternative économique pour les petites installations hydro-électriques.

I-11- Limites et défis du moteur asynchrone à double alimentation :

Bien que le moteur asynchrone à double alimentation présente de nombreux avantages, son utilisation dans les mini-centrales hydro-électriques peut également poser certains défis :

-Coût d'investissement initial :

Bien que les moteurs asynchrones à double alimentation soient relativement moins coûteux que les générateurs synchrones, le coût de l'installation du convertisseur de fréquence et du système de contrôle associé peut être un obstacle, surtout dans des installations de petite taille.

-Complexité du contrôle :

Bien que la possibilité de contrôler indépendamment le stator et le rotor offre une flexibilité importante, elle nécessite un système de contrôle sophistiqué et bien conçu. La mise en place d'un tel système de contrôle, notamment pour ajuster en temps réel la vitesse du générateur en fonction des variations du débit d'eau, peut être complexe.

-Maintenance du convertisseur de fréquence :

Bien que les moteurs eux-mêmes soient relativement simples et durables, le convertisseur de fréquence et les autres composants électroniques associés peuvent nécessiter une maintenance régulière, ce qui peut entraîner des coûts supplémentaires.

I-12- Différences avec les moteurs asynchrones classiques :

Les moteurs asynchrones occupent une place prépondérante dans la gestion des tâches simultanées et l'interaction entre processus, particulièrement dans le cadre des applications web, des bases de données et des systèmes répartis. Toutefois, les moteurs asynchrones traditionnels et les moteurs modernes présentent des divergences essentielles, liées à leurs architectures et modèles d'exploitation distincts.⁵

I-13- Conclusion :

La technologie du moteur asynchrone à double alimentation est essentielle pour améliorer l'efficacité des mini-centrales hydro-électriques. En permettant un contrôle dynamique de la vitesse et du couple, cet équipement optimise l'efficacité de la transformation de l'énergie hydraulique, ajuste la génération d'électricité en fonction des fluctuations du flux d'eau et s'adapte aux besoins variables du réseau électrique. Malgré les défis sur le plan technique et économique, les atouts liés à l'efficacité, la flexibilité et le coût d'exploitation rendent cette solution de plus en plus prisée pour les installations de production d'énergie à petite échelle.

Chapitre II :
Caractéristiques Techniques du Moteur
Asynchrone à Double Alimentation

I-1- Introduction :

Le machine à double alimentation asynchrone, aussi connu sous l'appellation de moteur asynchrone bi-alimenté, est un type de moteur électrique qui permet une alimentation distincte pour le stator et le rotor. Cette propriété lui apporte une souplesse et une efficacité améliorées, en particulier pour les applications de production d'énergie et les systèmes de propulsion à haute puissance. On utilise souvent ce genre de moteur dans les turbines éoliennes, les systèmes de propulsion ferroviaire et diverses applications industrielles qui requièrent un ajustement précis de la vitesse.

II-- Les Caractéristiques Techniques de la MADA :

- Composition et Structure :

-Stator :

- Bobinage triphasé standard.
- Raccordé directement au réseau d'électricité.
- Produit un champ magnétique en rotation.

-Rotor :

- Enroulé avec des bagues et balais (dans les versions traditionnelles, mais certaines versions modernes exploitent des systèmes sans balais).
- Alimentation par un convertisseur électronique, offrant un contrôle de la vitesse et du couple
- Convertisseur de puissance.
- Habituellement constitué d'un onduleur à double sens.
- Autorise l'ajustement de la fréquence et de la tension appliquée au rotor.
- Diminue la puissance traversant l'électronique, car seul un certain pourcentage de la puissance totale transite par le convertisseur (généralement entre 20% et 30% de la puissance nominale du moteur).



Figure II-1 : moteur asynchrone à double alimentation (DFIM).

II-3- Répartition de la puissance :

Le moteur à induction à double alimentation (DFIM - Doubly Fed Induction Motor) est élaboré pour opérer selon une distribution précise de la puissance entre le stator, le rotor et l'électronique de pilotage. Cette distribution favorise un fonctionnement à la fois efficace et adaptable, particulièrement dans les applications liées aux éoliennes et aux entraînements industriels à vitesse variable.

- Puissance du Stator :

Le stator d'un moteur asynchrone à double alimentation est directement connecté au réseau électrique et fournit une partie importante de la puissance totale du moteur. Il génère un champ magnétique tournant qui interagit avec le rotor pour produire un couple.

- Puissance active absorbée par le stator :

$$P_s = \sqrt{3} \times U_s \times I_s \times \cos(\varphi_s) , \text{ ou } U_s$$

Est la tension du stator, le courant du stator et $\cos(\varphi_s)$ le facteur de puissance.

Le stator est responsable de 70 à 80 % de la puissance totale absorbée par le moteur.

La fréquence du courant dans le stator est égale à la fréquence du réseau (50 Hz en Europe, 60 Hz aux États-Unis).

- Puissance du Rotor et Interaction avec le Réseau :

Contrairement à un moteur asynchrone classique, le rotor du DFIM est alimenté par un convertisseur de fréquence via des bagues et balais. Cela permet de contrôler la vitesse et le couple du moteur indépendamment de la fréquence du réseau.

Où :

Puissance transmise au rotor : $P_r = \sqrt{3} \times U_r \times I_r \times \cos(\varphi_r)$

Cette puissance représente 20 à 30 % de la puissance totale du moteur.

La fréquence du courant dans le rotor est variable et dépend du glissement du moteur

N_s : est la vitesse synchrone du champ statoriques,

N_r : est la vitesse réelle du rotor.

Le rotor peut fonctionner dans deux modes :

Mode moteur : Il absorbe de l'énergie du réseau et l'utilise pour entraîner une charge.

Mode générateur : Il restitue de l'énergie au réseau, ce qui est le cas dans les éoliennes où le rotor capte l'énergie du vent.

- Puissance Échangée via le Convertisseur Électronique :

L'une des caractéristiques principales du DFIM est que la puissance qui transite par le convertisseur électronique (AC/DC/AC) est bien inférieure à la puissance totale du moteur.

Le convertisseur gère environ 20 à 30 % de la puissance nominale.

Il permet une régulation fine de la vitesse et du couple en contrôlant la tension et la fréquence du rotor.

Cela réduit la taille et le coût du convertisseur par rapport à un entraînement à vitesse variable classique (où le convertisseur devrait gérer 100 % de la puissance).

- Bilan Énergétique et Efficacité :

La répartition de la puissance dans un DFIM permet une meilleure efficacité énergétique :

Le stator alimente directement la machine avec une puissance importante, minimisant les pertes dans l'électronique de commande.

Le rotor gère les variations de vitesse et le flux de puissance réversible, ce qui permet un fonctionnement à vitesse variable sans perturber le réseau électrique.

Le rendement global est optimisé, notamment en mode générateur où le moteur peut restituer de l'énergie au réseau avec un faible besoin en convertisseur.

II-4- Comportement Dynamique du Moteur Asynchrone à Double Alimentation :

Le comportement dynamique d'un moteur asynchrone à double alimentation (DFIM) est essentiel pour comprendre sa réponse aux variations de charge, de tension et de fréquence. Grâce à son double système d'alimentation, ce moteur offre une grande flexibilité en termes de contrôle de vitesse et de couple, ce qui le rend particulièrement adapté aux applications nécessitant une régulation précise, comme les éoliennes et les entraînements industriels à vitesse variable.

Lorsqu'une charge est appliquée au moteur, la vitesse du rotor subit une légère variation, contrôlée par l'ajustement du glissement via l'alimentation rotoriques. Contrairement aux moteurs asynchrones classiques, où la vitesse dépend uniquement de la fréquence du stator, le DFIM permet un réglage plus fin grâce à l'électronique de puissance qui module la tension et la fréquence appliquées au rotor. Ainsi, il peut fonctionner aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur, selon les besoins du système.¹

La stabilité du DFIM est assurée par son convertisseur de puissance, qui ajuste en permanence les paramètres électriques pour compenser les variations de charge. Si la charge augmente brusquement, le moteur réagit en augmentant son couple pour maintenir une vitesse proche du synchronisme. De même, en cas de fluctuations de la tension d'alimentation, le contrôle électronique permet de limiter l'impact sur le fonctionnement global en ajustant l'excitation rotoriques. Cette capacité d'adaptation est cruciale pour les applications où des variations de charge rapides sont fréquentes, comme dans les systèmes de production d'énergie renouvelable.

Le temps de réponse du DFIM dépend principalement de l'inertie du rotor et de la vitesse de régulation du convertisseur. Une inertie élevée ralentit les variations de vitesse, ce qui peut être bénéfique pour éviter des oscillations excessives mais peut aussi limiter la réactivité du moteur face aux changements brusques. C'est pourquoi, dans les applications nécessitant une

¹

réponse rapide, les convertisseurs sont conçus pour ajuster les paramètres électriques en quelques millisecondes afin de garantir un fonctionnement stable et efficace.

Enfin, le DFIM joue un rôle clé dans la stabilisation du réseau électrique, notamment en compensant les variations de puissance réactive. Grâce à son contrôle précis, il peut améliorer la qualité de l'énergie injectée dans le réseau en réduisant les fluctuations de tension et en maintenant un facteur de puissance optimal. Cette caractéristique est particulièrement avantageuse dans le domaine de l'éolien, où les variations de vitesse du vent influencent directement la production d'énergie.

II-5- La réponse du DFIM aux variations de charge :

Lorsque la charge mécanique appliquée au moteur varie, la vitesse du rotor s'adapte pour maintenir l'équilibre entre le couple électromagnétique développé et le couple de charge. Contrairement aux moteurs asynchrones classiques, où la vitesse varie significativement avec la charge, le DFIM bénéficie d'un contrôle électronique du rotor, permettant un ajustement plus précis.

Si la charge augmente (exemple : un système d'entraînement industriel subit une charge supplémentaire), le glissement du moteur augmente légèrement, ce qui entraîne une augmentation du couple électromagnétique pour compenser cette charge.

Si la charge diminue, le moteur réduit naturellement son glissement, ce qui améliore son efficacité en limitant les pertes énergétiques.¹

L'un des avantages majeurs du DFIM est sa capacité à maintenir une vitesse quasi constante, même lorsque la charge varie, grâce à l'alimentation rotoriques qui ajuste dynamiquement la fréquence et la tension du rotor.

II-6- La stabilité et régulation de la vitesse et du couple :

Le DFIM possède un convertisseur électronique qui modifie la tension et la fréquence appliquées au rotor, garantissant ainsi une stabilité de fonctionnement du moteur. Cette régulation permet de :

- Conserver une vitesse constante en dépit des perturbations extérieures.
- Prévenir les fluctuations de couple susceptibles d'engendrer des vibrations et une diminution d'efficacité
- Garantir un passage en douceur entre les modes moteur et générateur

En phase transitoire, le moteur peut montrer des fluctuations de vitesse suite à une modification soudaine de la charge. Cependant, en utilisant le contrôle vectoriel ou la commande directe du couple (DTC), ces oscillations sont vite atténuées, assurant ainsi un fonctionnement régulier.

II-7- Le temps de réponse et influence de l'inertie :

Le temps de réponse du DFIM face aux variations de charge et de tension est un paramètre clé qui dépend de plusieurs facteurs :

¹

- L'inertie du rotor :

Un rotor à forte inertie répondra plus progressivement aux modifications de charge, ce qui peut aider à prévenir des fluctuations soudaines de vitesse, mais pourrait également restreindre la capacité réactive du moteur.

- La vitesse de régulation du convertisseur :

Un système de contrôle plus rapide permet au moteur de s'ajuster aux fluctuations de charge sans présenter d'oscillations excessives.

L'atténuation des oscillations électromagnétiques : Le moteur se stabilise après une perturbation grâce aux pertes Joule et à l'amortissement naturel du système.

Habituellement, les DFIM contemporains adoptent des convertisseurs rapides qui peuvent modifier la tension et la fréquence rotoriques en quelques millisecondes, ce qui permet une dynamique optimisée.

II-8- Réaction aux Variations de Tension et de Fréquence :

Dans le cadre des applications industrielles et éoliennes, il est courant d'observer des fluctuations de tension et de fréquence. Le DFIM, en utilisant une alimentation rotoriques régulée, a la capacité de neutraliser ces fluctuations et de garantir un fonctionnement stable.

Si la tension d'alimentation baisse, le convertisseur amplifie l'excitation du rotor afin de contrebalancer la diminution du couple.

Si la fréquence du réseau fluctue, le DFIM modifie son décalage de manière dynamique pour rester synchronisé avec le réseau.

Cette flexibilité est un atout majeur par rapport aux moteurs asynchrones classiques, qui sont beaucoup plus sensibles aux variations du réseau.¹

II-9- Fonctionnement en Mode Générateur et Impact sur la Dynamique :

L'un des éléments essentiels du comportement dynamique du DFIM est sa faculté de transition rapide vers le mode générateur, particulièrement dans le contexte d'applications liées à l'énergie éolienne. Quand la vitesse du rotor excède la vitesse synchrone, le moteur restitue de l'énergie au réseau plutôt que d'en consommer.

Si la vitesse du vent connaît une hausse soudaine, le DFIM adapte immédiatement sa puissance délivrée au réseau en modifiant le courant rotatif.

En cas de fluctuation du réseau électrique, le moteur est capable d'apporter une compensation en puissance réactive afin de stabiliser la tension.

Ce modèle DFIM, avec sa capacité d'ajustement rapide, est parfaitement adapté aux systèmes de production d'énergie renouvelable, compte tenu des fluctuations fréquentes des conditions.

II-10- Analyse du Comportement en Fréquence :

L'analyse en fréquence, qui permet d'observer la réaction du DFIM face aux perturbations, est également un aspect essentiel pour comprendre son comportement dynamique. Globalement :

¹

À une fréquence réduite, le moteur s'adapte aisément aux changements de charge sans engendrer d'instabilité.

À une fréquence élevée, des phénomènes d'oscillation peuvent survenir, nécessitant un filtrage actif par le biais du convertisseur électronique.

L'emploi de modèles mathématiques sophistiqués (tels que la transformation de Park) offre une meilleure capacité à prévoir et maîtriser ces phénomènes.

II-11- La modélisation de la machine asynchrone à double alimentation :

Comme nous l'avons déjà observé, la machine asynchrone à double alimentation est une version traditionnelle de la machine asynchrone où le rotor et le stator sont accessibles et identiques. Ainsi, le modèle MADA est identique au modèle MAS, à l'exception des tensions rotoriques qui ne sont pas nulles. .

II-12-1-La représentation de la MADA dans le système triphasé et biphasé :

L'alternateur à double alimentation est constitué d'un stator stationnaire et d'un rotor tournant de manière cyclique. Le stator, muni de trois bobinages reliés en forme d'étoile ou de triangle et alimenté par une source de tension triphasée, produit un champ magnétique mouvant dans l'espace séparant le stator du rotor de la machine (THÉORIE DE FERRARIS). Le champ se déplace à une vitesse $\Omega_s = W_s/p$ en relation avec le stator, où W_s correspond à la fréquence angulaire du réseau d'alimentation et p désigne le nombre de paires de pôles. La machine dispose d'un rotor intégrant un enroulement triphasé, possédant autant de paires de pôles que le stator, qui est branché en arrangement étoilé.

La figure (II-2) illustre la représentation de la machine asynchrone à double alimentation dans les systèmes triphasé et biphasé.

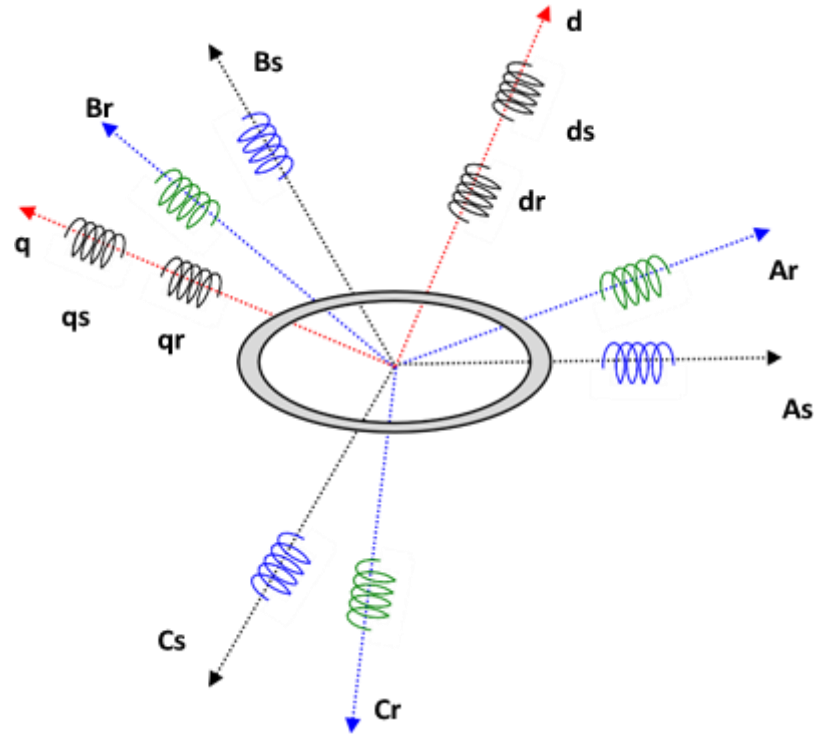


Fig II-2 : Représentation de la MADA dans le système biphasé et triphasé

- Les équations électriques de la MADA :

A partir de la loi de Faraday, on a :

$$\frac{d\Phi}{dt} = V - R \cdot i \quad (II.1)$$

On applique cette relation sur l'enroulement triphasé du stator et de rotor on trouve :

- pour le stator :

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s \cdot i_{sa} + \frac{d\Phi_{sa}}{dt} \\ V_{sb} = R_s \cdot i_{sb} + \frac{d\Phi_{sb}}{dt} \\ V_{sc} = R_s \cdot i_{sc} + \frac{d\Phi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (II.2)$$

- pour le rotor :

$$\begin{cases} V_{ra} = R_r \cdot i_{ra} + \frac{d\Phi_{ra}}{dt} \\ V_{rb} = R_r \cdot i_{rb} + \frac{d\Phi_{rb}}{dt} \\ V_{rc} = R_r \cdot i_{rc} + \frac{d\Phi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad (II.3)$$

- Les équations magnétiques sous forme matricielle :

Les équations magnétiques sont données par les expressions suivantes :

$$\begin{bmatrix} \Phi_s \\ \Phi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & M_{sr} \\ M_{sr} & l_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

Tel que :

$$[\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{sA} \\ \Phi_{sB} \\ \Phi_{sC} \end{bmatrix} ; [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{rA} \\ \Phi_{rB} \\ \Phi_{rC} \end{bmatrix}$$

$$[i_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} ; [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}$$

$$[l_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}$$

$$[l_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{rs}]^t = [M_{sr}] = M_{sr} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r \end{bmatrix}$$

Cette dernière matrice est nommée inductance mutuelle entre le rotor et le stator.

-L'équation mécanique :

$$C_e - C_r = j \frac{d\dot{\omega}_m}{dt} \square\square\dot{\omega} = \frac{1}{j} \cdot (C_e - C_r) \quad (\text{II.5})$$

Les équations différentielles décrivent le fonctionnement de cette machine sont en fonction de θ_r (système à résolution différentielles).

L'application de la transformation de Park, s'avère nécessaire, cette dernière appliquée aux courants, tensions, et aux flux pour obtenir des équations différentielles à des coefficients constants.

- Choix de référentiel :

Nous avons trois orientations possibles du repère d-q :

1- repère d-q lié au stator : $\dot{\theta}_{coord} = 0$ et $\omega_r = -\omega_m$

2- repère d-q lié au rotor : $\dot{\theta}_{coord} = \omega_m$ et $\omega_r = 0$

3- repère d-q lié au champ tournant : $\dot{\theta}_{coord} = \omega_s$ et $\omega_r = \omega_s - \omega_m$

En générale le dernier est utilisé pour réaliser le contrôle vectoriel du fait que les grandeurs de réglage deviennent continues. Le système d'axe lié au champ tournant à l'avantage qu'avec une alimentation sinusoïdale les grandeurs variables sont traitées comme des grandeurs continues,

Ainsi que ce référentiel est le seul qui n'introduit pas de simplification dans la formulation des équations, il est très intéressant dans les problèmes où la fréquence d'alimentation est constante ce qui simplifie considérablement les calculs.

En plus, le choix d'un tel référentiel approprié pour la modélisation repose sur la stratégie de commande appliquée et les grandeurs à commander.

- La transformation de PARK :

La transformation de Park consiste à appliquer aux courants, tensions, et aux flux un changement de variable faisant intervenir l'angle entre l'axe d'une phase (V_a) statoriques et le système d'axe (d-q), elle est définie par,

$$[A_P] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II.6)$$

L'angle θ dans la matrice de Park $[A_P]$ prend la valeur (θ_s) pour les grandeurs statoriques et $(\theta_s - \theta_r)$ pour les grandeurs rotoriques.

D'autre part :

$$[A_P]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II.7)$$

- Application de la transformation de PARK :

En application la transformation de Park aux équations de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère quelconque (équation (3.2), (3.3)).

Alors le modèle de la machine est obtenu en tenant compte des composantes homopolaire sous la forme suivant :

$$[A_P]^{-1} \cdot [V_{dqo}] = [R] \cdot [A_P]^{-1} \cdot [i_{dqo}] + \frac{d}{dt} [[A_P]^{-1} \cdot [\Phi_{dqo}]] \quad (\text{II.8})$$

$$[A_P] \cdot [V_{dqo}] = [R] \cdot [i_{dqo}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{dqo}] + \left[\frac{d}{dt} \cdot [A_P]^{-1} \cdot [\Phi_{dqo}] \right] \quad (\text{II.9})$$

$$[A_P] \cdot \left[\frac{d}{dt} \cdot [A_P]^{-1} \right] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \left[\frac{d\theta}{dt} \right] \quad (\text{II.10})$$

Tel que :

$\theta = \theta_s$: pour les grandeurs statoriques

$\theta = \theta_s - \theta_r$: pour les grandeurs rotoriques

En remplaçant la relation (3.10) dans (3.9) on obtient le modèle biphasé équivalent suivant :

$$\begin{cases} V_d = R \cdot i_d + \frac{d\Phi_d}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \Phi_q \\ V_q = R \cdot i_q + \frac{d\Phi_q}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \Phi_d \\ V_0 = R \cdot i_0 + \frac{d\Phi_0}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

Remarque la composante homopolaire du système (3.11) est de valeur nulle pour un système équilibré ; à partir de ce qui précède on tire les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \cdot \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \cdot \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_m) \cdot \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

L'équation (3.12) représente le modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère (d, q) lié au champ tournant.

En appliquant la transformation de Park pour établir les relations entre les flux d'axes (d, q, o) et ceux des axes (a, b, c) on obtient :

$$\begin{cases} [\Phi_{dqos}] = [A_P] \cdot [\Phi_s] \\ [\Phi_{dqor}] = [A_P] \cdot [\Phi_r] \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Au stator :

$$\begin{cases} [\Phi_{dqos}] = [A_P] \cdot [[l_s] \cdot [i_s] + [M_{sr}] \cdot [i_r]] \\ [[\Phi_{dqos}] = [[A_P] \cdot [[l_s] \cdot [A_P]^{-1} \cdot [i_{dqos}] + [A_P][M_{sr}][A_P]^{-1} \cdot [i_{dqor}]] \end{cases}$$

Après un calcul prolongé et fastidieux des équations (3.13) et (3.15), on obtient le système matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \\ \Phi_{os} \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \\ \Phi_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s - M_s & 0 & 0 & 3/2(M_{sr}) & 0 & 0 \\ 0 & l_s - M_s & 0 & 0 & 3/2(M_{sr}) & 0 \\ 0 & 0 & l + 2M_s & 0 & 0 & 0 \\ 3/2(M_{sr}) & 0 & 0 & l_r - M_r & 0 & 0 \\ 0 & 3/2(M_{sr}) & 0 & 0 & l_r - M_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & l_r + 2M_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{os} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{or} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Ou :

$L_s = l_s - M_s$: inductance cyclique statoriques.

$L_r = l_r - M_r$: inductance cyclique rotoriques.

$L_m = 3/2 M_{sr}$: inductance mutuelle cyclique entre l'enroulement du stator et celui du rotor.

$L_{os} = l_s + 2M_s$: inductance homopolaire statorique.

$L_{or} = l_r + 2M_r$: inductance homopolaire rotoriques.

Si on élimine la composante homopolaire du système (3.16) on obtient :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & 0 & l_m & 0 \\ 0 & l_s & 0 & l_m \\ l_m & 0 & l_r & 0 \\ 0 & l_m & 0 & l_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (II.17)$$

II-13- Représentation du modèle de la MADA sous forme d'état :

Dans ce cas, nous considérons les flux rotoriques (Φ_{dr}, Φ_{qr}) et les courants statoriques (i_{ds}, i_{qs}) comme variable d'état, et les tensions ($V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr}$) comme variables de commande, on a donc :

$$\dot{X} = AX + BU$$

Avec :

$$X = (i_{ds}, i_{qs} ; \Phi_{dr}, \Phi_{qr})$$

Chapitre II : Caractéristiques Techniques du Machine Asynchrone à Double Alimentation

$$U = (V_{ds}, V_{qr} ; V_{dr}, V_{qr})$$

D'après l'équation (3.17) nous avons :

$$\begin{cases} i_{dr} = \frac{1}{L_r} \Phi_{dr} - \frac{L_m}{L_r} i_{ds} \\ i_{qr} = \frac{1}{L_r} \Phi_{qr} - \frac{L_m}{L_r} i_{qs} \end{cases} \quad (II.18)$$

En remplaçant les équations (II.17) et (II.18) dans l'équation (II.12) et après le calcul et la simplification nous aurons :

$$\begin{cases} V_{ds} = i_{ds} \cdot R_s + \left(l_s - \frac{l_m^2}{l_r} \right) \cdot \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_s \left(l_s - \frac{l_m^2}{l_r} \right) \cdot i_{qs} - \omega_s \frac{L_m}{L_r} \Phi_{qr} + \frac{L_m}{L_r} \cdot \frac{d\Phi_{dr}}{dt} \\ V_{qs} = R_r \cdot i_{qs} + \left(l_s - \frac{l_m^2}{l_r} \right) \cdot i_{qs} + \omega_s \left(L - \frac{l_m^2}{l_r} \right) \cdot i_{ds} + \omega_s \frac{L_m}{L_r} \Phi_{dr} + \frac{L_m}{L_r} \cdot \frac{d\Phi_{qr}}{dt} \\ V_{dr} = R_r \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot i_{ds} + \frac{R_r}{L_r} \cdot \Phi_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot i_{qs} + \frac{R_r}{L_r} \cdot \Phi_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (II.19)$$

On pose :

$$\sigma = L_s (1 - (L^2 / L_s L_r))$$

$$T_s = L_s / R_s$$

$$T_r = L_r / R_r$$

En remplaçant σ , T_s , T_r , dans le système d'équation (19) on obtient :

$$\begin{cases} \frac{di_{ds}}{dt} = - \left[\frac{R_s}{\sigma} + \frac{L_m^2}{L_r T_r \sigma} \right] i_{ds} + \omega_s \cdot i_{qs} + \left[\frac{L_m}{L_r T_r \sigma} \right] \Phi_{dr} + \left[\frac{L_m}{L_r \sigma} \right] \cdot \omega_m \cdot \Phi_{qr} + \frac{1}{\sigma} \cdot V_{ds} - \left[\frac{L_m}{L_r \sigma} \right] \cdot V_{dr} \\ \frac{di_{qs}}{dt} = - \omega_s \cdot i_{qs} - \left[\frac{R_s}{\sigma} + \frac{L_m^2}{L_r T_r \sigma} \right] i_{qs} - \left[\frac{L_m}{L_r \sigma} \right] \omega_m \cdot \Phi_{qr} + \left[\frac{L_m}{L_r T_r \sigma} \right] \cdot \Phi_{qr} + \frac{1}{\sigma} \cdot V_{qs} - \left[\frac{L_m}{L_r \sigma} \right] \cdot V_{qr} \\ \frac{d\Phi_{dr}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} \cdot i_{ds} - \frac{1}{T_r} \cdot \Phi_{dr} + (\omega_s - \omega) \Phi_{qr} + V_{dr} \\ \frac{d\Phi_{qr}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} \cdot i_{qs} - (\omega_s - \omega) \Phi_{qr} - \frac{1}{T_r} \cdot \Phi_{dr} + V_{qr} \end{cases} \quad (II.20)$$

Le système d'équations (II.20) sous forme matricielle est donné par :

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{ds}}{dt} \\ \frac{di_{qs}}{dt} \\ \frac{d\Phi_{dr}}{dt} \\ \frac{d\Phi_{qr}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left[\frac{R_s}{\sigma} + \frac{L_m^2}{L_r \cdot T_r \cdot \sigma}\right] & \omega_s & \frac{L_m}{L_r \cdot T_r \cdot \sigma} & \omega_m \cdot \frac{L_m}{L_r \cdot \sigma} \\ -\omega_s & -\left[\frac{R_s}{\sigma} + \frac{L_m^2}{L_r \cdot T_r \cdot \sigma}\right] & -\omega_m \cdot \frac{L_m}{L_r \cdot \sigma} & \frac{L_m}{L_r \cdot T_r \cdot \sigma} \\ \frac{L_m}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & \omega_s - \omega_m \\ 0 & \frac{L_m}{T_r} & -(\omega_s - \omega_m) & \frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{os} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \\
 + \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma} & 0 & \frac{L_m}{L_r \cdot \sigma_r} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma} & 0 & -\frac{L_m}{L_r \cdot \sigma_r} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix}$$

- Expression du couple :

On a : $P_a = V_{ds} \cdot i_{ds} + V_{qs} \cdot i_{qs}$

En remplaçant la tension par leur valeurs, on obtient :

$$P_a = R_s \cdot i_{ds}^2 + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} \cdot i_{ds} - \omega_s \cdot \Phi_{qs} \cdot i_{ds} + R_s \cdot i_{qs}^2 + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} \cdot i_{qs} + \omega_s \cdot \Phi_{ds} \cdot i_{qs} \quad (II.21)$$

$$P_a = R_s(i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + \left(\frac{d\Phi_{ds}}{dt} \cdot i_{ds} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} \cdot i_{qs}\right) + \omega_s \cdot (\Phi_{ds} \cdot i_{qs} + \Phi_{qs} \cdot i_{ds})$$

$$P_a = P_j + P_r + P_{el}$$

□

$$\begin{cases} P_j = R_s(i_{ds}^2 + i_{qs}^2) \\ P_r = \frac{d\Phi_{ds}}{dt} \cdot i_{ds} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} \cdot i_{qs} \\ P_{el} = \omega_s \cdot (\Phi_{ds} \cdot i_{qs} + \Phi_{qs} \cdot i_{ds}) \end{cases}$$

(II.22)

A partir de la relation qui donne l'énergie électromagnétique en fonction du couple :

$$P_{el} = \omega_s \cdot C_e \quad (II.23)$$

On distingue l'expression du couple :

$$C_e = np \cdot (\phi_{dr} \cdot i_{qs} - \Phi_{qr} \cdot i_{ds}) \quad (II.24)$$

En plus, on peut écrire l'expression du couple en fonction des courants statoriques et les flux rotoriques comme suit :

$$C_e = np \cdot \frac{L_m}{L_r} (\Phi_{dr} \cdot i_{qs} - \Phi_{qr} \cdot i_{ds}) \quad (II.25)$$

Donc l'équation mécanique devient :

$$\dot{\omega}_m = \frac{1}{J} \cdot [np \cdot \frac{L_m}{L_r} (\Phi_{dr} \cdot i_{qs} - \Phi_{qr} \cdot i_{ds}) - C_r] \quad (II.26)$$

- Expressions des Puissances Active et réactive :

Les expressions des puissances active et réactive sont données par :

$$P_s = \frac{3}{2} \cdot (v_{sd} \cdot i_{sd} - v_{sq} \cdot i_{sq}) \quad (II.27)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} \cdot (v_{sq} \cdot i_{sd} - v_{sd} \cdot i_{sq})$$

II-14- Commande d'une éolienne à la base de MADA à vitesse variable :

La commande de la génératrice asynchrone à double alimentation est basée sur trois fonctions :

- 1- l'algorithme d'extraction du maximum de puissance (M.P.P.T).
- 2- la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation.
- 3- le contrôle du convertisseur MLI.

II-15- Commande vectorielle de la MADA :

"La commande à flux oriente" appliquée aux moteurs électriques est utilisée pour obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants.

De nombreuses variantes de ce principe de commande ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer suivant l'orientation du repère (d-q) sur :

- le flux rotoriques.
- le flux statoriques.
- le flux d'entrefer.

Suivant la détermination de la position du flux :

- Directe par mesure ou observation du vecteur flux (module, phase)
- Indirecte par contrôle de la fréquence du glissement.

Dans le cadre de cette mémoire, nous utilisons la commande vectorielle de la génératrice asynchrone à double alimentation avec orientation du repère (d-q) suivant le flux statoriques. Cette dernière se décompose en trois parties :

- le contrôle du flux.
- le contrôle des courants statoriques.
- le découplage ou compensation.

II-16-Modèle de la MADA avec orientation du flux statoriques :

La Commande par orientation du flux consiste à régler le flux par une composante du courant et le couple par une autre composante. Pour cela, il faut choisir un système d'axe d-q et une loi de commande assurant le découplage du couple et du flux.

Or, le couple est donné par : $C_e = np \cdot \frac{L_m}{L_r} (\Phi_{dr} \cdot i_{qs} - \Phi_{qr} \cdot i_{ds})$

Pour simplifier la commande il est nécessaire de faire un choix judicieux de référentiel. Pour cela, on se place dans un référentiel d-q lié au champ tournant avec une orientation du flux statoriques (l'axe d aligné avec la direction du flux statoriques) comme le montre la Fig.3.2.7

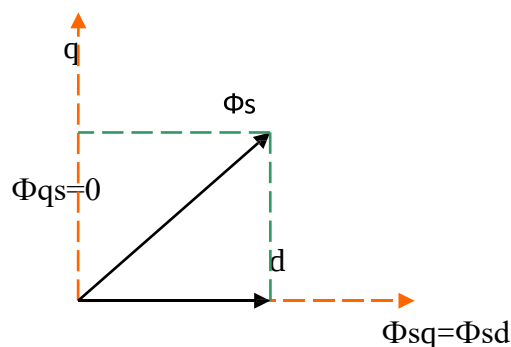


Fig II-3 : Orientation de flux statoriques

La particularité de la MADA est qu'elle possède deux courants à contrôler directement à savoir i_{rq} , i_{sq} , et deux courants contrôlés indirectement I_{qr} , i_{qs} .

On rappelle d'abord le système d'équations différentielles de la machine :

Chapitre II : Caractéristiques Techniques du Machine Asynchrone à Double Alimentation

$$\frac{d\Phi_{ds}}{dt} = V_{ds} \cdot R_s \cdot i_{ds} + \Phi_{qs} \cdot \omega_s \quad (II.28)$$

$$\frac{d\Phi_{qs}}{dt} = V_{qs} - R_s \cdot i_{qs} - \Phi_{ds} \cdot \omega_s \quad (II.29)$$

$$\frac{d\Phi_{dr}}{dt} = V_{dr} - R_r \cdot i_{dr} + \omega_r \cdot \Phi_{qr} \quad (II.30)$$

$$\frac{d\Phi_{qr}}{dt} = V_{qr} - R_r \cdot i_{qr} - \omega_r \cdot \Phi_{dr} \quad (II.31)$$

En orientant un des flux, le modèle obtenu de la MADA se simplifie et le dispositif de commande qui en résulte l'est également. Un contrôle vectoriel de cette machine a été conçu en orientant le repère de Park pour que le flux statoriques suivant l'axe q soit constamment nul :

$$\Phi_{sq} = 0. [4]$$

Une simplification des équations de la machine asynchrone (au stator et rotor) est obtenue en supposant les composantes homopolaires nulles :

$$\frac{d\Phi_{ds}}{dt} = V_{ds} - R_s \cdot i_{ds} \quad (II.32)$$

$$V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \omega_s \cdot \Phi_{ds} \quad (II.33)$$

$$\frac{d\Phi_{dr}}{dt} = V_{dr} - R_r \cdot i_{dr} + \omega_r \cdot \Phi_{qr} \quad (II.34)$$

$$\frac{d\Phi_{qr}}{dt} = V_{qr} - R_r \cdot i_{qr} - \omega_r \cdot \Phi_{dr} \quad (II.35)$$

A partir des équations des composantes directes et quadrature du flux statoriques (relations.3.18), on obtient les expressions suivantes des courants statoriques :

$$i_{qs} = -\frac{L_m}{L_s} \cdot i_{qr} \quad (II.36)$$

$$i_{ds} = \frac{\Phi_{ds} - L_m \cdot i_{dr}}{L_s} \quad (II.37)$$

Ces courants statoriques sont remplacés dans les équations des composantes directes et quadrature des flux rotoriques (équation 3.17) :

$$\Phi_{dr} = (L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) \cdot i_{dr} + \frac{L_m}{L_s} \cdot \Phi_{ds} = L_r \cdot \sigma \cdot i_{dr} + \frac{L_m}{L_s} \cdot \Phi_{ds} \quad (II.38)$$

Chapitre II : Caractéristiques Techniques du Machine Asynchrone à Double Alimentation

$$\Phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} - \frac{L_m^2}{L_s} \cdot i_{qr} = L_r \cdot \sigma \cdot i_{qr} \quad (\text{II.39})$$

σ est le coefficient de dispersion entre les enroulements d et q :

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s \cdot L_r}$$

En remplaçant les expressions des composantes directes et quadrature des courants statoriques (3.36 et 3.37) dans les équations (3.32 et 3.33), puis les expressions des composantes directes et quadrature des flux rotoriques (3.38 et 3.39) dans les équations (3.34 et 3.35), on obtient :

$$V_{ds} = \frac{R_s}{L_s} \cdot \Phi_{ds} - \frac{R_s}{L_s} \cdot L_m \cdot i_{dr} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} \quad (\text{II.40})$$

$$V_{qs} = -\frac{R_s}{L_s} \cdot L_m \cdot i_{qr} + \omega_s \cdot \Phi_{ds} \quad (\text{II.41})$$

$$V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + L_r \cdot \sigma \cdot \frac{di_{dr}}{dt} + \frac{L_m}{L_s} \cdot \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - L_r \cdot \omega_r \cdot \sigma \cdot i_{qr} \quad (\text{II.42})$$

$$V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + L_r \cdot \sigma \cdot \frac{di_{qr}}{dt} + L_r \cdot \sigma \cdot \omega_r \cdot i_{dr} + \omega_r \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot \Phi_{ds} \quad (\text{II.43})$$

Les équations rotoriques (3.30 et 3.31) permettent de déterminer les courants rotoriques :

$$\frac{di_{dr}}{dt} = \frac{1}{L_r \cdot \sigma} (V_{dr} - R_r \cdot i_{dr} + \omega_r \cdot L_r \cdot \sigma \cdot i_{qr} - \frac{L_m}{L_s} \cdot \frac{d\Phi_{ds}}{dt}) \quad (\text{II.44})$$

$$\frac{di_{qr}}{dt} = \frac{1}{L_r \cdot \sigma} (V_{qr} - R_r \cdot i_{qr} - \omega_r \cdot L_r \cdot \sigma \cdot i_{dr} - \omega_r \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot \Phi_{ds}) \quad (\text{II.45})$$

En notant les f.é.m. suivantes :

$$e_d = -L_r \cdot \omega_r \cdot \sigma \cdot i_{qr} + \frac{L_m}{L_s} \cdot \frac{d\Phi_{ds}}{dt} \quad (\text{Med})$$

$$e_\Phi = \omega_r \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot \Phi_{ds} \quad (\text{Me}\Phi)$$

$$e_q = L_r \cdot \omega_r \cdot \sigma \cdot i_{dr} \quad (\text{Meq})$$

On obtient,

$$\frac{di_{dr}}{dt} = \frac{1}{L_r \cdot \sigma} (V_{dr} - R_r \cdot i_{dr} - e_d) \quad (\text{II.46})$$

$$\frac{di_{qr}}{dt} = \frac{1}{L_r \cdot \sigma} (V_{qr} - R_r \cdot i_{qr} - e_q - e_\Phi) \quad (\text{II.47})$$

Le couple a pour expression

$$C_{em} = P \cdot (\Phi_{ds} \cdot i_{qs} - \Phi_{qs} \cdot i_{ds}) \quad (\text{II.48})$$

Chapitre II : Caractéristiques Techniques du Machine Asynchrone à Double Alimentation

Avec une orientation du flux statoriques et elle que $\Phi_{qs} = 0$, on obtient une expression simplifiée

$$C_{em} = P \cdot \Phi_{ds} \cdot i_{qr} \quad (II.49)$$

Le courant i_{qs} ne pouvant être directement contrôlé, en utilisant l'équation (4.24), on fait apparaître la composante en quadrature du courant rotoriques dans l'expression du couple électromagnétique :

$$C_{em} = -P \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot \Phi_{ds} \cdot i_{qr}$$

- **Turbine pompée réversible :**

- Puissance hydraulique : $P_\omega = \rho g Q H$

- Puissance mécanique : $P_T = \eta P_\omega = \eta \rho g Q H$

- Équation de mouvement : $J \frac{d\Omega}{dt} = T P_T - T_{em}$

II-17- Équations du modèle DFIG :

- **Équations de tension dans le système de coordonnées dq :**

Les équations de tension DFIG dans le référentiel tournant dq sont données par :

- **Équations de tension du stator :**

- $U_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_s \psi_{sq}$
- $U_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} - \omega_s \psi_{sd}$

- **Équations de tension du rotor :**

- $U_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{rq}$
- $U_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{rd}$

- **Équations de liaison de flux :**

Les liaisons de flux dans les enroulements du stator et du rotor sont liées aux courants et aux inductances :

- **Liaisons de flux de stator :**

- $\psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd}$

- $\psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq}$

- **Liaisons de flux du rotor :**

- $\psi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd}$

- $\psi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq}$

Où :

- U_{sd}, U_{sq} sont les composantes d et q de la tension statorique.
- U_{rd}, U_{rq} sont les composantes d et q de la tension du rotor.
- i_{sd}, i_{sq} sont les composantes d et q du courant statorique.
- i_{rd}, i_{rq} sont les composantes d et q du courant du rotor.
- ψ_{sd}, ψ_{sq} sont les composantes d et q de la liaison de flux statoriques.
- ψ_{rd}, ψ_{rq} sont les composantes d et q de la liaison de flux du rotor.
- R_s, R_r sont les résistances statoriques et rotoriques.
- ω_s , est la vitesse synchrone.
- ω_r , est la vitesse du rotor.

Où :

- L_s est l'auto-inductance du stator.
- L_r est l'auto-inductance du rotor.
- L_m est l'inductance mutuelle entre les enroulements du stator et du rotor.

- **Équations simplifiées :**

Pour un contrôle et une analyse simplifiés, ces équations peuvent être combinées et manipulées pour exprimer le modèle DFIG en termes de courants et de tensions du rotor et du stator :

- **Équations de tension du stator :**

- $U_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} (L_s i_{sd} + L_m i_{rd}) - \omega_s (L_s i_{sq} + L_m i_{rq})$

- $U_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} (L_s i_{sq} + L_m i_{rq}) + \omega_s (L_s i_{sd} + L_m i_{rd})$

A decorative graphic consisting of a light gray rectangular area with rounded corners, a blue border, and a vertical scroll-like element on the left side. The text is centered within this graphic.

Chapitre III :
Utilisation du la Machine Asynchrone à
Double Alimentation dans les Mini-
Centrales Hydro-électriques

III-1-Introduction :

Les microcentrales hydroélectriques sont des dispositifs de production d'énergie de faible capacité (habituellement moins de 10 MW) qui tirent parti du pouvoir de l'eau pour générer de l'électricité. On les utilise fréquemment dans des régions éloignées ou comme sources d'énergie renouvelable reliées à un réseau électrique plus étendu.

L'utilisation d'un moteur asynchrone à double alimentation (DFIM) s'avère particulièrement appropriée pour ces centrales. Elle offre une production d'énergie flexible et performante, s'adaptant mieux aux fluctuations du débit d'eau tout en facilitant la connexion au réseau électrique.⁹

III-2- Définition d'une petite centrale hydraulique :

Il s'agit d'une station de production d'énergie électrique où l'eau, acheminée par des canaux à écoulement libre ou par des conduites sous pression, est utilisée pour faire tourner les turboalternateurs avant de revenir à son cours d'origine. Il s'agit d'une source d'énergie renouvelable, propre et sans pollution.

Une centrale hydroélectrique convertit l'énergie naturelle d'une chute d'eau en énergie mécanique via une turbine, puis en énergie électrique par le biais d'un générateur.

La petite hydroélectricité (PHE) se distingue par des systèmes de production capables de générer une puissance électrique de quelques kilowatts jusqu'à plusieurs mégawatts (maximum 10 MW), à partir de chutes d'eau variant de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres. On distingue trois catégories de turbines : les turbines Kaplan pour les petites chutes (5-10 m), les Francis pour les chutes intermédiaires (10-100 m) et enfin les Francis et Pelton pour les grandes chutes (50 à 400m).

Les centrales de basse chute sont des installations qui consistent en un seuil déviant l'eau dans un canal d'amenée, conduisant cette dernière vers la centrale. L'eau est restituée en aval via le canal de fuite qui se connecte au cours d'eau dérivé. Les centrales de haute chute possèdent une prise d'eau en montagne ainsi qu'une conduite forcée qui dirige l'eau vers la centrale pour ensuite la renvoyer.

III-3- Classification d'une petite centrale hydroélectrique :

Une petite centrale hydroélectrique est un système de génération d'énergie électrique fondé sur la transformation de l'énergie hydraulique, généralement issue :

- d'une rivière ou d'un fleuve.
- d'un barrage destiné à l'irrigation.
- du réseau fournissant de l'eau potable.
- du système d'évacuation des eaux usées ou de drainage.

Des procédés industriels où la pression d'un liquide est diminuée dans un organe de contrôle, une vanne ou autre...

L'importance des petites centrales hydrauliques est principalement perceptible à un niveau local (régional), avec plusieurs usages qui en découlent :

- Elles peuvent être incorporées dans des projets multifonctionnels et contribuer à l'amélioration de la couverture des coûts grâce à la génération d'énergie.
- **Par exemple** : dans le cadre d'une rénovation ou construction d'un réseau d'alimentation en eau potable.
- Grâce à l'idée des micro-réseaux et de la production d'énergie distribuée (GED), les petites installations hydrauliques, avec leur presque constante production d'énergie, peuvent avoir un impact significatif en tant que régulateurs ou sources de secours.
- Elles favorisent l'intégration de sources d'énergie renouvelable intermittentes (comme l'éolien et le solaire) dans des zones isolées en atténuant leur nature intermittente.
- Elles renforcent la sûreté d'approvisionnement pour certaines sociétés.

La classification se fait en fonction de la façon dont l'eau est recueillie et acheminée vers la turbine, de la position de cette dernière et de la hauteur ou dénivelé exploité.

On identifie deux catégories majeures de petites centrales :

-Implantations à faible pression : le long d'un cours d'eau ou dans un canal de déviation. Le barrage, ou prise d'eau, généralement édifié en béton, est l'élément le plus crucial. Son rôle consiste à rediriger le débit requis directement vers la turbine ou dans un canal de déviation, tout en permettant le passage des inondations. Soit la centrale est directement intégrée au barrage, soit elle est positionnée à l'extrémité d'un canal.

-Mise en place de systèmes à pression moyenne et élevée : sur des cours d'eau, des sources de montagne, des réseaux d'eau potable et dans des circuits hydraulique industriels. En plus des composants indiqués pour la première catégorie, on trouve une conduite forcée.¹⁰

III-4 -Les avantages d'une petite hydraulique :

Plutôt que de recourir à d'énormes barrages hydroélectriques, le petit hydraulique utilise des équipements de dimensions réduites, généralement en chaîne. Un dimensionnement optimal pour une gestion locale de cette source d'énergie renouvelable.

Voici les bénéfices majeurs en termes d'énergie et d'environnement associés à cette source d'énergie :

- Il s'agit d'une ressource qui se renouvelle. En effet, l'eau employée est entièrement restituée.
- Il s'agit d'un atout local, et par conséquent crucial pour les enjeux de souveraineté énergétique.
- Elle ne produit généralement pas de gaz à effet de serre (GES) pendant sa phase d'opération. Cela reste toujours valable pour les livres « au fil de l'eau » (sans entreposage), qui suscitent une attention particulière.
- Elle ne présente pas de caractère intermittent à court terme, contrairement à l'énergie solaire et éolienne. Il est évident que la production d'hydroélectricité fluctue en fonction des cycles saisonniers, les débits des rivières pouvant être réduits en été ou, à l'inverse, augmentés par la fonte des glaciers.

- Les appareils ou équipements sont solides, éprouvés dans l'utilisation, faciles à exploiter et ont une longue durée de vie.

III-5-La principe de fonctionnement du DFIM dans une Mini-Centrale Hydroélectrique :

Le moteur asynchrone à double alimentation (DFIM) fonctionne en mode générateur dans une mini-centrale hydroélectrique. Il convertit l'énergie mécanique fournie par une turbine hydraulique en énergie électrique injectée dans le réseau. Les critères de sélection des DFIM (Doubles Fed Induction Machines), ou machines asynchrones à double alimentation, pour les applications mini-hydroélectriques reposant sur plusieurs aspects techniques et opérationnels, notamment les puissances nominales, les systèmes de contrôle et l'adaptation aux débits d'eau variables. Voici une description détaillée :

- Puissances nominales :

-Plage de puissance : Les DFIM sont généralement utilisées dans les mini-centrales hydroélectriques pour des puissances allant de 100 kW à plusieurs MW (typiquement jusqu'à 10 MW pour les applications mini-hydro). La puissance nominale doit correspondre à la capacité de la turbine et au débit nominal du site.

-Efficacité : Les DFIM offrent un bon rendement (souvent > 90 %) dans une plage de fonctionnement large, ce qui est idéal pour les mini-hydroélectriques où les conditions varient.

-Taille et coût : La sélection doit équilibrer la puissance avec les contraintes de coût et d'espace. Les DFIM sont souvent privilégiées pour leur coût modéré par rapport aux machines synchrones pour des puissances similaires.

III-6- Les Systèmes de contrôle :

-La Convertisseur côté rotor :

Les DFIM utilisent un convertisseur électronique de puissance connecté au rotor (via des bagues collectrices), permettant de contrôler la vitesse et la puissance. Ce convertisseur doit être dimensionné pour gérer environ 20-30 % de la puissance nominale, ce qui réduit les coûts par rapport à un convertisseur pleine puissance.

-Contrôle vectoriel :

Un système de contrôle vectoriel est essentiel pour régler la puissance active (liée au couple) et réactive (liée au flux magnétique), assurant une intégration stable au réseau électrique.

-La Synchronisation au réseau :

Le système de contrôle doit garantir une synchronisation précise avec la fréquence et la tension du réseau (50 ou 60 Hz), avec une gestion des variations de vitesse de ± 10 à 30 % autour de la vitesse synchrone.

-La Protection et robustesse :

Les systèmes doivent inclure des protections contre les surtensions, surintensités et déséquilibres, ainsi qu'une capacité à fonctionner en conditions de faible charge ou de variations rapides.

III-7- L'adaptation aux débits d'eau variables :

- **Variation de vitesse :** Les DFIM sont idéales pour les sites avec des débits variables (saisonniers ou journaliers), car elles permettent un fonctionnement à vitesse variable. Cela optimise l'efficacité de la turbine (par exemple, turbines Kaplan ou Pelton) en ajustant la vitesse au débit disponible.

- **Plage de fonctionnement :** Les DFIM peuvent fonctionner efficacement dans une plage de vitesse de 70 à 130 % de la vitesse synchrone, ce qui est crucial pour maximiser la production énergétique sous des débits fluctuants.

- **Réglage dynamique :** Le contrôle du convertisseur permet un réglage rapide de la puissance engendrant en réponse aux variations de débit, entraînant les pertes d'efficacité ou les arrêts intempestifs.

-Compatibilité avec la turbine hydraulique :

La DFIM doit être couplée à une turbine adaptée au débit et à la hauteur de chute du site (par exemple, turbines à réaction pour les basses chutes et débits élevés, ou turbines à action pour les hautes chutes et faibles débits).

Considérations supplémentaires

-Maintenance :

Les DFIM ont nécessité un entretien des bagues collectrices et du convertisseur, mais leur robustesse et leur simplicité mécanique les rendus adaptés aux sites isolés.

-Conditions environnementales :

Les DFIM doivent être protégées contre l'humidité et les variations de température, fréquentes dans les environnements hydroélectriques.

Normes et intégration :

La machine doit respecter les normes électriques locales (IEC, IEEE) et être compatible avec les exigences du réseau (stabilité, qualité de l'énergie).

III-8- La composition du système :

-Turbine hydraulique :

Transforme l'énergie cinétique de l'eau en énergie mécanique (exemples : turbines Kaplan, Pelton, Francis selon le débit et la hauteur de chute).

- Arbre de transmission :

Relie la turbine au moteur DFIM pour transmettre la puissance mécanique.

- Moteur asynchrone à double alimentation (DFIM) :

Joue le rôle de générateur en convertissant la puissance mécanique en puissance électrique.

- **Convertisseur de puissance** : Alimente le rotor du DFIM pour ajuster la vitesse et optimiser la production.

- **Transformateur et réseau électrique** : Acheminent l'électricité vers les consommateurs ou le réseau national.

III-9- Le mode de fonctionnement du DFIM :

Le stator est directement relié au réseau, ce qui offre la possibilité de délivrer de l'énergie avec un facteur de puissance maîtrisé.

Le rotor est relié à un convertisseur électronique qui modifie la fréquence et la tension afin de garantir un contrôle précis de la puissance produite.

Cette configuration permet au DFIM de fonctionner à une vitesse variable, contrairement aux générateurs synchrones qui exigent une vitesse stable pour maintenir leur synchronisation avec le réseau.

III-10- Les avantages du DFIM pour les Mini-Centrales Hydroélectriques :

-La régulation de la Vitesse et Adaptation aux Débits Variables :

L'un des problèmes principaux auxquels sont confrontées les mini-centrales hydroélectriques est la fluctuation naturelle du flux d'eau au cours des saisons. À l'inverse des générateurs synchrones qui exigent un taux de rotation stable, le DFIM est capable de moduler sa vitesse de rotation en fonction du flux disponible, assurant ainsi une génération d'énergie maximisée.

-La meilleure injection d'énergie dans le réseau :

Le DFIM assure une régulation dynamique de la puissance réactive, contribuant ainsi à la stabilisation de la tension du réseau et à l'évitement des variations. Cette fonction est vitale pour prévenir les pics de tension et garantir une qualité optimale de l'énergie.

-L'efficacité énergétique et réduction des pertes :

Le DFIM, grâce à son fonctionnement à vitesse variable et sa connexion rotoriques régulée, minimise les pertes d'énergie, surtout lors des périodes de faible charge. Sa performance globale est généralement meilleure que celle des générateurs asynchrones traditionnels.

-La réduction des contraintes mécaniques et maintenance facilitée :

L'opération à vitesse variable contribue à diminuer les tensions mécaniques sur le système complet (turbine, arbre de transmission, générateur), ce qui prolonge la longévité des matériels et réduit les dépenses d'entretien.

-L'intégration facile aux réseaux isolés ou faiblement maillés :

Dans des zones éloignées, on recourt à des petites centrales hydroélectriques pour fournir de l'énergie à des réseaux déconnectés. Le DFIM autorise un contrôle indépendant de la fréquence et de la tension, élément essentiel pour garantir une opération stable sans liaison à un réseau national.

III-11- La fonction du moteur dans la transformation de l'énergie hydraulique :

Dans un système hydraulique, le moteur hydraulique est un élément essentiel qui permet de convertir l'énergie hydraulique en énergie mécanique utilisable. Ce mécanisme fonctionne grâce à l'emploi d'un liquide pressurisé, habituellement de l'huile hydraulique, qui est transporté par une pompe et orienté vers le moteur pour produire un mouvement mécanique. Selon le type de moteur employé, ce mouvement peut être de nature rotative ou linéaire.

La transformation de l'énergie hydraulique en énergie mécanique se base sur un concept **basique** : une pression exercée par un fluide génère une force sur les éléments internes du moteur, produisant ainsi un couple qui provoque la rotation de l'arbre du moteur ou un mouvement alternatif en fonction du mécanisme interne du moteur. Dans un système hydraulique, l'énergie est initialement générée par une pompe qui prélève le fluide d'un réservoir et le met sous pression. Ce fluide comprimé est par la suite dirigé vers le moteur hydraulique grâce à un système de tuyaux et de vannes. Une fois intégrée au moteur, la pression du fluide se convertit en une force mécanique.

On compte plusieurs variétés de moteurs hydrauliques, chacun avec un mode de fonctionnement distinct. Par exemple, les dispositifs à engrenages sont composés de deux engrenages qui, grâce à la pression du fluide, déclenchent une rotation générant un mouvement continu. Les moteurs à palettes sont dotés d'un rotor qui possède des palettes glissantes. Ces dernières sont déplacées par la pression du fluide, ce qui provoque la rotation du rotor. En ce qui concerne les moteurs à pistons, leur fonctionnement repose sur un groupe de pistons qui se déplacent grâce à la pression, produisant une force responsable d'un mouvement linéaire ou rotatif. L'atout majeur d'un moteur hydraulique est sa capacité à délivrer un couple important même à basse vitesse, contrairement aux moteurs électriques qui ont généralement besoin d'un réducteur de vitesse pour atteindre un couple comparable. Par ailleurs, on peut gérer la puissance d'un moteur hydraulique en modulant le flux du fluide, ce qui offre la possibilité de changer la vitesse de rotation ou l'intensité de la force appliquée selon les exigences spécifiques de l'application. Dans les machines industrielles et les engins de construction, cette capacité d'adaptation est fondamentale, car les besoins en termes de puissance et de vitesse peuvent fluctuer selon les circonstances de travail. De plus, pour une même puissance, les moteurs hydrauliques ont tendance à être plus compacts et moins lourds que leurs homologues électriques, ce qui leur permet d'être intégrés dans des espaces restreints. Parmi les autres atouts des moteurs hydrauliques, on note leur solidité et leur aptitude à opérer dans des conditions environnementales éprouvantes.¹¹

III-12- Les avantages pour la production d'électricité :

L'hydroélectricité se base sur l'exploitation des moteurs hydrauliques pour transformer l'énergie potentielle de l'eau en énergie mécanique, qui sera par la suite convertie en électricité grâce à un générateur. Ce processus débute par la collecte d'eau dans un réservoir, habituellement localisé derrière un barrage, où cette eau gagne une énergie potentielle gravitationnelle. Quand l'eau est libérée via un conduit pressurisé, elle se convertit en énergie cinétique, provoquant la rotation d'une turbine hydraulique. Celle-ci entraîne un générateur qui produit de l'électricité. On utilise divers types de turbines en fonction de la hauteur de chute et du débit d'eau : les turbines Francis, adaptées aux chutes de hauteur moyenne, sont les plus répandues ; tandis que les turbines Kaplan sont destinées aux chutes de faible hauteur.

Tandis que les turbines Pelton sont optimales pour les grandes hauteurs avec un fort potentiel énergétique. Il existe de multiples atouts à l'hydroélectricité.

C'est une énergie renouvelable et non polluante, dont l'efficacité peut excéder 80%, largement au-dessus de celle des centrales à combustibles fossiles. Elle assure une production constante et fiable, contrairement aux sources d'énergie intermittentes telles que l'éolien ou le solaire. De plus, elle offre la possibilité de stocker l'énergie via les centrales à pompage-turbinage, qui élève l'eau lors des périodes de faible consommation pour la redescendre et l'utiliser plus tard. Par ailleurs, l'existence prolongée des installations hydroélectriques, qui dépasse fréquemment 50 ans, en fait un placement à la fois pérenne et profitable.

Toutefois, cette technologie présente également des désavantages, en particulier une empreinte environnementale significative. La réalisation de barrages peut affecter le flux des rivières, troubler les écosystèmes aquatiques et entraver la migration de certaines espèces piscicoles, même si des dispositifs tels que les passes à poissons sont instaurés pour résoudre ce problème. Par ailleurs, l'édification de grands barrages peut occasionnellement l'inondation de vastes zones, ce qui conduit au relogement de résidents locaux et à la disparition de terres cultivables. La construction de ces infrastructures nécessite un investissement initial conséquent, cependant leur rentabilité sur le long terme est garantie. Pour conclure, les installations de pompage-turbinage sont essentielles pour optimiser la production d'électricité. Ces dernières ont pour fonction de conserver l'énergie supplémentaire en élevant l'eau vers un réservoir supérieur, afin de la libérer par la suite lorsque la consommation d'électricité s'accroît. Ce dispositif améliore la stabilité du réseau électrique tout en optimisant l'utilisation des ressources existantes.¹²

III-13- L'impact sur la stabilité et la régulation de la centrale :

Dans une centrale hydroélectrique, le moteur hydraulique est essentiel pour assurer la stabilité et le contrôle. Sa performance assure une génération constante et sûre d'électricité, alignée sur les besoins du réseau. Un des atouts majeurs de l'hydroélectricité est sa faculté à moduler rapidement la puissance délivrée, ce qui contribue à la stabilisation du réseau électrique et prévient les variations de tension et de fréquence.

Un des aspects cruciaux de ce contrôle est le mécanisme de gestion du flux d'eau. En régulant l'ouverture des vannes et des injecteurs, il est possible de contrôler le flux d'eau alimentant la turbine, ce qui offre la capacité d'ajuster immédiatement la production

d'électricité en fonction des fluctuations de la demande. Où la proportion d'énergies renouvelables intermittentes, comme l'éolien et le solaire, ne cesse d'augmenter.

Un autre élément crucial est le contrôle de la fréquence du réseau. Effectivement, une centrale hydroélectrique est tenue de conserver une fréquence constante de 50 Hz (Europe, Afrique) ou 60 Hz (Amérique). Les moteurs hydrauliques offrent la possibilité de modifier promptement la vitesse de rotation des turbines afin de contrebalancer les fluctuations de charge sur le réseau et prévenir des déséquilibres susceptibles de provoquer des coupures ou des surtensions.

Les barrages hydroélectriques occupent aussi une position stratégique dans la régulation des pics de consommation. Du fait de leur faculté à se mettre en marche rapidement (en quelques minutes, contrairement à une centrale thermique qui nécessite plusieurs heures), elles sont parfaitement adaptées pour produire de l'électricité en période de pic de consommation ou lors d'une défaillance inattendue d'autres moyens de production d'énergie.

Enfin, la stabilité de la centrale dépend aussi de l'entretien du moteur hydraulique et de ses composants. Une surveillance régulière des turbines, des vannes et des conduites permet de prévenir les pertes de rendement, d'optimiser la consommation d'eau et de prolonger la durée de vie des installations.¹

III-14- Les différents types d'énergie renouvelable :

- L'énergie solaire :

De nos jours, l'énergie solaire est synonyme d'écologie. Les technologies qui exploitent l'énergie solaire pour produire de l'électricité ont connu d'énormes progrès ces dernières années. Le soleil est une source d'énergie inépuisable dont nous pouvons profiter en grande quantité. Et cela, pour une durée prolongée ! Cette énergie passive est tout simplement collectée par des panneaux solaires de type thermique ou photovoltaïque.



Fig III-1 : Énergie solaire

¹

-Le Solaire thermique :

L'une des méthodes pour exploiter directement l'énergie des photons libérés par le soleil est le réchauffement direct des capteurs thermiques. Ils agissent en tant que serre dans laquelle les rayons solaires transfèrent leur énergie à des absorbeurs qui, à leur tour, réchauffent le liquide circulant dans l'équipement de chauffage.

Ainsi, cette énergie est convertie en électricité à l'échelle industrielle grâce à une turbine. Toutefois, cette technologie reste rarement employée et nécessite une exposition solaire directe et constante.

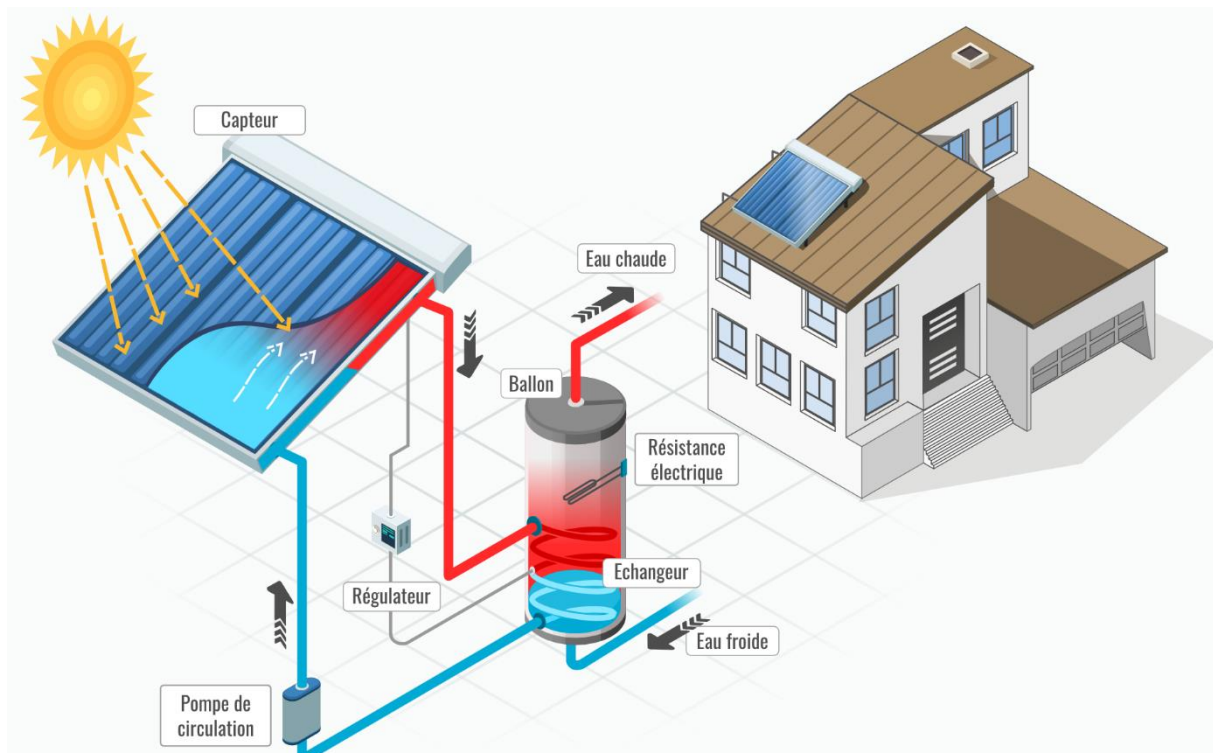


Fig III-2 : Installation de panneaux solaires thermiques

-La Solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est issue de la transformation directe de l'énergie des photons, présents dans la lumière (solaire ou autre), en électricité. Pour ce faire, elle emploie des panneaux photovoltaïques constitués de cellules ou de photopiles fabriqués à partir de matériaux sensibles aux longueurs d'onde du spectre visible.



Fig III-4 : Installation panneaux solaires photovoltaïques

-Le biocarburant :

Un autre avantage de la biomasse est la capacité de produire des biocarburants. On distingue deux sortes : les biodiesels et les éthanol. Les éthanol, conçus pour être utilisés dans les moteurs fonctionnant à l'essence, proviennent de diverses plantes telles que le blé, le maïs, la betterave et la canne à sucre. La méthode implique l'extraction du sucre de la plante, suivi d'une fermentation pour produire de l'éthanol. En ce qui concerne les biodiesels, leur extraction se fait à partir des plantes oléagineuses comme le colza, le tournesol, le soja, etc. On peut alors mélanger les esters d'huile obtenus avec le gazole.

-Le biogaz :

.Il s'agit d'un mélange principalement constitué de méthane (CH_4) et de dioxyde de carbone (CO_2). Selon son origine, il renferme également des volumes variables d'eau, d'azote, d'hydrogène sulfuré (H_2S), d'oxygène, d'aromatiques et de composés organon-halogénés. La géothermie, La géothermie repose sur l'extraction de l'énergie présente dans le sol afin de l'exploiter en tant que chauffage ou production d'électricité.

- La géothermie de haute énergie et de moyenne énergie :

L'électricité est produite à partir de ressources géothermales par le biais de la géothermie de haute énergie (avec des températures dépassant 180°C) et de moyenne énergie (avec des températures situées entre 100°C et 180°C).

La géothermie à basse et très basse énergie La géothermie de basse énergie (avec des températures variant entre 30°C et 100°C) offre une multitude d'applications : le chauffage urbain, le réchauffement des serres, l'exploitation de la chaleur dans les processus industriels, etc. Comparé à d'autres sources d'énergie renouvelables. L'emploi des pompes à chaleur étant indispensables, la géothermie de très basse énergie nécessite une mise en place spécifique.

La géothermie a pour avantage de ne pas être tributaire des conditions climatiques (ensoleillement, précipitations, vent), ni même de la présence d'un substrat spécifique, contrairement à ce que l'on observe avec la biomasse.

-Hydraulique :

L'eau est aussi une ressource renouvelable, car elle se ressource grâce au cycle d'évaporation et de précipitations. Depuis des milliers d'années, la puissance de l'eau est reconnue et utilisée à travers les barrages, les moulins hydrauliques et les systèmes d'irrigation.

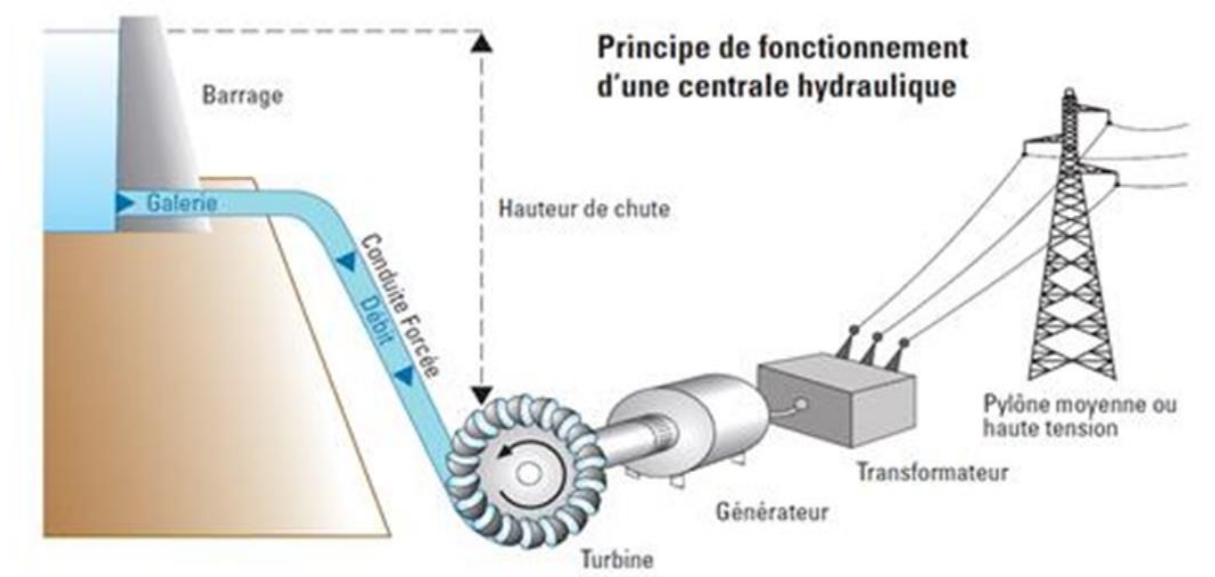


Fig III-5 : les éléments principaux d'une installation hydroélectrique

III-15-1-La topologie à vitesse fixe :

Dans cette configuration, le générateur est connecté directement au réseau. Puisque la fréquence du réseau reste généralement constante et que la vitesse du générateur est influencée par : / La vitesse en tours par minute (tr/min) correspond à la fréquence du réseau, tandis que P représente le nombre de pôles du générateur. Le lien entre le générateur et la turbine peut être établi via une boîte de vitesses ou directement, si l'on utilise une turbine ou un générateur à grande vitesse comportant plusieurs pôles. Habituellement, cette configuration fait appel à des générateurs triphasés ou à induction synchrone. L'effectif est diminué, principalement pour des considérations économiques.

III-15-2- La topologie du convertisseur complet à vitesse variable :

Pour améliorer la performance des turbines, il est indispensable d'avoir un fonctionnement à vitesse variable, surtout quand les conditions dévient des paramètres attendus. Un convertisseur intégral, dont la puissance nominale est proche de celle de l'installation de production, fait office d'interface entre le réseau et le générateur. Parmi ses atouts figurent :

Indépendance de la fréquence : le générateur est capable de fonctionner à n'importe quelle vitesse, ce qui permet un couplage direct avec la turbine, supprimant ainsi la nécessité d'une boîte de vitesses et réduisant les dépenses d'installation et de maintenance.

Conformité du réseau : le convertisseur assure une fréquence stable du côté du réseau et préserve le générateur des pannes réseau.

Gestion du facteur de puissance : convenable pour des générateurs à induction (SCIG) ou synchrones.

La modélisation des DFIM (Doubles Fed Induction Machines) dans les mini-systèmes hydroélectriques nécessite des outils et techniques permettant de simuler leur comportement dynamique, d'optimiser leur conception et de vérifier leur intégration au réseau. Voici une description des outils, techniques, logiciels de simulation et d'analyse couramment utilisés :

III-16- Techniques de modélisation :

Dans le contexte des petits systèmes hydroélectriques, on emploie les méthodes suivantes pour modéliser les DFIM :

-Modélisation électromagnétique :

On utilise les équations dynamiques des DFIM dans le système de référence dq (axe direct et quadrature) pour décrire les courants, tensions et flux au niveau du stator et du rotor.

-Modélisation du convertisseur du côté rotor (habituellement un convertisseur à deux niveaux ou basé sur la modulation de largeur d'impulsion, PWM).

Considération des éléments électriques (résistances, inductances, constante de couplage magnétique).

-Mécanique de modélisation :

Liens avec la turbine hydroélectrique grâce à l'équation du couple mécanique : $T_m = P_m / \omega_r$
Où : P_m : La puissance mécanique ω_r correspond à la vitesse de rotation.

Intégration des caractéristiques de la turbine (par exemple, courbes de performance pour turbines Kaplan, Pelton ou Francis) pour simuler l'interaction avec des débits variables.

-Modélisation du contrôle :

Mise en œuvre de stratégies de contrôle vectoriel (contrôle basé sur le champ) pour gérer la puissance active et réactive.

Simulation des boucles de contrôle (PI ou PID) pour la vitesse, le couple et la synchronisation au réseau.

Conception des algorithmes MPPT (Poursuite du Point de Puissance Maximale) en fonction des fluctuations du débit.

- Logiciels et instruments de simulation ;

Dans les systèmes mini-hydroélectriques, on utilise couramment les logiciels suivants pour modéliser et analyser les DFIM :

III-17- MATLAB/Simulink:

III-17-1-MATLAB:

Matlab est un outil de calcul numérique et de visualisation graphique interactif et convivial, qui convient parfaitement aux ingénieurs et aux scientifiques. Il est doté d'un langage de programmation à la fois performant et convivial. Il facilite l'expression des problèmes et des solutions, à la différence d'autres langages de programmation. Il inclut différentes fonctionnalités telles que l'analyse numérique, le calcul matriciel, le traitement de signal, la visualisation graphique en 2D et 3D, et bien d'autres. Il a deux utilisations possibles (interactive, programmation).

III-17-2-SIMULINK :

Est un logiciel qui permet de simuler les systèmes dynamiques, qu'ils soient linéaires ou non linéaires. Il s'agit d'une extension de MATLAB, où la définition des modèles est réalisée à l'aide de schémas bloc (diagrammes structurels). Le diagramme structurel permet de visualiser visuellement un système d'équations, qu'elles soient linéaires ou non linéaires. Il souligne la configuration du système et permet de représenter visuellement les interactions entre les diverses grandeurs internes et externes. Le diagramme structurel est constitué d'éléments qui symbolisent des opérations mathématiques.

-La turbine hydraulique :

Les barrages hydroélectriques sont de véritables prouesses d'ingénierie qui ont transformé l'histoire de la production électrique. L'hydroélectricité demeure, à l'heure actuelle, l'une des principales sources d'énergie au niveau mondial.

Les centrales hydroélectriques sont principalement constituées de réservoirs, de barrages, de conduites forcées, de générateurs et de turbines. Sans aucun doute, l'eau est le principal constituant des centrales hydroélectriques. Sir Energies vous explique le fonctionnement des turbines hydrauliques.

L'eau provenant de la conduite forcée entre dans la turbine de l'unité de production d'énergie. Lorsque l'eau frappe les pales de la turbine, son énergie cinétique et potentielle est convertie en mouvement rotatif sur les pales, entraînant également la rotation de l'arbre de la turbine, qui est couplé au générateur.

-La sélection de la turbine hydraulique :

Différents types de turbines hydrauliques existent, tels que la turbine Kaplan, la turbine Francis, les roues Pelton, etc. Le choix dépend de la hauteur d'eau, de la quantité d'eau et de la capacité de production d'électricité prévue. La turbine Pelton a été sélectionnée en raison de ces critères, ainsi que de sa facilité de fabrication et de son accessibilité aux matériaux locaux.

III-18- Les turbines hydrauliques les plus populaires :

Dans les centrales, toutes les turbines couramment utilisées sont des versions à action ou à réaction. Cela inclut spécifiquement la turbine Pelton, la turbine Francis, la turbine Kaplan et la turbine Crossflow.

-Définition de la turbine Pelton :

Les centrales de haute chute (de 130 à 2000 mètres) et de faible débit emploient généralement les turbines Pelton. Elles sont clairement stipulées pour les barrages en haute montagne. La turbine Pelton est un dispositif à action qui peut avoir un axe orienté horizontalement ou verticalement. Ce type de turbine est composé d'une roue mobile et d'un distributeur fait d'injecteurs qui varient de 1 à 6.

Se compose d'une roue tournante équipée d'aubes nommées « augets » sur son bord, et un ou plusieurs injecteurs fixes qui propulsent l'eau à une vitesse considérable vers les augets. L'ensemble est enveloppé d'une toile en acier qui a pour but de préserver la roue et d'évacuer l'eau.

Les injecteurs sont des conduits convergents qui convertissent l'énergie hydraulique de pression en énergie cinétique. Positionnés autour de la roue, ils génèrent un jet à pression atmosphérique orienté vers le centre des augets. En ajustant la sortie des pointeaux, on peut contrôler le flux et modifier le diamètre du jet. Dans une turbine de type Pelton, la roue fonctionne à une pression équivalente à celle de l'atmosphère. Cependant, lors de son parcours à travers celle-ci, l'eau est déviée de près de 180°, ce qui lui donne la possibilité de transmettre toute son énergie cinétique. C'est la raison pour laquelle ce genre de turbine n'a pas de diffuseur. Il est généralement suffisant d'avoir un boîtier pour collecter et diriger l'eau.



Fig III-6 : Une turbine Pelton

-La conception de la turbine Pelton :

Cette turbine est classée comme « à action », ce qui signifie qu'elle capte l'énergie cinétique de l'eau, contrairement aux turbines « à réaction », qui utilisent l'énergie en termes de pression. Une turbine Pelton se compose d'injecteurs et d'une roue. Les injecteurs

convertissent l'énergie de pression de l'eau en énergie cinétique : l'eau est introduite dans les injecteurs à une pression élevée et une vitesse lente, et elle ressort sous forme de jets d'eau à basse pression et grande vitesse. Par la suite, ces jets transmettent leur énergie cinétique à une roue à augets, générant ainsi un couple moteur. Une dimension correcte de la roue et de sa charge assure une vitesse angulaire optimale, permettant à l'eau de quitter l'appareil à une vitesse réduite. Son énergie cinétique a été transférée à la roue.

Cette turbine n'est pas conçue pour être réversible : elle ne peut pas servir de pompe à eau pour élever le niveau de l'eau et n'est donc pas appropriée pour une utilisation dans une station de pompage ou de pompage-turbinage.

Ce genre de turbine n'a pas de diffuseur (ou aspirateur) à l'issue de l'eau, puisque celle-ci s'écoule sans aucune contrainte à la pression atmosphérique dès qu'elle sort de l'injecteur sous la forme d'un jet. Plus précisément, lorsque le jet touche l'auget, il se divise en deux. Chaque moitié du jet est ensuite déviée par la concavité de l'auget dans lequel elle se fracasse (transmettant ainsi son énergie cinétique au mouvement de la roue).

La roue de turbine est fabriquée localement à partir d'un disque de coupe en métal de 9 pouces, avec des coudes en PVC de 45 degrés vissés au disque métallique, espacés de 36 degrés les uns des autres.

-Nombre de lames :

Le choix du nombre optimal de pales est très important dans la conception de Turbine Runner, moins de pales entraîneraient une sous-utilisation de l'eau disponible pour la turbine et un nombre excessif de pales pourrait provoquer la puissance pulsée et réduire l'efficacité de la turbine.

-Diamètre de la roue :

Le diamètre de la roue est sélectionné en fonction des conditions d'écoulement. S'il y a plus grand American Journal of Engineering and Technologie Management 2017 débit à travers la turbine choisir un grand diamètre de turbine et pour les conditions de faible débit d'eau, choisir un diamètre de turbine plus petite.

III-19- Principe de fonctionnement de la turbine hydraulique :

Initialement, l'énergie potentielle gravitationnelle se transforme en énergie cinétique. Dans un distributeur, l'eau qui s'écoule est accélérée jusqu'à atteindre une vitesse maximale.

Ceci permet d'activer le rotor d'un générateur qui est ensuite responsable de la conversion de l'énergie mécanique stockée en énergie électrique. Généralement, les turbines sont spécialement conçues pour chaque centrale électrique, assurant ainsi une efficacité optimale. Il est sans conteste que la roue constitue l'élément central de la turbine hydraulique. C'est elle qui tourne grâce à la force de l'eau en mouvement. On peut identifier diverses turbines hydrauliques en fonction du débit d'eau et de la hauteur de la chute.

Les turbines hydrauliques sont des turbomachines et, à ce titre, elles intègrent leurs trois éléments majeurs :

-Le répartiteur,

-L'hélice,

- Possiblement un disperseur.

Évolution de la roue hydraulique, ces dispositifs servent à convertir l'énergie cinétique de l'eau en énergie mécanique.

-La turbine Francis :

Les turbines Francis sont particulièrement adaptées aux hauteurs de chute allant de 40 à 730 mètres et aux débits moyens. On les trouve souvent dans les centrales situées près de l'eau. C'est une turbine à réaction de forme radiale avec un axe orienté verticalement.

Le distributeur est enroulé autour de la turbine. L'eau pénètre par l'ensemble de ses bords. En ce qui concerne son évacuation, elle se produit axialement à travers le diffuseur.

La turbine Francis est vraisemblablement l'un des modèles de turbines les plus anciens et les plus couramment utilisés. Elle se décline en diverses configurations (horizontale pour la mini-hydraulique, verticale). Extrêmement solide et performant, son implantation s'effectue à peu près à 2 mètres sous le niveau en aval.

-La turbine de type Kaplan :

On retrouve couramment ce genre de turbine sur les chutes d'eau de faible hauteur (5 à 80 m) et à débit élevé. La turbine Kaplan est un modèle axial de type réaction. L'orientation de son axe est verticale et une de ses spécificités est qu'elle permet d'ajuster l'inclinaison des pales, ce qui facilite l'adaptation du flux traversant la turbine à celui de la rivière.

-La turbine à flux transversal :

La turbine Banki-Mitchell, également connue sous le nom de Crossflow, est un dispositif où l'eau est introduite dans un rotor cylindrique orienté horizontalement qui traverse un convergent de forme rectangulaire. Dans ce genre de turbine, l'écoulement est détourné lors du contact avec les pales périphériques. Le rotor est équipé d'environ trente pales incurvées, fixes et alignées parallèlement à l'axe de rotation.

III-20- Les avantages de la turbine Pelton :

Parmi les atouts de la turbine Pelton figurent son efficacité élevée, sa conception simple, sa capacité à traiter des débits changeants et son adaptabilité aux grandes hauteurs de chute. Elle est spécialement conçue pour offrir rapidement de la puissance de réglage, ce qui s'avère utile lors d'un incident majeur sur le réseau électrique.

- La conception du stator :

Les enroulements de bobine conductrice (dont le diamètre intérieur est égale à la mesure de l'aimant) seront connectés en d'une manière alternée : le premier enroulement de la bobine, remonté dans le sens des aiguilles d'une montre est a été connecté à la deuxième bobine qui sera connectée dans le sens inverse des aiguilles d'une montre et cette connexion se poursuit jusqu'à la dernière bobine l'enroulement a été connecté

-Construction de l'alternateur et circuit redresseur

- Construction de la roue de turbine Pelton
- Construction du carter de turbine
- Construction de l'alternateur

La procédure de construction est décrite ci-dessous : Découpez un verre en plastique de 9 pouces et 2 mm et placez le rotor Modèle à insérer dans 10 magnés.

Ensuite, enroulez les bobines de gauche à droite, en appuyant sur serré contre la canette qui a l'enroulement comme borne de prise avant de progresser. Utiliser du sable papier, nous avons poncé le revêtement isolant de l'extension pour révéler le cuivre avant de joindre le conducteur à la câble de terminaison. Les joints ont été soudés pour améliorer fiabilité et ensuite dissimulé avec un matériau isolant.

-Simulation de la machine asynchrone à double alimentation :

Pour effectuer la simulation de la MADA, il est possible de convertir le modèle décrit par les équations (3-21), (3-22) et (3-23) en une structure sous forme de diagramme en bloc,

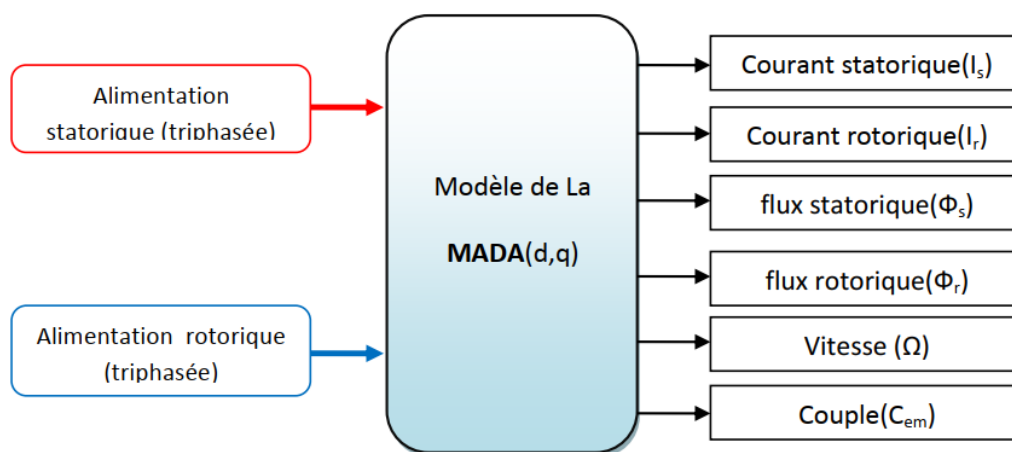


Fig III-7 : Schéma bloc de simulation de la MADA

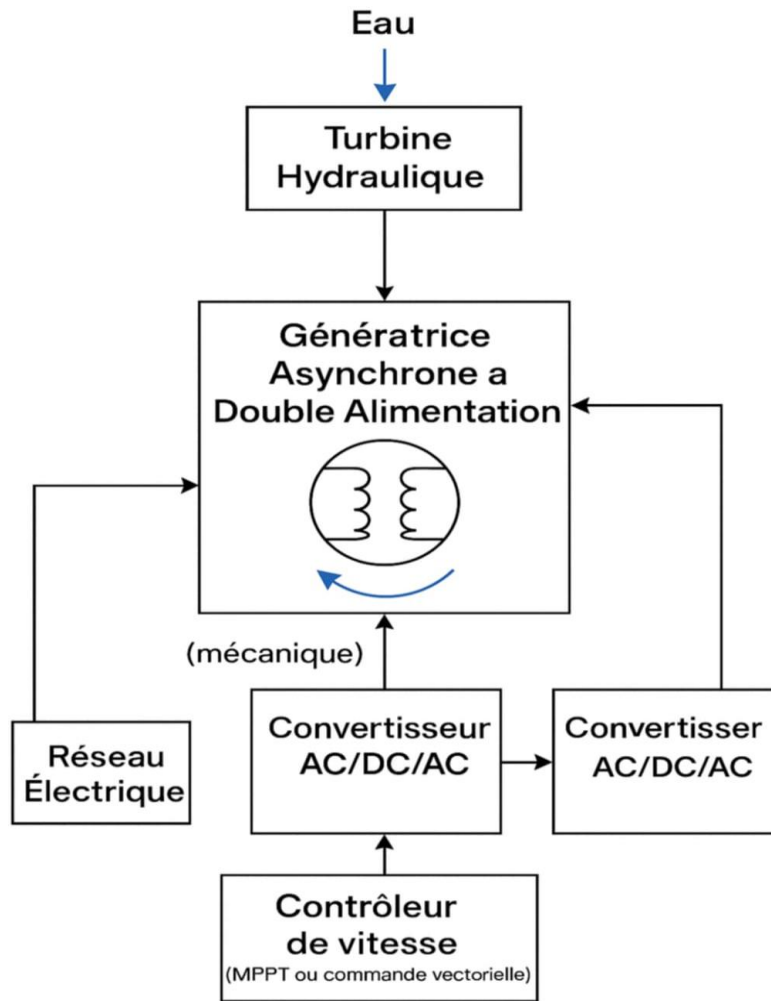


Fig III- 8 : Schéma d'illustration de la MADA et la turbine hydraulique

-Résultats de simulation de la MADA :

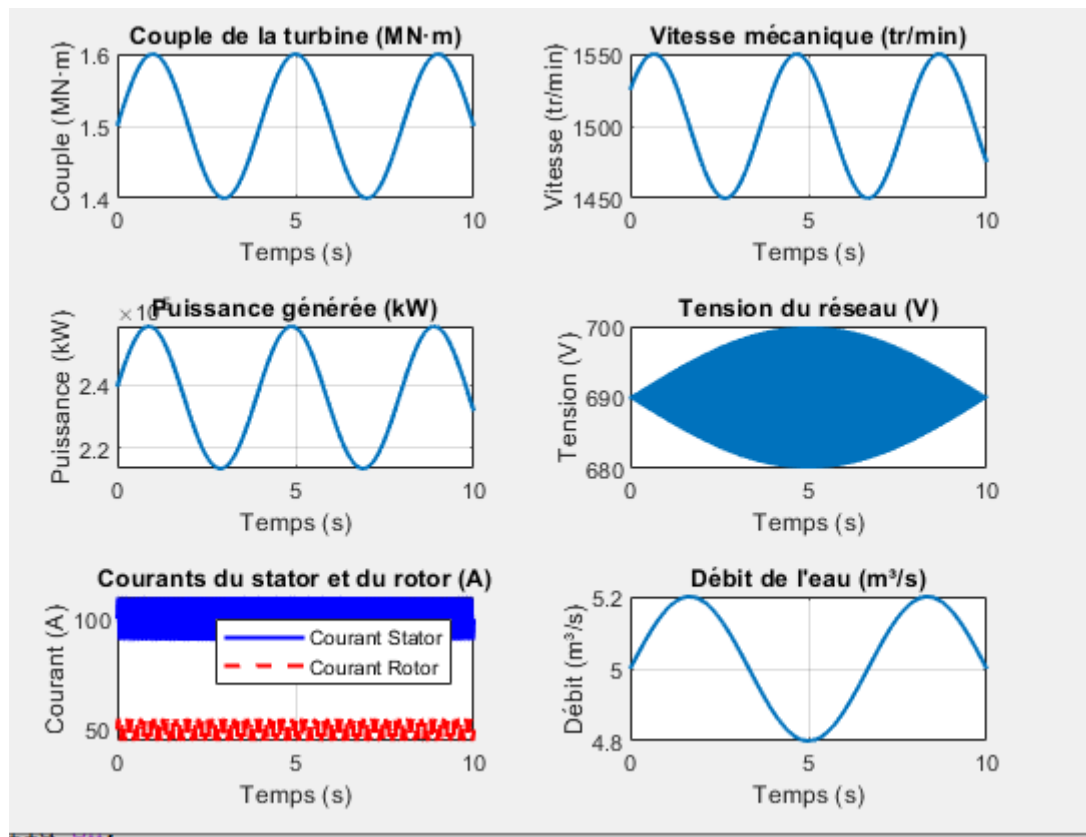


Fig III- 9 : Résulta de simulation de la MADA avec turbine Pelton

Voici une étude approfondie de chaque diagramme :

1 - Couple de la turbine (MN•m) :

- L'axe horizontal illustre le temps en secondes, tandis que l'axe vertical montre le couple exprimé en méga Newton-mètre.
- Le couple fluctue de façon oscillatoire entre approximativement 1,0 et 1,6 MN.m.
- Cette fluctuation indique des changements dynamiques dans la charge ou la réaction de la turbine, pouvant signaler des modifications ou des perturbations au sein du système.

2- Vitesse de rotation (tr/min) :

- L'axe des y représente la vitesse en rotations par minute (tr/min), oscillant entre 1450 et 1550 tr/min.
- La vitesse montre aussi une fluctuation, avec une amplitude modeste autour d'un taux moyen approximatif de 1500 tours par minute.

- Il se peut que cela indique un contrôle de la vitesse en fonction des fluctuations de charge ou de couple.

3- Énergie produite (kW) :

- L'axe vertical indique la puissance en kilowatts, variant entre 2,0 et 2,4 kW.
- Les variations sont constantes, indiquant une production d'énergie influencée par les changements de couple et de vitesse.
- La puissance semble montrer une tendance qui rejoint celle du couple, suggérant une corrélation entre ces deux variables.

3- Puissance produite (kW) :

- L'axe vertical indique la puissance en kilowatts, variant entre 2,0 et 2,4 kW.
- Les variations sont constantes, indiquant une production d'énergie influencée par les changements de couple et de vitesse.
- La puissance semble montrer une tendance qui rejoint celle du couple, suggérant une corrélation entre ces deux variables.

4- Voltage du réseau (V) :

- La tension en volts est illustrée sur l'axe des y, avec une zone ombragée entre 680 et 700 V.
- La tension paraît assez constante, présentant une légère fluctuation dans la fourchette spécifiée, ce qui pourrait témoigner d'une gestion efficace du réseau malgré les variations des autres indicateurs.

5- Courants du stator et du rotor (A) :

- L'axe des y montre le courant en ampères pour le stator (bleu) et le rotor (rouge).
- Les courants oscillent autour de 100 A, avec des pics et des creux synchrones.
- Une différence notable apparaît entre 5 et 6 secondes, où le courant du rotor présente une distorsion marquée, possiblement due à une perturbation ou une commutation.

6- Débit de l'eau (m³/s) :

- L'échelle verticale représente le débit en mètres cubes par seconde, oscillant entre 4,8 et 5,2 m³/s.

- Le flux présente une fluctuation constante, indiquant une modification dans l'alimentation en eau de la turbine, qui pourrait être associée aux modifications de la puissance produite.

- Analyse globale :

- Les variations notées dans l'ensemble des paramètres signalent un système en mouvement, très probablement une turbine hydraulique exposée à des fluctuations de charge ou de débit d'eau.

- La tension du réseau (680-700 V) qui reste relativement stable indique un système bien régulé, malgré les variations d'autres paramètres.

II-18 - Conclusion :

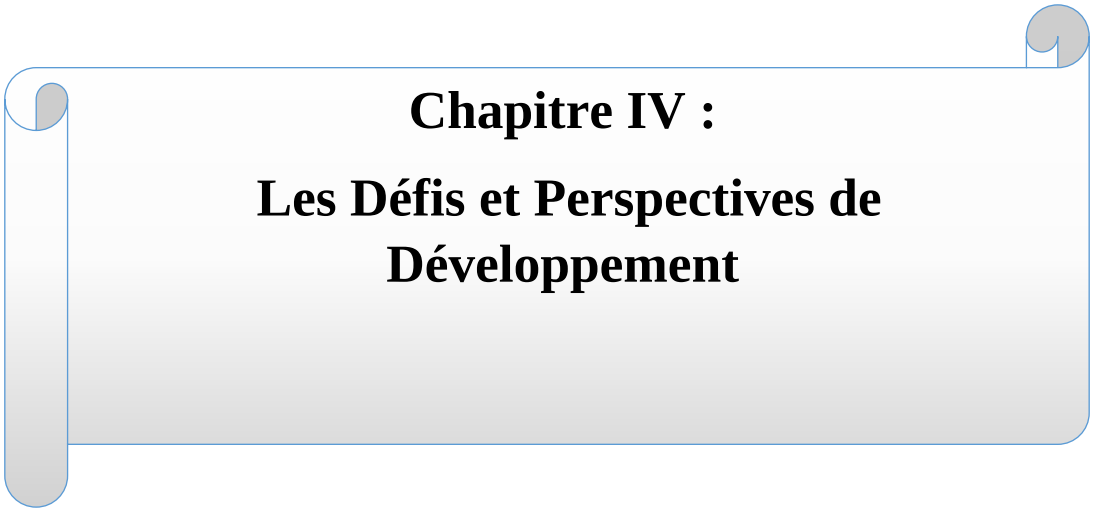
L'analyse de la modélisation nous a conduits à concevoir un modèle mathématique simple et approprié pour contrôler la machine asynchrone à double alimentation.

L'approche MADA dans le cadre du référentiel associé au champ tournant nous a facilité l'analyse de cette machine en régime temporel. La sélection de ce référentiel est basée sur la stratégie de contrôle mise en œuvre et les paramètres à réguler.

Dans ce chapitre, nous avons démontré que la génératrice asynchrone à double alimentation triphasée a été transformée en une génératrice biphasée équivalente grâce à l'usage de la transformation de PARK. Nous avons employé une loi de commande vectorielle directe avec un système d'orientation de flux statoriques pour superviser la MADA.

Cette commande, qui a simplifié les équations du modèle de la machine en deux, facilite l'opération de la machine à double alimentation.

Le prochain chapitre se focalise sur les résultats de simulation du système d'aérogénérateur basé sur la machine à double alimentation.**8**

A decorative graphic of a scroll with a light gray gradient and a blue border. The scroll is partially unrolled, with the top and bottom edges showing a darker gray shadow. The text is centered on the unrolled portion.

Chapitre IV :

Les Défis et Perspectives de Développement

IV-1- Introduction :

L'hydroélectricité, grâce à sa fiabilité et son impact environnemental réduit, figure parmi les sources d'énergie les plus exploitées à l'échelle mondiale. Son utilisation ne se limite pas à la production d'électricité, mais englobe également divers domaines tels que la gestion des ressources hydriques et l'incorporation dans des systèmes énergétiques mixtes.

Dans de vastes centrales hydroélectriques telles que le barrage des Trois Gorges en Chine ou le Grand Coulee aux États-Unis, l'énergie générée est intégrée au réseau national afin de fournir de l'électricité à des millions de ménages et d'industries. En Algérie, des installations telles que le barrage de Beni Haroun contribuent de manière significative à la génération d'énergie et à l'irrigation agricole. Ces installations permettent non seulement de produire de l'électricité de manière continue, mais aussi de réguler le débit des fleuves, réduisant ainsi les risques d'inondation et améliorant la gestion de l'eau potable.¹³

IV-2- Les exemples de mini-centrales utilisant des moteurs à double alimentation :

Les mini-centrales hydroélectriques utilisant des moteurs à double alimentation jouent un rôle clé dans l'électrification rurale et l'optimisation des réseaux autonomes. Ces moteurs, souvent des machines asynchrones à double alimentation (MADA), offrent une flexibilité accrue en permettant un contrôle indépendant de la puissance active et réactive, ce qui améliore la stabilité du réseau et l'efficacité énergétique. Plusieurs installations à travers le monde illustrent les avantages de cette technologie.

Un exemple notable est la centrale miniature de Llyn Brianne au Royaume-Uni, qui utilise une turbine Kaplan couplée à un moteur à double alimentation pour s'adapter aux fluctuations du réseau local. Cet appareil favorise une gestion efficace de l'énergie en régulant la fréquence et la tension, garantissant ainsi un approvisionnement stable aux villages voisins. Aussi au Maroc, la centrale hydroélectrique de Tazekka, dotée d'une puissance estimée à 1 MW, utilise un générateur asynchrone alimenté par deux sources distinctes pour fournir de l'électricité aux zones rurales. Cette technologie offre la possibilité à l'installation de diriger de l'énergie vers le réseau national tout en gérant la puissance réactive, ce qui aide à optimiser la qualité de l'électricité distribuée.

Au sein des Alpes suisses, plusieurs petites installations exploitent des turbines Pelton et Francis associées à des générateurs à double alimentation pour moduler la production d'énergie en fonction des besoins du réseau.

Ces dispositifs se caractérisent particulièrement par leur capacité à ajuster rapidement la production en fonction des variations saisonnières du débit d'eau, ce qui minimise le gaspillage énergétique et facilite l'intégration avec d'autres énergies renouvelables comme le solaire ou l'éolien. On peut noter un autre exemple d'intégration hybride en Inde, précisément dans l'État du Kerala, où une modeste centrale de 500 kW combine l'hydroélectricité et l'énergie solaire.

Cet équipement, équipé d'un moteur à double alimentation, est en mesure de fonctionner de manière autonome, garantissant une autonomie énergétique pour les communautés éloignées du réseau central. L'attrait grandissant pour les moteurs à double alimentation dans les mini-centrales s'explique par divers avantages. Ils permettent tout d'abord une adaptation rapide aux variations de charge, ce qui est essentiel pour assurer une distribution stable d'électricité.

Ils assurent ensuite une gestion efficace de la puissance active et réactive, réduisant ainsi les pertes d'énergie tout en optimisant la qualité du courant. De plus, ces moteurs sont plus abordables et plus faciles à entretenir que les générateurs synchrones classiques, ce qui les rend particulièrement attrayants pour des installations de puissance modeste et moyenne.

IV-3- Les Études de cas et retours d'expérience :

L'incorporation de générateurs à double alimentation dans les petites centrales hydroélectriques constitue une avancée technologique majeure, contribuant à l'accroissement de l'efficacité énergétique, la régularité du réseau et la flexibilité opérationnelle. Ces dispositifs, offrant un contrôle précis de l'énergie active et réactive, sont spécifiquement élaborés pour les emplacements éloignés ou les réseaux hybrides qui incorporent d'autres types d'énergies renouvelables.

De nombreuses études de cas à l'échelle mondiale illustrent les bénéfices tangibles de cette technologie, en fournissant des témoignages pertinents sur leur efficacité, leur viabilité économique et leur incidence sur l'environnement.

IV-4- Les défis techniques et les solutions adoptées :

L'intégration de turbines à double alimentation dans les petites installations hydroélectriques représente une avancée technologique majeure pour la production d'électricité écologique. Cependant, il faut relever de nombreux défis techniques pour assurer une production stable, performante et pérenne avec cette technologie. L'un des obstacles principaux est la variabilité du débit d'eau, susceptible d'être influencée par les saisons, les précipitations ou la gestion des barrages. Ces fluctuations peuvent engendrer une instabilité dans la génération d'énergie électrique, potentiellement affectant la qualité de l'approvisionnement du réseau. L'utilisation de moteurs à double alimentation permet une régulation dynamique de la puissance en fonction du flux disponible, ce qui contribue à résoudre ce problème.

Un autre enjeu majeur est lié à la stabilité et au contrôle de la fréquence du réseau électrique. Effectivement, les changements brusques de flux d'eau ou de charge peuvent provoquer des variations de fréquence, ce qui pourrait compromettre la stabilité du réseau. Afin de résoudre ce problème, l'utilisation de systèmes de contrôle avancés, comme le contrôle PID ou la commande vectorielle, contribue à stabiliser la fréquence et la tension. En outre, l'incorporation de systèmes de stockage d'énergie, tels que des batteries ou des volants d'inertie, facilite la compensation rapide des fluctuations de puissance. L'association des mini-centrales avec d'autres ressources d'énergie renouvelable, telles que l'éolien ou le solaire, aide aussi à stabiliser la production d'électricité et à diminuer les fluctuations soudaines de capacité alimentant le réseau. En ce qui concerne la maintenance et la durabilité des composants, les moteurs à double alimentation requièrent une attention particulière, notamment en ce qui a trait aux convertisseurs électroniques, aux capteurs et aux systèmes de refroidissement. Un entretien inapproprié peut entraîner une usure prématurée des pièces et augmenter les coûts opérationnels. Pour remédier à cette situation, la mise en place d'un programme de maintenance préventive s'appuyant sur des capteurs intelligents permet une surveillance constante et une détection précoce des irrégularités. L'utilisation de systèmes de refroidissement performants aide également à éviter la surchauffe des composants électroniques, ce qui prolonge leur durée de vie. En outre, l'emploi de technologies sans balais pour les moteurs réduit l'usure mécanique et augmente leur fiabilité sur le long terme.

L'intégration de mini-centrales au sein du réseau électrique présente également des enjeux, notamment dans les zones reculées où les infrastructures électriques sont limitées. Les mini-centrales devraient être capables de moduler leur production selon les variations de charge tout en maintenant une synchronisation stable avec le réseau principal. L'utilisation de convertisseurs électroniques intelligents constitue une réponse à ces enjeux, assurant ainsi une synchronisation sans faille et une optimisation efficace de la puissance insérée dans le réseau. De plus, l'établissement de systèmes de gestion d'énergie (EMS - Energy Management System) améliore le processus d'injection de l'électricité et anticipe les fluctuations de la demande, garantissant par conséquent une meilleure intégration au réseau.

Finalement, les restrictions associées à l'impact environnemental et aux normes représentent un défi significatif pour la mise en place des mini-centrales. Chaque changement envisagé sur les cours d'eau devrait considérer ses répercussions sur la biodiversité et les écosystèmes aquatiques. L'usage de passes à poissons aide à réduire ces effets en favorisant le déplacement des espèces aquatiques. En outre, l'emploi de turbines spécifiquement élaborées pour minimiser l'érosion des sols et la sédimentation diminue l'impact environnemental des centrales hydroélectriques. De plus, il est essentiel d'assurer un suivi environnemental strict et de travailler en étroite collaboration avec les autorités écologiques pour garantir la conformité aux normes établies et adapter les installations aux besoins locaux.

IV-5- Les Défis et Perspectives de Développement :

Le développement des mini-centrales hydroélectriques offre une solution durable pour la production d'énergie renouvelable, mais il est confronté à plusieurs défis techniques, économiques et environnementaux.

IV-5-1- Les défis Techniques :

L'un des problèmes principaux est lié à la variabilité du débit d'eau, qui dépend des précipitations et des saisons. Des fluctuations notables du flux peuvent entraîner des modifications de la puissance, affectant ainsi la stabilité du système électrique. Une solution efficace pour ce problème pourrait être l'amélioration des systèmes de stockage d'énergie comme les batteries ou les volants d'inertie.

Un autre défi concerne la maintenance des équipements tels que les turbines, les moteurs et les convertisseurs électroniques. Une exposition prolongée à l'humidité et aux particules peut provoquer une détérioration prématurée, nécessitant des réparations régulières et coûteuses. L'utilisation de technologies de surveillance à distance associées à des algorithmes de maintenance prédictive a le potentiel d'améliorer la fiabilité et d'étendre la durée de vie des équipements.¹⁴

IV-5-2- Les défis Économiques et Financiers :

L'investissement initial élevé continue d'être un obstacle à l'expansion des mini-centrales. L'établissement d'une centrale hydroélectrique, même de modeste envergure, implique des recherches de faisabilité, la mise en place d'infrastructures adéquates et un investissement financier conséquent. Toutefois, grâce à des coûts d'exploitation réduits et une longévité accrue des installations, la rentabilité sur le long terme est garantie. L'accès à des aides financières, qu'elles soient publiques ou privées, pourrait stimuler une augmentation d'investissements dans ce domaine.

IV-5-3- Les défis Environnementaux et Réglementaires :

Il est primordial que les petites centrales hydroélectriques se fondent harmonieusement dans leur environnement pour prévenir toute répercussion négative sur les écosystèmes aquatiques. La mise en place de barrages peut entraver la migration des poissons, ce qui rend indispensable l'établissement de voies de passage dédiées pour eux. De plus, la régulation du débit de l'eau peut influencer l'équilibre écologique des rivières. Pour minimiser ces impacts, il est essentiel de mener des analyses d'impact environnemental approfondies et d'appliquer des normes rigoureuses.

IV-6- Les perspectives de Développement :

L'avenir des mini-centrales hydroélectriques repose sur plusieurs innovations technologiques et stratégies d'intégration :

-L'automatisation et l'intelligence artificielle :

L'utilisation de capteurs intelligents et d'algorithmes de contrôle avancés permet d'optimiser en temps réel la production d'énergie en fonction des conditions hydrologiques.

-Le couplage avec d'autres énergies renouvelables :

L'association des mini-centrales avec le solaire et l'éolien permet d'assurer une production électrique plus stable et continue.

-Le développement des micro-réseaux :

L'implantation de mini-centrales dans des zones rurales isolées, couplées à des réseaux électriques autonomes (micro grids), offre une solution viable pour l'électrification des régions éloignées.

Les nouvelles conceptions de turbines :

L'innovation dans la conception des turbines permet d'améliorer l'efficacité des centrales, même avec de faibles débits d'eau.

IV-7- Défis techniques dans les mini-centrales hydro-électriques :

Les mini-centrales hydroélectriques présentent de nombreux avantages en matière de production d'énergie renouvelable, mais elles sont confrontées à plusieurs défis techniques qui doivent être surmontés pour garantir leur efficacité et leur durabilité.

- Variation du Débit d'Eau et Gestion de l'Intermittence :

Un des principaux problèmes auxquels les petites centrales sont confrontées est la variabilité du débit d'eau, qui est influencée par des facteurs saisonniers, les précipitations et les conditions climatiques. Un déficit en eau diminue la capacité de production énergétique et peut occasionnellement compromettre l'efficacité de la centrale. Pour remédier à ce problème, la mise en place de réservoirs de stockage ou la combinaison avec d'autres sources d'énergie renouvelables (solaire, éolienne) pourrait contribuer à stabiliser la production.

IV-8- Rendement des Turbines et Perte d'Énergie :

Le genre de turbine employée (Pelton, Kaplan, Francis, etc.) influence considérablement l'efficacité des petites centrales électriques. Une erreur de jugement peut entraîner des pertes d'énergie significatives. De plus, l'usure et la salissure peuvent entraîner une dégradation de l'efficacité des turbines avec le temps. Pour maximiser l'efficacité énergétique, il est essentiel d'effectuer un entretien périodique et d'utiliser des matériaux qui résistent à l'usure.

IV-9- Fiabilité des Générateurs et du Système Électrique :

Les générateurs synchrones ou asynchrones sont utilisés par les mini-centrales pour convertir l'énergie mécanique en électricité. Ces générateurs doivent opérer de façon stable, sans variations excessives de tension et de fréquence, une tâche qui peut s'avérer ardue dans les régions éloignées où l'accès à un réseau électrique fiable est restreint. L'incorporation de régulateurs électroniques et de convertisseurs de puissance facilite un meilleur contrôle de la qualité de l'électricité générée.

IV-10- Problèmes de Maintenance et Durabilité des Composants :

Les mini-centrales sont généralement mises en place dans des régions éloignées, ce qui complique l'accès aux installations de maintenance. Des éléments tels que les vannes, les conduites sous pression et les systèmes de gestion doivent être solides et capables de supporter des conditions climatiques extrêmes. L'emploi de dispositifs de surveillance à distance et de capteurs intelligents facilite l'identification des pannes et l'amélioration de la maintenance préventive.

- Impact des Débris et de l'Envasement :

Les cours d'eau et les rivières véhiculent des débris naturels tels que des branches, des feuilles ou des sédiments qui peuvent bloquer les turbines et causer des dommages matériels. L'efficacité des barrages et des canaux peut aussi être diminuée par l'accumulation de sédiments. L'instauration de filets de filtrage, de dispositifs d'élimination des dépôts et de manœuvres régulières de dragage est indispensable pour garantir un rendement optimal.

- Intégration au Réseau Électrique :

L'insertion de petites centrales dans le réseau électrique national peut présenter des défis du fait des fluctuations de production. Un décalage inapproprié avec le réseau peut provoquer des irrégularités, voire des interruptions de service. Le recours aux systèmes de stockage d'énergie et aux technologies de gestion intelligente du réseau (smart grids) contribue à réduire ces difficultés et à renforcer la souplesse du système électrique.

IV-11- Améliorations potentielles des moteurs asynchrones à double alimentation :

Les moteurs asynchrones à double alimentation (MADA) jouent un rôle crucial dans les petites centrales hydroélectriques en raison de leur capacité à fonctionner à une vitesse variable tout en maintenant une fréquence stable. Néanmoins, de multiples améliorations peuvent être apportées pour optimiser leur performance et leur fiabilité. Une des avancées notables est la hausse de l'efficacité énergétique à travers la réduction des pertes électriques et magnétiques. Cela nécessite l'utilisation de matériaux à faible dissipation magnétique, comme des alliages amorphes ou des revêtements d'acier au silicium hautement performants, en plus de l'optimisation du bobinage du stator et du rotor. De plus, l'emploi de convertisseurs de puissance avancés tels que les redresseurs et onduleurs multi-niveaux

participe à l'amélioration de la qualité du signal électrique ainsi qu'à l'optimisation de la gestion du flux réactif.

De plus, renforcer le contrôle et la régulation représente un autre domaine crucial pour le développement. L'emploi du contrôle orienté champ (FOC) et du contrôle de couple direct (DTC) offre une gestion plus fine du couple et de la puissance, diminuant ainsi les pertes d'énergie et renforçant la stabilité du système. De plus, l'incorporation de l'intelligence artificielle (IA) et de l'apprentissage automatique dans la gestion des MADA offre la possibilité d'ajuster dynamiquement les paramètres de fonctionnement en fonction des conditions de charge et de flux, optimisant ainsi l'efficacité du moteur. L'intégration de capteurs intelligents pour surveiller la température, les vibrations et le courant en temps réel permet de prévoir les pannes et d'améliorer la longévité du moteur en ce qui concerne sa fiabilité et son entretien. De plus, l'adoption de systèmes de maintenance préventive basés sur l'intelligence artificielle et l'analyse de données aide à détecter les anomalies avant qu'elles ne provoquent des problèmes majeurs, contribuant ainsi à la diminution des coûts d'entretien et à une meilleure disponibilité des équipements. L'amélioration du système de refroidissement, que ce soit par l'utilisation d'un refroidissement liquide ou par l'optimisation de la ventilation interne, aide également à éviter la surchauffe et à maximiser les performances à long terme.¹⁵

IV-12-Les perspectives futures pour les mini-centrales et les moteurs à double alimentation :

Les mini-centrales hydroélectriques équipées de moteurs asynchrones à double alimentation (MADA) envisagent divers axes de progrès pour optimiser leur rendement, leur connexion aux réseaux électriques intelligents et leur empreinte écologique. L'optimisation de l'efficacité énergétique demeure l'un des défis majeurs. Actuellement, le recours à des techniques avancées de commande vectorielle et l'intégration d'intelligences artificielles (IA) rendent possible l'optimisation en temps réel des performances du moteur en minimisant les pertes d'énergie et en ajustant la génération d'électricité à la demande selon les variations du réseau. En outre, l'évolution des matériaux employés dans la fabrication des moteurs, y compris les alliages de haute performance et les conducteurs à faible résistance, contribue à réduire les pertes par effet Joule, augmentant ainsi la durée de vie et l'efficacité des moteurs.

Sur le plan environnemental, l'impact des mini-centrales hydroélectriques doit être minimisé pour assurer une exploitation durable. Des innovations telles que les turbines écologiques à faible impact permettent de réduire les perturbations des écosystèmes aquatiques en limitant les variations de débit et en facilitant la migration des poissons. De plus, des systèmes de recyclage et de gestion optimisée de l'eau permettent d'améliorer l'efficacité hydrique des centrales, limitant ainsi leur impact sur les ressources en eau locales.

Enfin, les mini-centrales hydroélectriques utilisant des moteurs à double alimentation offrent des perspectives prometteuses pour l'électrification des zones isolées et rurales. Contrairement aux grandes infrastructures hydroélectriques nécessitant des investissements massifs et une mise en place complexe, ces mini-centrales sont plus faciles à installer et peuvent être exploitées localement par des communautés autonomes. Leur coût relativement abordable et leur capacité d'adaptation à différentes configurations géographiques en font une solution idéale pour assurer un accès durable à l'électricité dans les régions éloignées.

Ainsi, les avancées technologiques, combinées à une meilleure gestion des ressources et à une intégration intelligente aux réseaux électriques, permettront aux mini-centrales hydroélectriques à MADA de jouer un rôle clé dans la transition énergétique mondiale. Elles contribueront non seulement à réduire la dépendance aux énergies fossiles, mais aussi à renforcer la résilience des systèmes énergétiques face aux défis climatiques et économiques.

IV-13- Les résultats et l'efficacité des DFIM :

-Amélioration des performances énergétiques :

L'emploi des DFIM a contribué à améliorer l'efficacité globale des microcentrales en raison de leur aptitude à opérer à vitesse variable, ce qui optimise la transformation de l'énergie hydraulique en énergie électrique, même face à un débit d'eau variable.

-Souplesse et adaptabilité accrues :

Les DFIM proposent une flexibilité d'utilisation considérable, facilitant une réponse rapide aux fluctuations hydrauliques sans affecter ni la qualité ni la constance de la production d'électricité.

-Optimisation de la qualité de l'énergie :

En utilisant des commandes électroniques (des convertisseurs bidirectionnels), les DFIM garantissent un meilleur contrôle de la tension et de la fréquence, tout en compensant la puissance réactive, ce qui contribue à renforcer la stabilité du réseau.

-Réduction des coûts de maintenance et d'exploitation :

L'usage de la vitesse variable contribue à diminuer les contraintes mécaniques sur la turbine et les éléments associés, ce qui se traduit par une réduction de l'usure, une longévité accrue et un entretien simplifié.

-Résultats expérimentaux positifs :

Des tests effectués en laboratoire et sur des sites d'essai ont attesté de la fiabilité, de la réactivité et de l'efficacité énergétique du système DFIM, confirmant ainsi sa pertinence pour les installations mini-hydrauliques.

IV-14- Les difficultés rencontrées lors de la recherche :

-La complexité de la modélisation et du contrôle :

L'application des DFIM exige une commande vectorielle élaborée et une modélisation exacte du système machine-onduleur. Cette complexité a nécessité une longue période de développement et d'affinement, spécialement pour assurer la stabilité et la solidité du système dans des conditions concrètes.

-Les problèmes d'intégration avec les convertisseurs de puissance :

Un des principaux défis a été d'assurer une synchronisation précise entre la machine et les convertisseurs (stator et rotor). La gestion des interférences électromagnétiques, des transitoires et des harmoniques a requis l'utilisation de filtres et d'algorithmes de contrôle sophistiqués.

-La sensibilité aux conditions hydrauliques réelles :

Dans des situations de débit faible ou de débit hautement variable (fréquent en mini-hydro), la réactivité dynamique de la DFIM peut être compromise, surtout lorsqu'elle est en dessous d'un certain niveau de puissance où les pertes surpassent les bénéfices liés à la flexibilité.

-Besoin en maintenance spécialisée :

Les éléments électroniques (convertisseurs AC/AC, capteurs, systèmes de contrôle) sont délicats et exigent une maintenance spécialisée, ce qui peut être un obstacle dans les régions rurales ou éloignées où ces petites centrales sont généralement situées.

-Limites de la technologie DFIM dans le contexte mini-hydro :

-Coût initial élevé :

Même si les DFIM entraînent des économies à long terme, leur coût de départ (machines, convertisseurs, système de commande) est considérablement supérieur à celui d'un générateur synchrone ou asynchrone traditionnel. Cela peut entraver leur mise en œuvre, notamment dans les initiatives à faible coût.

-Dépendance à l'électronique de puissance :

Le système fonctionne correctement grâce à l'utilisation de convertisseurs de puissance avancés. Si un problème électronique survient, la machine ne peut pas opérer de manière autonome, ce qui pourrait provoquer des interruptions dans la production.

-Plage de variation de vitesse limitée :

Par rapport à d'autres technologies à variation de vitesse (telles que les génératrices synchrones équipées d'aimants permanents), la DFIM présente une zone de fonctionnement restreinte autour de la vitesse synchrone (généralement $\pm 30\%$), ce qui peut entraver son efficacité dans des lieux avec une grande variabilité hydraulique.

-Impact sur la qualité de l'énergie sans filtrage adéquat :

Les convertisseurs ont la capacité de générer des harmoniques au sein du réseau, qui nécessitent l'implémentation de systèmes de filtrage passifs ou actifs, ce qui rajoute à la complexité et au coût.

-Voici une analyse comparative entre les DFIM (Doubly-Fed Induction Machines) et les générateurs traditionnels (principalement synchrones et asynchrones à cage d'écureuil) dans le contexte des mini-centrales hydroélectriques :

Dans le cadre des mini-centrales hydroélectriques, les machines asynchrones à double alimentation (DFIM) présentent plusieurs avantages par rapport aux générateurs traditionnels, notamment les générateurs synchrones et asynchrones à cage d'écureuil. Tout d'abord, les DFIM permettent un fonctionnement à vitesse variable, ce qui optimise la production d'énergie même en cas de débit d'eau fluctuant, contrairement aux générateurs traditionnels qui fonctionnent à vitesse fixe. De plus, les DFIM offrent un meilleur contrôle de la puissance active et réactive grâce à l'électronique de puissance, ce qui améliore la stabilité du réseau et la qualité de l'énergie injectée. Toutefois, cette technologie est plus complexe à mettre en œuvre et nécessite une maintenance spécialisée, ce qui peut représenter un inconvénient dans

des zones isolées. Sur le plan économique, bien que le coût initial d'un système à DFIM soit plus élevé, il peut être rentabilisé à long terme grâce à un meilleur rendement en régime variable. Enfin, les DFIM s'intègrent plus facilement aux réseaux électriques modernes, notamment dans les contextes de micro-réseaux ou de production décentralisée. Ainsi, bien que plus coûteuse et techniquement exigeante, la technologie DFIM se distingue par sa flexibilité et ses performances supérieures dans des environnements hydrauliques irréguliers.

Conclusion générale :

D'après les conclusions tirées de cette étude, l'emploi des DFIM (machines asynchrones à double alimentation) dans les petites centrales hydroélectriques s'avère être une option efficace, viable et répondant aux exigences contemporaines de flexibilité énergétique. Le fait qu'ils puissent opérer à une vitesse variable favorise une amélioration constante de la production, même en présence d'un flux irrégulier, ce qui constitue un atout considérable par rapport aux générateurs conventionnels. Par ailleurs, les DFIM permettent un contrôle minutieux de la puissance active et réactive, contribuant à améliorer la qualité de l'énergie injectée dans le réseau et simplifiant l'intégration dans des environnements de micro-réseaux ou de réseaux instables.

Cependant, cette technologie a aussi ses limites, notamment la complexité de son implantation et son coût initial élevé, ainsi qu'une nécessité d'entretien spécialisé en rapport avec les pièces électroniques puissantes. Il est essentiel de considérer ces contraintes lors de l'évaluation intégrale du projet, en particulier dans des zones isolées ou présentant une faible compétence technique locale.

En conclusion, les DFIM s'imposent comme une technologie stratégique pour les mini-centrales hydroélectriques situées dans des zones à forte variabilité hydraulique ou nécessitant une grande souplesse d'exploitation. Leur adoption est particulièrement justifiée lorsque les objectifs de rendement, de stabilité réseau et de durabilité à long terme sont prioritaires.

- Références :

- Chapitre I :

- 1-VIDAL, Paul-Étienne. Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation. 2004. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique (Toulouse).
- 2- IDRISSI, Imane. Contribution au Diagnostic des Défauts de la Machine Asynchrone Doublement Alimentée de l'Eolienne à Vitesse Variable. 2019. Thèse de doctorat. Normandie Université ; Université Sidi Mohamed ben Abdellah (Fès, Maroc).
- 3- ROUABHI, Riyadh. Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée. 2016. Thèse de doctorat. Université de Batna 2.-
- 4- BERHANU, Michael. Magnétohydrodynamique turbulente dans les métaux liquides. 2008. Thèse de doctorat. Université Pierre et Marie Curie-Paris VI.
- 5- THÉRY, Gérard. Les autoroutes de l'information. La Document

Chapitre II :

- 6- SAÏD, MEKHTOUB, BENMANSOUR, Ahmed Karim, ET KHALED, Imene Dahbia. Comparaison de l'effet du creux de tension sur deux types de générateurs asynchrones.
- 7- ELBIA, Youcef. Commande floue optimisée d'une machine asynchrone à double alimentation et à flux orienté. 2009. Thèse de doctorat. Université de Batna 2.
- 8- ANASSE, BENNOUK. Modélisation et simulation des éoliennes basées sur une msap et une mada connectées au réseau électrique. 2018.

Chapitre III :

- 9- IDDA, Ahmed, SAID, BENTOUBA, et al. Hybridation d'une Centrale Diesel en Energie Photovoltaïque. 2013. Thèse de doctorat. Université Ahmed Draïa-Adrar.
- 10- HOUNNOU, Amédédjihundé Hypolite Jordão. Dimensionnement optimal d'un système hybride hydroélectrique-photovoltaïque-stockage pour une alimentation rurale isolée. 2019. Thèse de doctorat. Université Bourgogne Franche-Comté ; Université d'Abomey-Calavi (Bénin).
- 11- REZIG, MOHAMED. Conversion d'Energie.
- 12- LABBÉ, Julien. L'Hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés. 2006. Thèse de doctorat. École Nationale Supérieure des Mines de Paris.

Chapter IV:

- 13- AL ANFAF, Mohamed Mladjao Mouhammad. Contribution à la modélisation et à l'optimisation de systèmes énergétiques multi-sources et multi-charges. 2016. Thèse de doctorat. Université de Lorraine.
- 14- LAZAAR, Nouhaila. Optimisation des alimentations électriques des Data Centers. 2021. Thèse de doctorat. Normandie Université ; Université Moulay Ismaïl (Meknès, Maroc).

Références

15- BENAMOR, Afaf. Contribution à la Modélisation, à la Commande et au Contrôle des Systèmes de Production de l'Energie Électrique Renouvelable. 2019. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra.