

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU



Faculté de Génie Electrique et d'Informatique

Département d'Electrotechnique

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en
Electrotechnique



Thème

Etude et Simulation d'une
Micro-Centrale
Hydroélectrique
Connectée au Réseau

Dirigé par :

Mr:A. MIOUAT

Réalisé par :

M^{elle} : TERKI RAZIKA

M^{elle} : HOSNI KAHINA

M^{elle} : AMIAR FADILA

Promotion 2011-2012

Remerciements

Nous remercions le dieu le tout puissant d'avoir guidé nos pas vers les portes du savoir tout en illuminant notre chemin et de nous avoir donné suffisamment de courage et de persévérance pour mener notre travail à terme.

Nous exprimons notre profonde reconnaissance et nos sincères remerciements à notre promoteur, Monsieur A.MIOUAT, pour sa disponibilité, ses encouragements et ses précieuses orientations durant notre travail.

Nous remercions très vivement Monsieur R.ALIOUACHENE de L'ADE d'Iferhounene pour son aide précieuse.

Nous tenons à exprimer nos vives gratitude à nos familles qui ont participé à la réalisation de ce projet avec leur assistance aussi bien morale que matérielle.

Nos humbles remerciements vont aussi à toutes celles et ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce modeste travail.

Que les membres du jury trouvent ici l'expression de notre gratitude et nos vifs remerciements pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

DEDICACE

À...

Celle qui m'a donnée le courage, la bonne volonté et le soutien depuis mon enfance, à ma mère Ourdia à qui je dois toute ma vie et toute mes réussites.

Celui qui a donné le bon sens à ma vie, qui n'a jamais cessé de me lancer l'appel d'amour et d'aide moral et matériel, et à qui ma donne la confiance, à qui je dois beaucoup à mon père Boussad.

Mon très cher et unique frère Amirouche.

Mes chère sœurs : Lynda.Kahina.Naima.

Mes très chères neveux : Zaki, Yanis et Nabil.

Mon oncle Ahmed.

Mes tante Nadia et Fatma.

Mes binômes Fadila et Kahina avec laquelle j'ai partagé ce travail.

Touts mes amis sans cite des noms pour ne pas oublier d'autres.

TERKI RAZIKA



DEDICACE

À...

La mémoire de mon grand- père que son âme repose en paix.

Ma très chère grand-mère à qui je souhaite une longue vie.

Mes chers parents : ma source d'encouragement et de réussite ; pour leurs aide et leurs soutiens.

Mes très chers frères : LAHA, HAFID, TAKFARINESSE, MEHANA et CHABANE.

Mes chères sœurs : SALIHA, NAIMA, SIHAME, FARIDA et ces petites filles.

Mon cher fiancé HOCINE que je ne cesserai jamais de remercier pour tous qu'il m'a donné.

Ma chers nièce HAMIDA, son mari et son fils.

Mes oncles BRAHIM et sa femme, MOULOUD et sa famille.

Toute ma belle-famille et surtout DOUDOU, ARBIHA, MERIEME et MENDESS.

Mes chères amis(es) : SAFIA, MALIKA, SALIMA, ZOHRA, son oublier les autres.

Tous mes proches.

Mes chers binôme KAHINA et RAZIKA ainsi que toutes leurs familles

fadila

DEDICACE

À...

Ma très chère grand-père à qui je souhaite une longue vie.

Ma très chère grand-mère à qui je souhaite une longue vie.

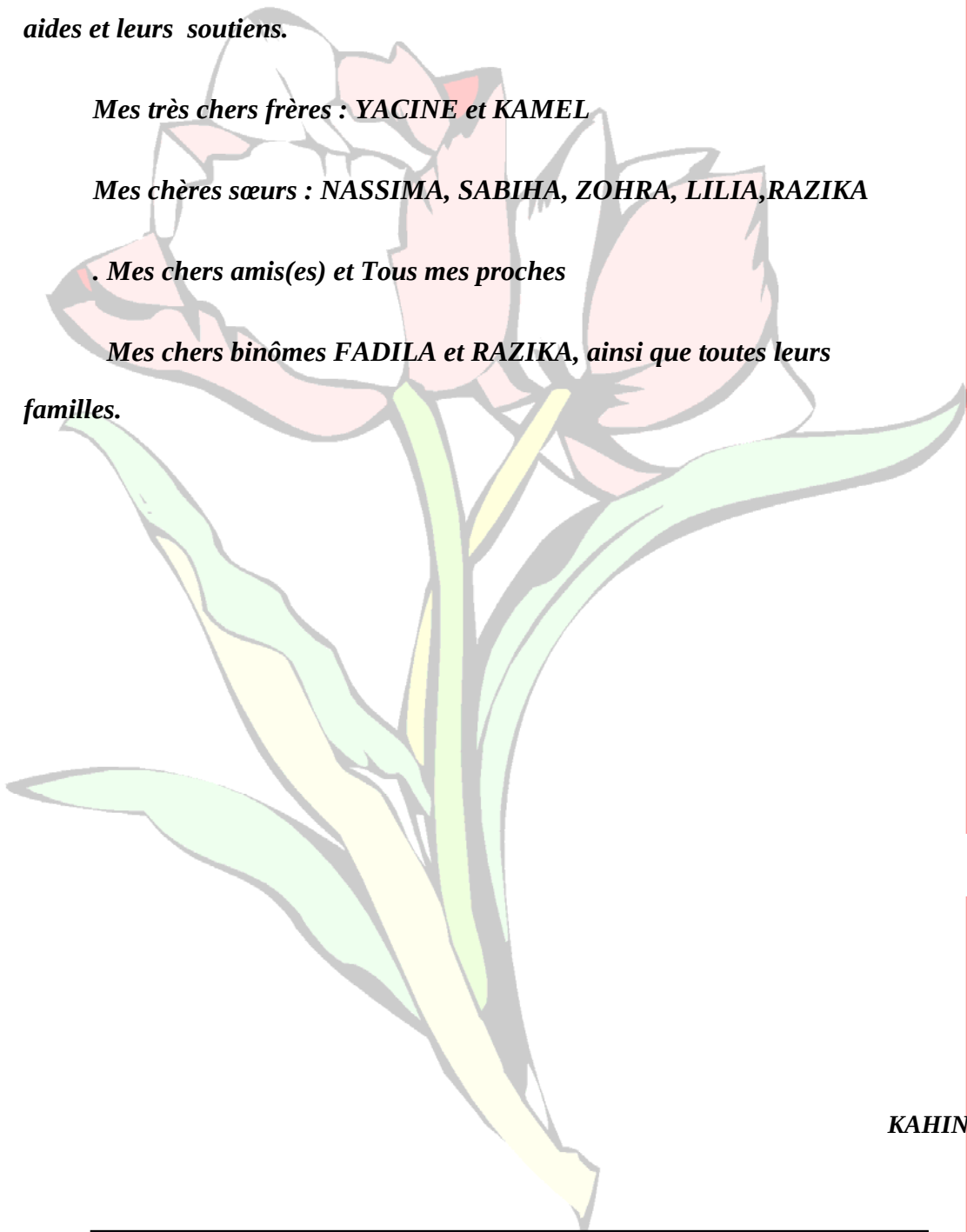
Mes chers parents : ma source d'encouragement et de réussite ; pour leurs aides et leurs soutiens.

Mes très chers frères : YACINE et KAMEL

Mes chères sœurs : NASSIMA, SABIHA, ZOHRA, LILIA, RAZIKA

. Mes chers amis(es) et Tous mes proches

Mes chers binômes FADILA et RAZIKA, ainsi que toutes leurs familles.



KAHINA

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I :Présentation d'une micro-centrale hydroélectrique	
Introduction	3
I.1 Les petites centrales hydroélectriques.....	3
I.1.1 Définition et classification de petite centrale hydroélectrique.....	3
I.1.2 Choix de lieu de la centrale.....	4
I.1.3 Constitution d'une micro-centrale.....	4
I.1.3.1 Les équipements principaux.....	5
I.1.3.1.1 Les équipements de génie civil.....	5
I.1.3.1.2 Les équipements électromécaniques.....	6
I.1.3.1.3 Les équipements électriques.....	12
I.2 Les implantations possibles sur les réseaux d'eau potable pour une micro-centrale.....	15
I.3 Principe de fonctionnement.....	16
I.4 Les grandeurs caractéristiques d'une installation hydraulique.....	17
I.4.1 Le débit.....	17
I.4.2 La chute brute H_b	18
I.4.3 La chute nette H_n	18
I.4.4 La puissance hydraulique.....	18
I.4.5 La puissance mécanique.....	19
I.4.6 La puissance électrique.....	19
I.4.7 La vitesse de rotation ω ou n	19
I.4.8 Les pertes de charge.....	19
I.4.8.1 Influence des différents paramètres sur les pertes de charge.....	20
I.4.8.2 Influence de la perte de charge sur la production de l'énergie électrique.....	20
I.5 Modes de fonctionnement.....	20
I.5.1 Fonctionnement en réseau interconnecté (Parallèle).....	20
I.5.2 Fonctionnement en réseau isolé.....	20

Conclusion.....	21
------------------------	-----------

Chapitre II : Les différents générateurs électriques

Introduction.....	22
II.1 Machine synchrone.....	22
II.1.1 Description.....	22
II.1.1.1 Le stator.....	22
II.1.1.2 Le rotor.....	23
II.1.2 Les différents types de machine synchrone.....	23
II.1.2.1 La machine synchrone à rotor à pôles lisses.....	23
II.1.2.2 La machine synchrone à rotor à pôle saillant.....	24
II.1.2.3 La machine à rotor à aimant permanent	24
II.1.3 Champ tournant	25
II.1.4 f.é.m. induite.....	25
II.1.5 Utilisation de la machine synchrone en génératrice	26
II.1.6 Mise en équation de la génératrice synchrone	26
II.1.6.1 Force électromotrice d'un alternateur	27
II.1.6.2 Expression du couple.....	27
II.1.6.3 Bilan des puissances – Rendement.....	28
II.1.7 Compléments sur l'alternateur synchrone	30
II.1.8 Connexion au réseau.....	31
II.1.8.1 Fonctionnement en réseau interconnecté.....	31
II.1.8.2 Fonctionnement en réseau isolé.....	32
II.2 La machine asynchrone	32
II.2.1 Description.....	32
II.2.2 Les différents types de machines asynchrone.....	35
II.2.2.1 Machine asynchrone a cage d'écureuil.....	35
II.2.2.2 Machine asynchrone à rotor bobiné	36

II.2.3 Utilisation de la machine asynchrone en génératrice	37
II.2.3.1 Principe de fonctionnement	38
II.2.3.2 Bilan des puissances.....	39
II.2.3.3 Connexion au réseau	41
II.2.4 Machine asynchrone doublement alimenté	43
II.3 Comparaison entre les générateurs synchrone et asynchrone	46
II.3.1 Construction.....	46
II.3.2 Synchronisation.....	47
II.3.3 Régulation de U et f en réseau isolé et système d'excitation.....	47
II.3.4 Rendement.....	49
Conclusion.....	50

Chapitre III : Modélisation de la génératrice asynchrone

Introduction.....	51
III.1 Représentation de la machine asynchrone dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation.....	51
III.2 Modélisation de la génératrice en fonctionnement linéaire.....	53
III.2.1 Hypothèses simplificatrices.....	53
III.2.2 Modèle mathématique de la machine asynchrone linéaire	53
III.2.2.1 Mise en équations de la machine.....	53
III.3 Transformation de Park.....	57
III.4 Equation de la machine dans les axes d et q.....	58
III.4.1 Equations électriques.....	58
III.4.2 Equation magnétique.....	59
III.4.3 Equation mécanique.....	59
III.5 Choix du référentiel.....	59
III.5.1 Référentiel immobile par rapport au stator.....	59
III.5.2 Référentiel immobile par rapport au rotor (lié au rotor).....	60

III.5.3 Référentiel immobile par rapport au champ tournant (lié au champ tournant).....	60
Conclusion.....	61

Chapitre IV : Description du site

Introduction.....	62
IV.1 Etude du potentiel.....	62
IV.2 Identification des sites....	63
IV.3 Description du site	63
IV. 3.1 la prise d'eau.....	65
IV.3.2 Les conduites.....	65
IV.3.2.1 La conduite d'amenée.....	65
IV.3.2.2 La conduite d'aspiration... ..	66
IV.3.2.3 Conduite de refoulement.....	67
IV.3.3 Le réservoir d'arrivée.....	67
IV.3.4 La station de refoulement.....	68
IV.4 Etude du potentiel dans la zone d'Iferhounene.....	69
IV.4.1 Mesure de la hauteur de chute	69
IV.4.1.1 La hauteur de chute brute H_b	69
IV.4.1.2 La hauteur nette H_n	69
IV.4.2 Mesure du débit.....	70
IV.4.3 Calcul de la puissance hydraulique	70
IV.4.4 Calculs de la puissance mécanique	70
IV.4.5 Calcul de la puissance électrique	72
Conclusion.....	74

Chapitre V : Simulation du système

Introduction.....	75
V.1 Outil de simulation Matlab-Simulink.....	75
V.1.1 Matlab.....	75
V.1.2 SIMULINK.....	76

V.1.3	Le model du système.....	77
V.1.3	Schéma de la simulation du système	77
V.2	Résultats de la simulation.....	79
V. 3	Interprétation des résultats	83
V. 3.1	Évolution des puissances réactive et active de la génératrice.....	83
V. 3.2	Évolution des puissances réactive et active du réseau.....	83
V. 3.2	Évolution des puissances réactive et active de la charge	84
V. 3.3	Évolution de la vitesse de rotation.....	85
V .3.4	Évolution du couple électromagnétique.....	85
V .3.5	Évolution des courants statoriques	85
V .3.6	Évolution des courants rotoriques.....	85
Conclusion		85
Conclusion générale		86
Bibliographe		87
Annexe		89

Introduction

La production d'énergie électrique est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétique des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie électrique est assurée à partir des sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive de stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures, c'est pour cela que plusieurs directives ont été adoptées pour la promotion de l'électricité produite à partir des sources d'énergies renouvelables.

Dans ce cadre les projets de centrale hydroélectrique sont depuis longtemps utilisés pour approvisionner en électricité les petites communautés éloignées ou isolées. Actuellement, l'hydroélectricité représente la première source mondiale de production d'énergie renouvelable avec environ 14 % de la totalité de la production de l'électricité générée sur la planète [4]. Toutefois, des grandes et nouvelles stations hydroélectriques ne vont plus être construites que très rarement. Mais il y a un potentiel considérable pour le micro hydroélectrique. Par conséquent, son développement actuel et futur est essentiellement basé sur les Petites Centrales Hydrauliques (PCH).

Le but de ce travail est l'étude de la possibilité d'implantation d'une micro-centrale hydroélectrique sur un réseau d'eau potable en Algérie plus particulièrement dans la grande Kabylie du fait qu'elle est une région de montagne et de dénivelés, et cela dans le but de valoriser le potentiel énergétique existant dans cette région. Tout le système développé au cours de cette étude sera simulé par le logiciel Matlab-Simulink. Pour vérifier les performances de ce système.

Notre travail se compose principalement de cinq chapitres :

- Le premier chapitre sera consacré à la présentation de la micro-centrale hydraulique à travers la définition, le principe de fonctionnement ainsi que les différents équipements constituant la micro-centrale dont le génie civil et l'électromécanique. On a introduit dans ce même chapitre les différentes implantations possibles de la micro-centrale sur un réseau d'eau potable.

- Dans le second chapitre, nous présenterons différents générateurs électriques utilisés dans les centrales hydrauliques, vues leurs constitutions, modes de fonctionnements et en fin on terminera le chapitre avec une comparaison entre ces différents générateurs.
- Le troisième chapitre sera basé sur la description du site d'AEP d'Iferhounene, où on a opté à l'étude du potentiel énergétique qui va nous permettre d'implanter une micro-centrale hydroélectrique.
- Le quatrième chapitre présentera une étude sur la modélisation de la génératrice asynchrone à travers les équations électriques et mécaniques du flux et du couple à l'aide de la transformation de Park et certaines hypothèses simplificatrices ainsi que les modèles de la machine en représentation d'état.
- Le dernier chapitre sera consacré à la présentation sommaire du logiciel de calcul Matlab Simulink, à la réalisation du modèle de simulation de la micro-centrale hydroélectrique connectée au réseau basse tension et l'interprétation des résultats de la simulation.

On terminera notre étude par une conclusion générale.

Introduction

L'énergie électrique est un facteur essentiel pour le développement et l'évolution des sociétés humaines que cela soit sur le plan de l'amélioration des conditions de vie, ou sur le développement des activités industrielles. Elle est devenue une forme d'énergie indispensable par sa souplesse d'utilisation et par la multiplicité des domaines d'activité où elle est appelée à jouer un rôle plus important. Ces modes de production ainsi que les moyens de production associés sont amenés à subir de profonds changements au cours des prochaines décennies. En effet, les modes de production reposant sur la transformation des énergies renouvelables (éolien, solaire...), sont appelés à être de plus en plus utilisés dans le cadre du développement durable. Dans ce chapitre nous allons présenter les centrales hydroélectriques en se basant sur les micro-centrales qui sont de plus en plus utilisées.

I.1 Les petites centrales hydroélectriques

Les petites centrales hydrauliques (PCH), de par leur faible puissance, leur localisation au fil de l'eau, leur mode d'exploitation décentralisé, leur connexion au réseau BT ou MT, présentent des différences notables par rapport aux grandes installations. Bien souvent, elles ont été implantées, leur grand nombre les classe parmi les sources d'énergie dispersées dont la problématique de gestion constitue un sujet d'actualité important.

I.1.1 Définition et classification de petite centrale hydroélectrique

Une petite centrale hydraulique se définit comme une installation de production énergétique, d'une puissance de moins de 10 MW. Les petites centrales hydrauliques se divisent en différentes catégories :

- Les pico-centrales de 10 à 100 kW ;
- Les micro-centrales de 100 kW à 1 MW ;
- Les mini-centrales de 1 MW à 10 ou 15 MW[10].

Celles-ci peuvent être classées aussi en trois catégories distinctes selon la hauteur de la chute d'eau :

- Centrales à haute chute : 120 m et plus ;
- Centrales à moyenne chute : 30 à 120 m ;
- Centrales à basse chutes : 2 à 30 m[15].

I.1.2 Choix de lieu de la centrale

Les emplacements des usines hydrauliques sont imposés par des conditions de pluviosité et de configuration des terrains et se trouvent de ce fait pour l'Algérie en petit Kabylie, où les sites sont les plus favorables. Les principaux éléments qui caractérisent une centrale hydraulique sont :

- La hauteur de chute d'eau ;
- Débit nominal.

Le débit instantané d'un cours d'eau dépend du régime des pluies, glaciaire et du volume d'eau que peut retenir le barrage, celui-ci étant fonction de la saison. Le débit instantané varie de jour en jour avec un minimum qui se situe généralement à la fin de la saison sèche si elle est marquée. La notion de débit moyen permet de mieux estimer les potentialités énergétiques d'une installation si une infrastructure d'accumulation est envisagée. Le débit d'étiage, c'est-à-dire le débit minimum de la rivière durant 24h situe la puissance minimale potentielle d'une installation. Si les observations hydrologiques (mesures du débit du cours d'eau) sont effectuées depuis des années, il est permis de connaître le débit minimum atteint en moyenne soit annuellement.

I.1.3 Constitution d'une micro-centrale

Une micro-centrale hydroélectrique peut être subdivisée en 3 parties : les travaux de génie civil, les équipements mécaniques et les équipements électriques. Le choix de la turbine, des équipements électriques et des travaux de génie civil dépend du potentiel du site et de la puissance électrique requise. Le potentiel hydroélectrique dépend de la chute et du débit du cours d'eau. Les cours d'eau peuvent être classés en faible chute (hauteur inférieure à 30 mètres), moyenne chute (hauteur de 30 à 120 mètres) et haute chute (hauteur supérieure à 100mètres). Le système hydroélectrique est schématisé à la figure 2 et est constitué de :

- Les équipements de génie civil (canal d'amenée, conduite forcée),
- Les équipements électromécaniques (turbine, régulateur),
- Les équipements électriques (générateurs, Pylône, ligne, transformateur), ces différents équipements sont représentés sur la figure I.1

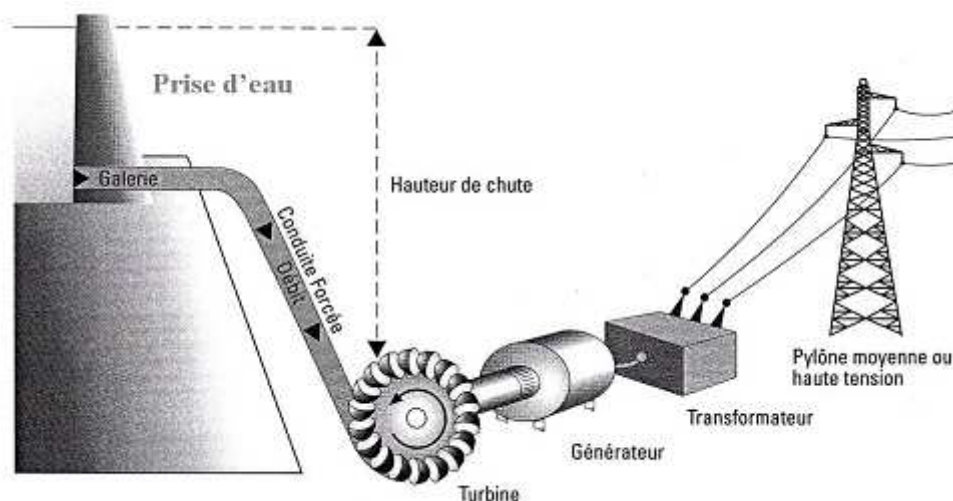


Figure I.1 : les éléments principaux d'une installation hydroélectrique [1]

I.1.3.1 Les équipements principaux

I.1.3.1.1 Les équipements de génie civil

- Un ouvrage de prise d'eau qui assure que tant qu'il y a de l'eau dans la rivière, elle est dirigée vers la centrale. Cet ouvrage de prise est muni d'une vanne qui permet de couper l'alimentation en cas d'arrêt de la turbine ou de travaux sur l'infrastructure.
- Un canal d'amenée plus ou moins long va conduire l'eau de l'ouvrage de prise à l'ouvrage de tête ou chambre de mise en charge. Ce canal permet aussi de créer une hauteur de chute plus importante en choisissant un tracé approprié.
- L'ouvrage de mise en charge assure le remplissage de la canalisation qui relie cet ouvrage à la turbine. La conception correcte de l'ouvrage de mise en charge permet de maintenir noyée l'admission de la conduite forcée. L'ouvrage est pourvu d'un trop plein de manière à permettre l'évacuation de l'excès d'eau lors de la réduction des besoins en eau de la turbine.
- La conduite forcée (canalisation entre ouvrage de mise en charge et turbine) crée la colonne d'eau qui permet la mise en charge de la turbine. Cette conduite généralement en acier pour les installations conventionnelles peut être réalisée en polyéthylène pour les pico-centrales. Son diamètre est calculé de manière à éviter les pertes de charges lors de l'écoulement de l'eau. Un gros tuyau coûte cher à l'achat et au placement mais permet de réduire la perte de charge. Lorsque la hauteur de la colonne d'eau est faible, il n'y a pas de conduite forcée mais une construction en béton dans laquelle s'écoule l'eau pour la mise en charge la colonne d'eau. La figure I.2 représente une conduite forcée[16].



Figure I.2 : conduite forcée [8]

I.1.3.1.2 Les équipements électromécaniques

- Les turbines

Le passage de puissance hydraulique en puissance mécanique se fait grâce à une turbine qui est mise en rotation par le flux de l'eau, de manière à faire tourner un alternateur. Le choix du type de turbine se fait en fonction du débit nominal Q_n et de la chute nette H_n . De plus, pour les petites centrales possédant un débit suffisamment constant tout au long de l'année, il est également possible d'utiliser des pompes travaillant en régime inversé. Il existe de nombreux types de turbines s'adaptant aux différentes contraintes imposées par chaque site, on peut les classer en deux groupes [10]:

- Turbines à action
- Turbines à réaction

• Turbines à action

Une turbine est dite à action si la pression du fluide à la sortie du distributeur P_e (soit la pression à l'entrée de la roue) et la pression à la sortie de la roue P_s sont identiques : $P_e = P_s =$ pression atmosphérique. Les turbines de ce type les plus courantes sont les turbines Pelton et les turbines Banki [10].

❖ Turbine Pelton

La turbine Pelton est une turbine à action dont la pression de l'eau est entièrement convertie en énergie cinétique avant d'entrer en contact avec la roue et de lui transmettre son énergie, elle est utilisée pour des hautes chutes, de 60 m jusqu'à plus de 1000 m. Elle est constituée d'une roue à augets sur lesquels un ou plusieurs injecteurs acheminent l'eau. Chaque injecteur est constitué d'une tuyère permettant de former un jet d'eau à haute vitesse, et d'un pointeau mobile permettant de contrôler le débit. Le réglage des pointeaux se fait par un asservissement hydraulique ou électrique. Pour les installations d'eau potable on préférera un asservissement électrique. La figure I.3 représente une turbine Pelton.

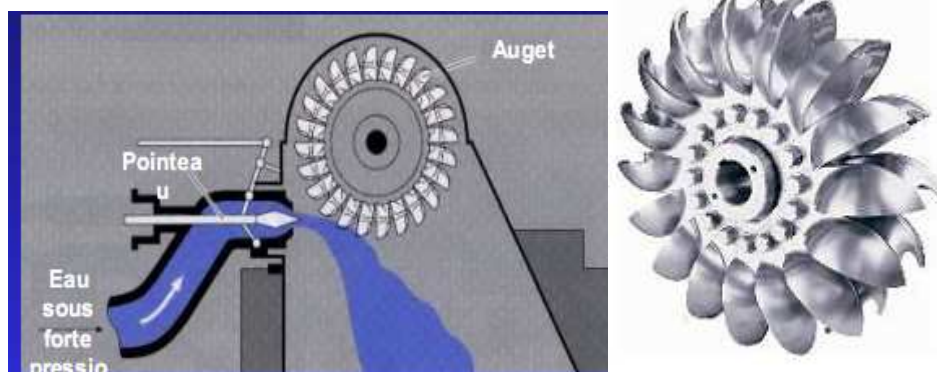


Figure I.3: Turbine Pelton[3]

Les axes des injecteurs sont situés dans le plan de la roue. En cas d'arrêt d'urgence de la turbine, le jet est dévié par un déflecteur, afin qu'il n'atteigne pas les augets et que la turbine ne puisse pas atteindre sa vitesse d'emballement. Cette action permet de fermer l'injecteur en manœuvrant très lentement le pointeau, évitant ainsi de générer un coup de bélier inacceptable dans la conduite[12].

❖ Turbine Banki-Michell

C'est une turbine à jet libre, à admission radiale, pouvant fonctionner sous des débits très variables. Sa vitesse spécifique de rotation la classe parmi les turbines à vitesse lente. Les vannes directrices donnent une section rectangulaire au jet d'eau entrant. Le jet rectangulaire traverse la couronne d'aubes du rotor cylindrique d'abord de l'extérieur vers l'intérieur, puis de l'intérieur vers l'extérieur en sortant[12].

La turbine Banki a un rendement moins élevé qu'une turbine Francis mais la plage d'exploitation est beaucoup plus étendue ; Les turbines Banki-Mitchell peuvent avoir un débit dont la capacité varie entre $20 \text{ dm}^3/\text{s}$ et $10 \text{ m}^3/\text{s}$. Sa hauteur d'exploitation varie de quelques mètres à 200 m [11]. Elle est représentée par la figure I.4.

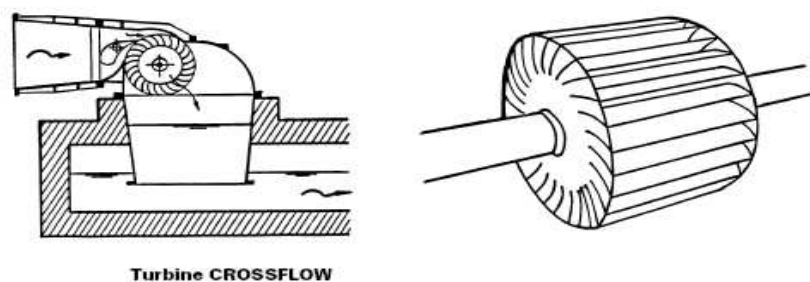


Figure I.4: Turbine Banki-Michell[7]

- **Turbines à réaction**

Si la pression d'entrée P_e est supérieure à la pression de sortie de la roue P_s , la turbine est dite à réaction. Dans la turbine à action, seule l'énergie cinétique est transformée en énergie mécanique. Dans la turbine à réaction, une partie de l'énergie cinétique et une partie de l'énergie de pression sont transformées en énergie mécanique. L'énergie cinétique restante ainsi que l'énergie potentielle peuvent être en partie récupérées au moyen d'un aspirateur [11].

- ❖ **Turbine Francis**

La turbine Francis est constituée d'une roue, d'un rotor, d'un tuyau d'admission et d'un châssis et d'éléments d'admission d'eau ayant, en général, une forme de spirale. La roue assure la fourniture en eau et un débit suffisant. Dans le rotor, l'énergie de l'eau est convertie en énergie mécanique. L'écoulement peut passer d'une direction radiale à une direction axiale à la sortie de l'eau. La forme du rotor et de ses pales dépend de la hauteur de chute. L'avantage principal de la turbine Francis est sa capacité à produire pour différentes solutions d'aménagement. Cela autorise un choix optimal de la turbine c'est-à-dire, une adaptation optimale aux contingences locales, aux équipements hydrotechniques, à la centrale électrique, etc. Les turbines Francis à axe vertical installées dans des chambres ouvertes sont les plus communes, particulièrement pour les PCH jusqu'à 5 MW. Les turbines à axe vertical, dans des châssis à spirales, comprenant des turbines à rotors multiples, sont également utilisées. Leur champ d'application habituel est de 25 à environ 350 m de chute. la figure I.5 montre une turbine Francis [11].

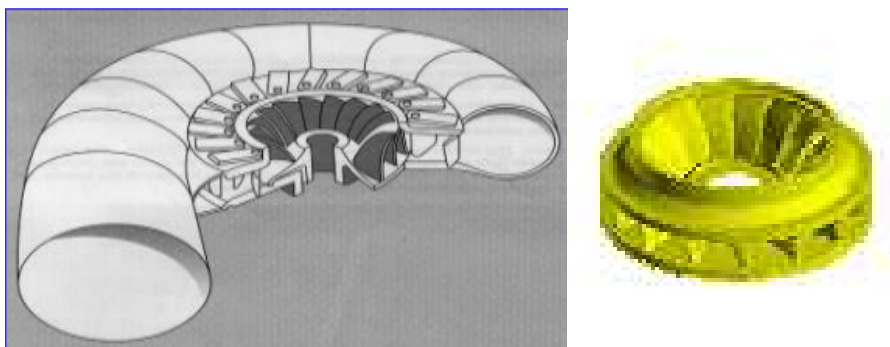


Figure1.5 : Turbine Francis [3]

- ❖ **Turbine à hélice (Kaplan)**

Cette turbine a été inventée par l'ingénieur autrichien Viktor Kaplan (1876-1934), La turbine Kaplan couvre toute la gamme des PCH de 100 kW à 15 MW pour des hauteurs de chute de 2 à 20

m. La roue d'une turbine Kaplan est une hélice à pas réglable, c'est-à-dire que les pales sont articulées. La commande de position se fait par des biellettes et un vérin hydraulique placés dans le moyeu de la roue. Cette technique impose un arbre creux et un joint hydraulique tournant qui se situe en bout d'arbre de la turbine. Le distributeur peut être à directrices fixes ou réglables ; les machines à directrices réglables ont un meilleur rendement sur une plage d'utilisation plus large. Pour une hauteur de chute donnée, il existe un réglage des pales et des directrices permettant d'obtenir le meilleur rendement. Pour ce faire, les constructeurs utilisaient auparavant une came qui liait la position des pales à la position des directrices pour chaque ouverture. Actuellement, il est plus facile de régler la position des pales par rapport aux directrices en utilisant des dispositifs de commande numériques tabulés (à une ou plusieurs tables : une table par palier de hauteur de chute). Les valeurs sont mémorisées par l'automate programmable de contrôle. Cette turbine nécessite en général un multiplicateur du fait de sa faible vitesse de rotation, est utilisée dans des hauteurs de chute allant de 2 à 40m. La figure I.6 montre une turbine Kaplan [11].

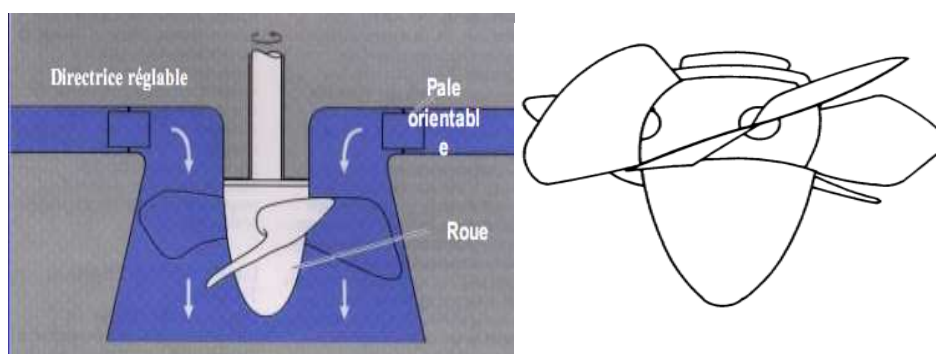


Figure I.6: Turbine Kaplan [3]

Les possibilités de réglage de ces machines sont :

- Turbine hélice à pales et distributeur fixe.
- Turbine hélice à pales variable et distributeur fixe.
- Turbine Kaplan à pales variables et distributeur fixe.
- Turbine Kaplan à pales et distributeur réglables.

Le choix du réglage dépend du site.

-Le régulateur

Pour faire fonctionner une turbine correctement, un système de régulation doit être mis en place. Ce dernier doit permettre d'adapter le régime de vitesse de la turbine en fonction de la consommation électrique et du débit à l'entrée de la prise d'eau. Cette régulation doit permettre de

maintenir la vitesse de rotation la plus constante possible afin que le réseau reste calé sur sa fréquence propre, en l'occurrence 50 Hz [8].

- **La régulation «charge fréquence»**

Elle agit afin de garder constante la charge électrique du réseau, sans système de contrôle du débit. La régulation s'effectue par dissipation du surplus d'énergie dans des charges résistives. Toute l'énergie non consommée est redirigée dans une batterie de résistance. La centrale tourne donc toujours au maximum de sa capacité, produisant sa puissance nominale. De la même manière que pour la régulation « débit vitesse », le délestage de l'énergie excédentaire peut s'effectuer de manière automatique ou de façon manuelle. Lorsque la fréquence du réseau augmente, on connecte des charges résistives qui dissipe une partie de l'énergie sous l'effet joule. On augmente du même coup le couple mécanique de la génératrice et on réduit donc la vitesse de rotation de la turbine. Inversement, en déconnectant des résistances, on réduit la charge du réseau, le couple dans la génératrice devient moins important et la vitesse de rotation de la turbine augment. Dans la figure I.7 on a schématisé le cas de la régulation « charge fréquence » [8].

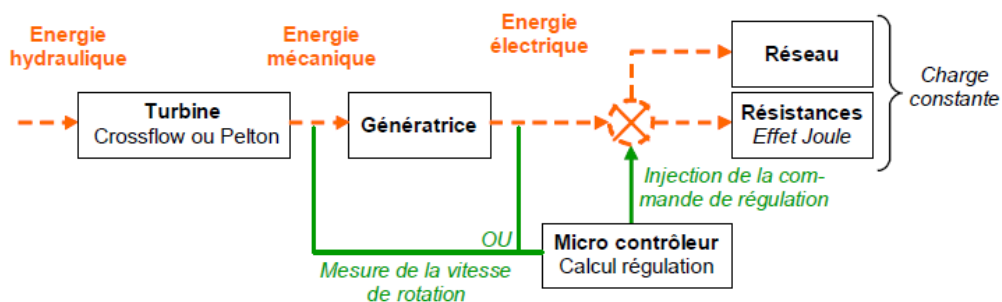


Figure I.7 : La régulation (charge fréquence) [8]

- **La régulation « vitesse débit »**

Elle consiste à adapter le débit de l'eau afin de réguler la vitesse de rotation. Le contrôle du débit se fait par l'intermédiaire de pointeaux amovibles dans les injecteurs de la turbine Pelton et par un ou deux volets rotatifs au niveau de l'injection d'eau dans la turbine Banki-Michell. En général, le contrôle des vannes se fait par l'intermédiaire de vérins qui sont commandés sur le principe de la rétroaction. La vitesse de rotation en sortie de turbine est mesurée à l'aide d'un capteur ou de la fréquence du réseau, l'information étant ensuite transmise à un microcontrôleur qui calcule la course à donner aux vérins pour adapter le débit. Les meilleures régulations sont de type

PID, c'est-à-dire Proportionnelle Intégrale Différentielle qui assure une correction à la fois précise et rapide. Dans la figure I.8 on a schématisé « la régulation vitesse débit »[8].

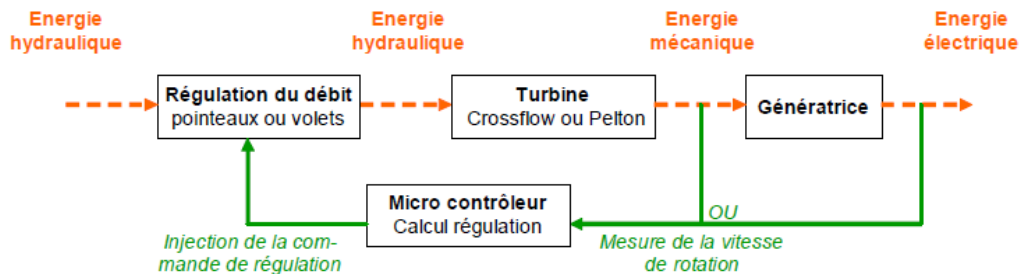


Figure I.8: La régulation (vitesse débit)[8]

-Pompes inversées

La pompe inversée est une pompe standard utilisée comme turbine en inversant le sens d'écoulement de l'eau. D'un coût de construction moins élevé que les autres turbines, elle comporte cependant des inconvénients :

- Elle ne peut travailler qu'à débit constant : une variation du débit entraîne immédiatement une diminution du rendement ;
- En cas de panne réseau elle peut provoquer d'importants coups de bélier dans les conduite ;
- La construction doit être modifiée pour pouvoir fonctionner en turbine ;
- Le rendement est inférieur aux autres turbines[6].

La pompe inversée est représentée par la figure I.9.

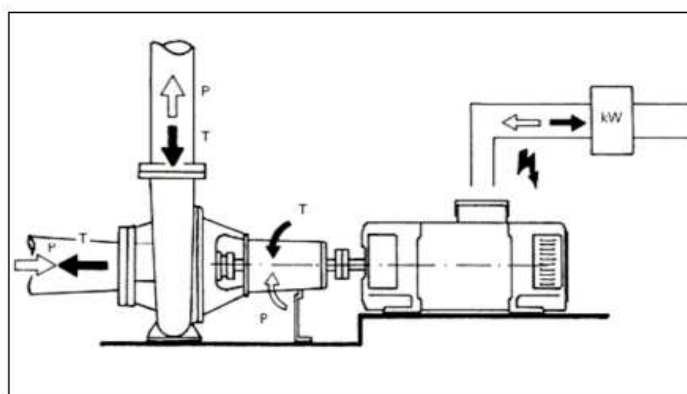


Figure I.9 : Pompe inversée[6]

I.1.3.1.3 Les équipements électriques

▪ La génératrice

Un générateur électromécanique convertit l'énergie mécanique qu'il reçoit à son arbre (turbine) en énergie électrique distribuée au consommateur. Le consommateur peut être:

- le réseau interconnecté qui fixe la tension et la fréquence;
- un réseau isolé auquel le producteur doit garantir une tension ainsi qu'une fréquence qui doit être toutes les deux fixes et stables dans une fourchette admissible pour les appareils du consommateur[12].

Les génératrices utilisées dans les petites centrales hydroélectriques sont de deux grands types :

✓ Le générateur synchrone

Dans ces machines le rotor tourne à la même vitesse que la vitesse du champ tournant (vitesse de synchronisme) d'où l'appellation de machine synchrone, c'est des machines qui convertissent l'énergie mécanique en énergie électrique (alternateurs) ou vice versa (moteurs synchrones) nécessitent une alimentation en courant continu de leur inducteur ou système d'excitation. La machine synchrone est très répandue en tant que génératrice d'électricité. La gamme de puissance de ces machines va d'une dizaine de KVA à plus d'un millier de MVA. Les plus grosses machines sont utilisées dans des centrales nucléaires ou hydrauliques. la figure I.10 représente une machine synchrone[12].

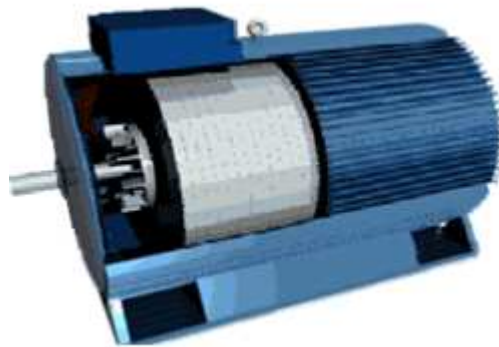


Figure I.10 :la machine synchrone[8]

✓ Le générateur asynchrone

La machine asynchrone, appelée aussi machine à induction, peut, comme toutes les machines électriques, fonctionner aussi bien en génératrice qu'en moteur. C'est toute fois le plus répandu des moteurs électriques, parce qu'il est simple, de construction robuste, et d'un prix de revient relativement modique. Ces avantages sont surtout dus au fait que le rotor n'est branché sur aucune

source extérieure de tension, sauf utilisation particulière avec rotor bobiné. Il doit son nom de machine à induction au fait que le champ tournant du stator induit des courants alternatifs dans le circuit rotorique. La figure I.11 représente une machine asynchrone[12].



Figure I.11:la machine asynchrone[19]

▪ Le transformateur

Le transformateur est une machine statique qui permet de transformer une tension ou un courant d'une certaine fréquence en une autre tension ou un autre courant de même fréquence. Cette machine effectue un transfert d'énergie électrique par voie électromagnétique. Le transformateur comporte deux enroulements, l'un dit primaire qui reçoit la puissance active de la source, l'autre dit secondaire qui restitue à son tour cette même puissance. Les enroulements sont montés sur un circuit magnétique feuilleté. Si la tension d'alimentation appliquée au primaire est plus basse que celle délivrée par le secondaire, le transformateur fonctionnera en élévateur, dans le cas contraire il fonctionnera en abaisseur. Dans les mini centrales la transmission de l'énergie produite nécessite l'installation d'un transformateur élévateur de tension on cas ou celle-ci n'est pas proche d'une ligne basse tension, comme il peut être installé à l'entrée de la mini centrale en abaisseur de tension pour l'alimentation des équipements électriques utilisés dans celle-ci (pompes de refoulement d'eau). La figure I.12 représente un transformateur.

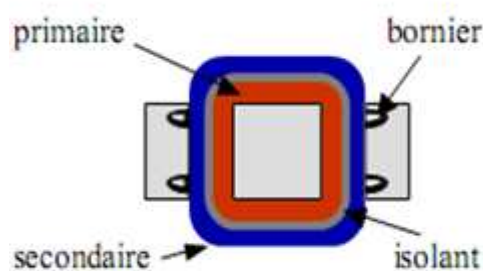


Figure I.12 : Le transformateur [23]

▪ Les pylônes

Le rôle des pylônes est de porter les câbles électriques dans un réseau aérien. Ils doivent être capables de supporter le poids de ces câbles ainsi que celui des composants installés en haut de poteau, tout en résistant aux contraintes mécaniques et aux agressions chimiques du milieu extérieur[8].

➤ Les pylônes en bois

Le bois présente de nombreux avantages qui en font un matériau privilégié lors de la réalisation de petits réseaux ruraux. Il permet entre autre :

- d'être produit et exploité avec des moyens locaux ;
- de présenter une excellente résistance et une bonne flexibilité d'utilisation, tant durant son exploitation que lors de son transport et de son installation.

➤ Les pylônes en béton armé

Le béton armé est une alternative envisageable lorsque l'on ne peut pas se procurer de bois. Il peut être fabriqué localement pour un coût relativement faible. De conception robuste, il possède un bon comportement face aux intempéries et présente une longévité exceptionnelle.

Cependant, la qualité du poteau dépend pour beaucoup du soin apporté à la conception. Les facteurs qui influent sur la résistance du pylône sont :

- la qualité du béton employé, et notamment le dosage ciment – sable ;
- la qualité de l'armature métallique utilisée pour l'ossature du pylône. La résistance du pylône est grandement améliorée si on réalise une précontrainte de l'acier avant moulage ;
- Le degré de qualification de la main d'œuvre est également important, puisque la technique de fabrication n'est pas à la portée de tous.

➤ Les pylônes en acier

L'acier permet de réaliser des pylônes relativement légers et qui peuvent être scindés en deux ou trois morceaux. Cette option permet de faciliter le transport et de monter les pylônes sur le site pour des réseaux peu accessibles. De plus, les caractéristiques physiques de l'acier étant bien connues, le dimensionnement est optimal et aisé.

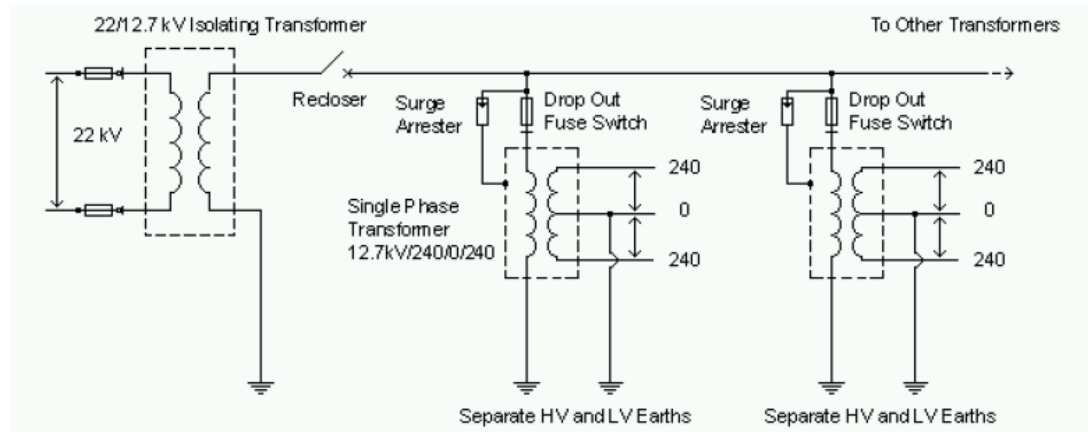
▪ Les lignes de transport

Lorsque la centrale de production de l'électricité est trop éloignée du lieu de consommation, il est indispensable de prévoir une ligne moyenne tension afin d'acheminer l'énergie. Une ligne moyenne tension (MT) permet de limiter les pertes par effet Joule de façon considérable par rapport à ligne basse tension (BT). Une ligne MT a un voltage moyen se situant aux alentours de 5000V. En général, ce sont des lignes triphasées, qui permettent un équilibrage en puissance aisé.

Cependant, il existe une autre technologie, plus simple à mettre en œuvre et qui diminue les coûts d'implantation: les lignes SWER[13].

Les lignes SWER

La ligne SWER ou Single WireEarth Return, est une ligne moyenne tension qui a la particularité de n'être composée que d'un seul fil électrique : le retour s'effectue par la terre.



FigureI.13 : Ligne SWER[13]

I.2 Les implantations possibles sur les réseaux d'eau potable pour une micro-centrale

L'eau potable est souvent fournie à une agglomération en transportant l'eau par une conduite en charge depuis un réservoir d'eau amont. Lorsque la différence d'altitude entre la source et un réservoir, ou une usine de traitement est importante, la pression excédentaire est habituellement dissipée dans des vannes de réduction de pression ou des chambres dites brise énergie[1]. L'installation d'une turbine à l'extrémité de la conduite permet de valoriser cette énergie potentielle en la transformant en électricité. La turbine remplace alors la fonction de brise énergie.

La figure I.14 représente la disposition d'une turbine à l'entrée d'un réservoir

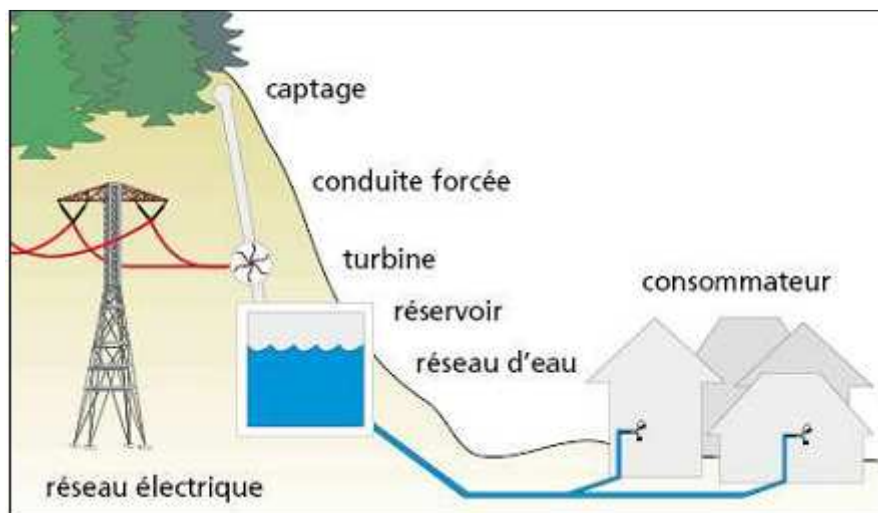


Figure I.14 : Turbine disposée à l'entrée d'un réservoir[1]

Les différents emplacements possibles pour le turbinage des eaux potables sont :

- turbinage sur la conduite entre deux réservoirs ;
- turbinage sur la conduite d'amenée de l'eau de source vers un réservoir ;
- turbinage entre deux zones de pression ;
- turbinage du trop-plein d'un réservoir.

I.3 Principe de fonctionnement

On peut expliquer le principe de fonctionnement d'une micro-centrale hydraulique en se basant sur un principe fondamental qui dit que tout corps soumis à la gravité terrestre, en tombant fournit de l'énergie ; il en est ainsi pour les chutes d'eau. Ainsi, quelque soit sa destination, de l'eau qui coule est une source potentielle d'énergie. Ce principe s'applique surtout aux canalisations des zones montagneuses. Dans lesquels la dénivellation entre l'amont et l'aval est importante. Cette différence d'altitude génère une pression souvent trop élevée pour être supportée par les canalisations ; il est alors nécessaire de la dissiper, du moins partiellement, pour assurer la pérennité des réseaux. La méthode traditionnelle consiste à installer des réducteurs de pression sur les réseaux. Or une pression est une énergie potentielle. Plutôt que de la dissiper à l'aide de ces réducteurs de pression et donc de perdre cette énergie, il est possible de la transformer en électricité par l'intégration de turbines hydrauliques sur le réseau d'eau.

Production de l'énergie électrique dans une centrale hydraulique

L'eau est amenée par une conduite forcée provenant d'un piquage sur une canalisation existante ou à mettre en place. Du fait de la dénivellation, l'eau dans la canalisation est considérée

comme une chute d'eau. Celle-ci fournit de l'énergie qui correspond à de l'énergie hydraulique : c'est l'énergie potentielle de l'eau. Celle-ci va mettre en rotation une turbine hydraulique, installée sur les réseaux, L'énergie hydraulique est alors transformée en énergie mécanique directement utilisable sur un arbre en rotation. L'eau poursuit ensuite son chemin dans la canalisation.

Une fois mise en mouvement, la turbine entraîne un générateur de courant qui va transformer l'énergie mécanique, disponible sur son arbre, en énergie électrique.

Le courant produit à la sortie du générateur doit ensuite être évacué et transporté jusqu'au point de livraison. Lorsque la production d'énergie électrique est injectée au réseau local d'électricité, il faut que la valeur de la tension produite (en général 380 V) soit égale à la valeur des lignes de transport de l'électricité (par exemple 20 000 V). Cette action est réalisée par un transformateur qui permet d'élever la tension[7]. Comme l'explique la figure ci-dessous :

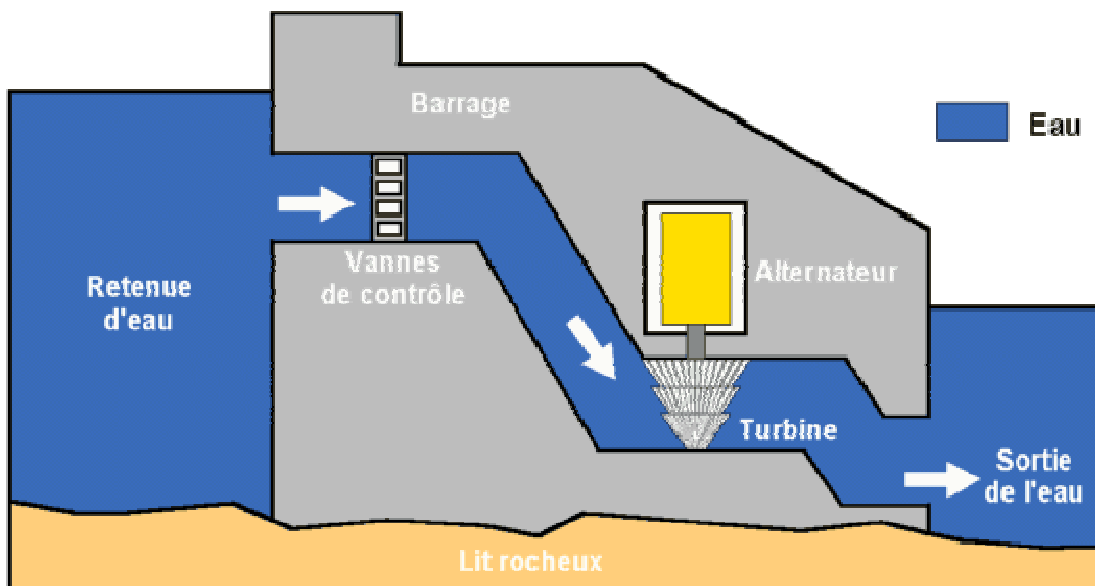


Figure I.15 : principe de fonctionnement une installation hydraulique [12]

I.4 Les grandeurs caractéristiques d'une installation hydraulique

I.4.1 Le débit

Le débit est le volume d'eau traversant une section droite donnée de l'écoulement par seconde, exprimé en $[m^3/s]$ [7].

I.4.2 La chute brute H_b

C'est la différence maximale entre les niveaux de la chute d'eau. La hauteur réelle sur la turbine est inférieure au maximum car il faut tenir compte des frottements sur les éléments de construction et les frottements internes dans l'eau.

$$H_b = \Delta Z + \frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + H_L \quad [\text{m}] \quad (\text{I.1})$$

Avec:

ΔZ : hauteur (énergie potentielle) [m] ;

$\frac{P}{\rho g}$: Hauteur de pression [m] (p est la pression relative, sur ou sous pression, mesurée par rapport à la pression atmosphérique) ;

$\frac{V^2}{2g}$: Hauteur de vitesse (énergie cinétique) [m] ;

g : Accélération due à la pesanteur = 9.81 [m/s²] ;

ρ : Masse volumique de l'eau = 1000 [Kg/m³] ;

H_L : Perte de charge [m][8].

I.4.3 La chute nette H_n

Elle tient compte des pertes de charge hydrauliques dans les ouvrages d'amenée et de restitution[7].

$$H_n = H_b - \Sigma H_L \quad (\text{I.2})$$

Avec :

H_L : Pertes de charge

I.4.4 La puissance hydraulique

La puissance hydraulique disponible dans une pico-centrale électrique s'écrit :

$$P_h = \rho \cdot g \cdot Q_t \cdot H_n \quad (\text{I.3})$$

Avec :

ρ : Masse volumique de l'eau [Kg/m³] ;

g : Accélération de la pesanteur [m/s²] ;

Q_t : Débit turbiné [m³/s] ;

H_n : Chute nette [m][7].

I.4.5 La puissance mécanique

C'est la puissance à la sortie de la turbine, qui est transmise à l'alternateur donné par la relation suivante[7] :

$$P_m = \rho \cdot Q_t \cdot H_n \cdot g \quad (I.4)$$

I.3.6 La puissance électrique

Elle se définit comme la valeur instantanée délivrée, elle correspond à l'énergie produite en unité de temps, elle s'exprime principalement en [W][8].

$$P_{\text{élé}} = \eta_g \cdot P_{\text{mec}} \quad (I.5)$$

$$P_{\text{élé}} = \eta_g \cdot \eta_t \cdot Q_t \cdot H_n \cdot \rho \cdot g \quad (I.6)$$

Avec :

η_g : Le rendement de la génératrice ;

η_t : Le rendement de la turbine ;

I.4.7 La vitesse de rotation ω ou n

Les machines entraînées par une turbine sont conçues pour fonctionner à vitesse constante, en particulier les générateurs d'électricité. La fréquence du courant alternatif produit, qui est proportionnel à la vitesse de rotation de la turbine, doit être absolument maintenue à une valeur fixe de 50 Hz (ou 60 Hz pour certains pays) pour répondre aux exigences des appareils consommateurs.

Le réglage de la vitesse peut être réalisé en agissant sur l'ouverture de la turbine :

- si la puissance consommée baisse, le générateur produit trop et la vitesse augmente. Le régulateur diminue le débit pour réduire la vitesse ;
- si la puissance consommée augmente, le générateur ne produit plus assez et la vitesse diminue.

Le régulateur augmente le débit afin de ramener la vitesse à sa valeur de consigne[13].

I.4.8 Les pertes de charge

Lorsque une certaine quantité d'eau circule à travers une canalisation, cela provoque des frottements, l'ensemble de ces frottements est appelé pertes de charges ou de pression[7].

I.4.8.1 Influence des différents paramètres sur les pertes de charge

- **Longueur de la canalisation** : La perte de charge est directement proportionnelle à la longueur de la canalisation : elle augmente quand la longueur de canalisation augmente.
- **Viscosité du liquide** : plus le liquide est visqueux, plus les frottements donc la perte de charge augmente.
- **Diamètre intérieur** : Quand le diamètre diminue, la perte de charge augmente considérablement. le liquide a plus de difficultés à s'écouler donc les frottements augmentent pour un débit identique.

- **Débit** : Plus le débit augmente, plus les forces de frottement augmentent pour un diamètre identique.
- **Rugosité de la canalisation** : La rugosité correspond à la notion habituelle de présence plus ou moins importante d'aspérités sur une surface. On constate ici que lorsque la rugosité d'une canalisation augmente les frottements seront plus nombreux donc la perte de charge augmentera. La perte de charge est donc fonction du matériau de la canalisation[15].

I.4.8.2 Influence de la perte de charge sur la production de l'énergie électrique

La perte de charge influence négativement sur la production d'énergie, car une perte de charge est une dissipation de pression et plus la dissipation de la pression est importante, moins l'énergie récupérée sera élevée. Cette perte de pression entraîne donc une perte d'énergie ; et si l'énergie récupérée est faible, la production de l'énergie électrique le sera aussi : la perte d'énergie équivaut à une perte de production. La figure I.15 explique cette influence[1].

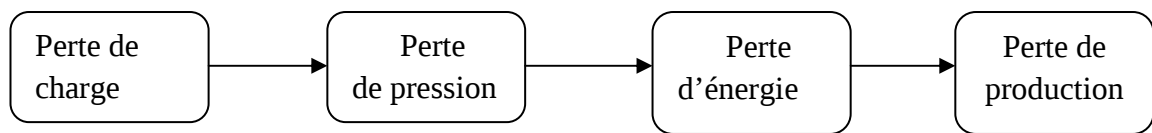


Figure I.16 : Influence de la perte de charge sur la production de l'énergie électrique[1]

I.5 Modes de fonctionnement

I.5.1 Fonctionnement en réseau interconnecté (Parallèle)

On entend par réseau interconnecté, le réseau principal où la tension U et la fréquence f sont rigides, c'est-à-dire que leur valeur ne varie pratiquement pas en fonction de la charge. Dans ce mode de fonctionnement, les paramètres à régler sont les puissances actives et réactives puis le $\cos \phi$. Dans ce mode de fonctionnement on peut trouver des générateurs synchrones et asynchrones.

I.5.2 Fonctionnement en réseau isolé

On appelle réseau isolé, le cas d'une station de production qui fournit de l'énergie électrique à un ou plusieurs consommateurs ; la centrale peut comporter plusieurs générateurs. Dans le cas d'un réseau isolé, les tensions et fréquences délivrées varient en fonction de la charge. Dans ce cas de fonctionnement il est à préciser que les machines asynchrones ne sont pas utilisées. En effet, la régulation est beaucoup plus difficile et plus coûteuse car elle demande une électronique de puissance sophistiquée[12].

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu que le terme micro-centrale s'emploie pour toutes les installations hydroélectriques d'une puissance de 100KW à 1MW. Dans une micro-centrale on peut distinguer quatre composants principaux :

- Les ouvrages de prise d'eau ;
- Les ouvrages d'amenée et de mise en charge ;
- Les ouvrages de production ;
- Les ouvrages de distribution ;

Dans le chapitre suivant nous allons présenter les différents générateurs électriques (synchrone et asynchrone).

Introduction

Un générateur électromécanique convertit l'énergie mécanique qu'il reçoit à son arbre (turbine) en énergie électrique distribuée au consommateur. Il s'agit de l'énergie active. Le consommateur peut être:

- Le réseau interconnecté qui fixe la tension et la fréquence;
- Un réseau isolé auquel le producteur doit garantir une tension ainsi qu'une fréquence fixe et stables dans une fourchette admissible pour les appareils du consommateur. Dans les installations de production d'énergie (petite centrale hydroélectrique), On rencontre deux types de générateurs qui sont :
 - Les alternateurs (machines synchrones) ;
 - Les génératrices asynchrones.

Dans ce chapitre nous allons voir les différents générateurs électriques.

II.1 Machine synchrone

Le terme de machine synchrone est la machine électrique qui tourne exactement à la vitesse de synchronisme correspond à la fréquence des courants et des f.e.m à ses bornes. C'est à dire que la vitesse de rotation est synchronisée à la vitesse du champ tournant statorique.

II.1.1 Description

Malgré que la famille de machine synchrone regroupe plusieurs sous familles, qui vont de l'alternateur de plusieurs centaines de mégawatts au moteur de quelques watts, en passant par les moteurs pas à pas. Néanmoins, la structure de toutes ces machines est relativement proche [17].

II.1.1.1 Le stator

Le stator dit aussi induit, est la partie qui reçoit l'énergie de la ligne d'alimentation. Il comporte un circuit magnétique et un enroulement polyphasé généralement triphasé à p paires de pôles qui induit les f.e.m, il est de forme cylindrique.

II.1.1.2 Le rotor

Le rotor ou inducteur, est constitué d'un enroulement alimenté par courant continu J crée un champ magnétique $2p$ polaire, il a le même nombre de pôle que l'enroulement statorique, ce dernier assure la magnétisation du circuit magnétique.

En pratique il existe trois grandes familles de rotor, ayant pour rôle de générer le champ d'induction rotorique. Les rotors bobinés à pôles lisses, les rotors bobinés à pôles saillants ainsi que les rotors à aimants. La figure (II.1) représente une machine synchrone.

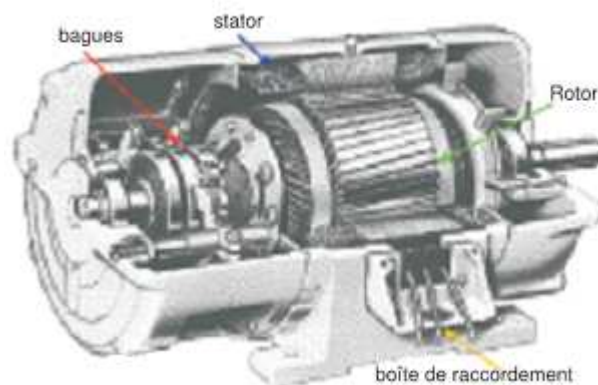


Figure II.1: Machine synchrone [17]

II.1.2 Les différents types de machine synchrone

II.1.2.1 La machine synchrone à rotor à pôles lisses

Le rotor dans les machines à pôles lisses est généralement constitué par un cylindre en acier ferromagnétique dans lequel ont été fraisées les encoches qui abritent le bobinage inducteur. Ces machines comportent généralement deux à quatre pôles (turbo-alternateur). Ce type de construction, caractérisé par un entrefer constant, est utilisé pour des machines de forte puissance destinées à tourner à grandes vitesses. La figure (II.2) montre en coupe une machine synchrone bipolaire à pôles lisse [17].

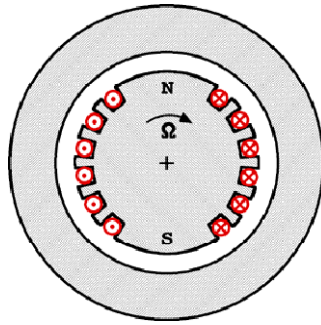


Figure II.2: Rotor à pôles lisses [19]

II.1.2.2 La machine synchrone à rotor à pôle saillant

Le rotor dans ces machines est constitué d'une roue en acier montée sur un arbre vertical et sur laquelle sont fixées les pièces polaires. Les bobinages d'excitation placés sur les pièces polaires sont constitués de barres de cuivre ordinairement nues, mais isolées entre elles par des bandes de mica. L'emploi de conducteurs nus favorise leur refroidissement. Les bobines sont reliées en série de façon que deux pôles voisins soient de polarités contraires. Les extrémités de l'enroulement d'excitation sont liées à deux bagues calées sur un petit cylindre isolant fixés à l'arbre de la machine. L'alimentation des enroulements d'inducteur est assurée par un contact mobile balais-bagues. La figure (II.3) montre en coupe une machine synchrone bipolaire à pôles saillant [17].

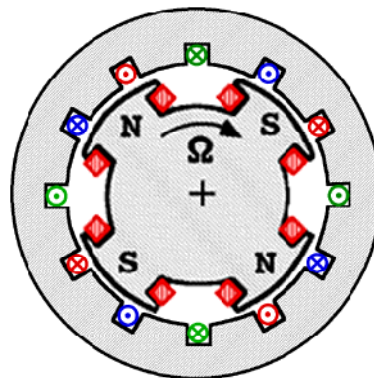
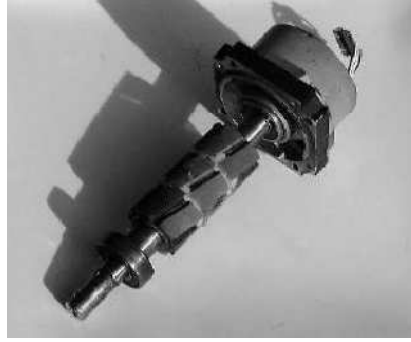


Figure II.3 : Rotor à pôles saillant [19]

II.1.2.3 La machine à rotor à aimant permanent

Les bobinages rotorique sont remplacés par des aimants permanents, ces derniers peuvent être disposés de plusieurs manières sur le rotor. La figure (II.4) montre en coupe une machine synchrone à aimant permanent [17].



La figure II.4 : Rotor à aimants [20]

II.1.3 Champ tournant

On appelle champ tournant, la portion de l'espace où existe un champ magnétique de valeur constant dans la même direction avec une vitesse angulaire constante Ω_s [21]. Les courants alternatifs dans le stator créent un champ magnétique tournant à la vitesse Ω_s défini par :

$$\Omega_s = \omega / P = 2\pi f / P \quad (\text{II.1})$$

Donc :

$$n_s = f / p \quad (\text{II.2})$$

Avec :

Ω_s : vitesse de rotation du champ tournant [rad /s] ;

ω : pulsation des courants alternatifs [rad/s] ;

n_s : vitesse de rotation [tr/s] ;

f : fréquence des courants alternatifs [Hz] ;

p : nombre de paires de pôles.

II.1.4 f.é.m. induite

Si on alimente l'inducteur (rotor) de l'alternateur triphasé par un courant continu et on le fait tourner à une vitesse Ω , on aura création d'un champ tournant dans l'enroulement de l'induit (stator) l'enroulement est siège d'une f.é.m. $e(t)$ de valeur efficace E [19].

$$E = K N \Phi f = K N \Phi p n_s \quad (\text{II.3})$$

Finalement:

$$E = K' \Phi n_s \quad (\text{II.4})$$

Avec :

E : f.é.m. induit (V) ;

K : coefficient de Kapp (caractéristique de la machine) ;

N : nombre de conducteurs d'une phase de la machine ;

Φ : flux maximum à travers un enroulement [Wb] ;

f : fréquence du courant statorique ;

p : nombre de paires de pôles ;

n_s : vitesse de rotation ;

$K' = KNp$: constante globale (caractéristique de la machine).

II.1.5 Utilisation de la machine synchrone en génératrice

Le rotor de l'alternateur est entraîné en rotation de façon mécanique (turbine, moteur à combustion...) à la vitesse de synchronisme, le courant continu circulant dans l'enroulement du rotor engendre dans l'entrefer un champ magnétique dont la composante fondamentale sinusoïdale comporte $2p$ pôles. La théorie du champ glissant montre que le bobinage du stator est le siège des forces électromotrices triphasées dont la composante fondamentale est de pulsation $\omega = p\Omega_s$.

II.1.6 Mise en équation de la génératrice synchrone

Afin d'étudier les différents fonctionnements possibles d'une machine synchrone en régime sinusoïdal, nous allons retenir le schéma équivalent par phase le plus simple possible, en négligeant toutes les pertes ainsi que les phénomènes de saturation. La figure (II.5) montre le schéma équivalent de la machine synchrone [20]:

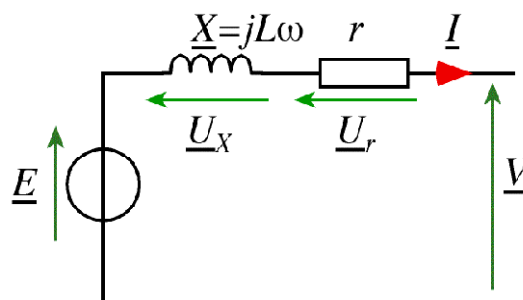


Figure II.5 : Le schéma équivalent de la machine synchrone [20]

Nous noterons :

Ω_s : vitesse du champ tournant ;

L : inductance cyclique de l'enroulement ;

$e(t)$: la f.e.m. créée par le champ magnétique rotorique dans une phase de la machine :

$$e(t) = n_s \frac{d\phi_r}{dt} \quad (\text{II.5})$$

E : la valeur efficace de $e(t)$;

I : la valeur efficace du courant dans une phase de la machine ;

φ : le déphase entre V et I ;

R : résistance de l'enroulement ;

X : réactance synchrone.

II.1.6.1 Force électromotrice d'un alternateur

Le flux magnétique sort de pôle nord, il traverse l'entrefer qui est entre les pièces polaire du rotor et du stator. La f.e.m d'induit crée par le déplacement relatif du circuit par rapport au circuit inducteur avec une vitesse n'est identique à la vitesse de rotation de synchronisme n_s . Les pôles nord prennent la place des pôles sud à cause de la rotation du rotor qui donne un changement de sens du flux magnétique et aussi l'inversion de la f.e.m. Pour cette raison on peut dire que la f.e.m produite est alternative définie par [22]:

$$e = - \frac{N d\Phi}{dt} \quad \text{D'une valeur efficace } E \text{ exprimée par la relation de Boucherot.}$$

$$E = \frac{\pi}{2} K_b N f \Phi \quad E = 2.22 K_b N f \Phi \quad (\text{II.6})$$

Avec :

Φ : flux fourni par un pôle [wb] ;

P : nombre de paire de pôle ;

N : nombre des conducteur de l'induit ;

K_b : coefficient de bobinage de l'enroulement.

II.1.6.2 Expression du couple

Il est possible d'établir une première expression du couple en réalisant un bilan des puissances au niveau de la machine. Si l'on néglige toutes les pertes, on peut écrire [20].

$$P_{\text{électrique}} = P_{\text{mécanique}} = C \cdot \Omega_s = 3 \cdot V \cdot I \cdot \cos(\varphi) = 3 \cdot E \cdot I \cdot \cos(\varphi)$$

Nous avons vu précédemment que :

$$e(t) = n_s \frac{d\phi_r}{dt} \text{ où : } e(t) = n_s \frac{d\phi_r}{d\theta} \frac{d\theta}{dt}$$

Il est possible d'en déduire que la f.e.m. E est de la forme :

$$E = K_e \cdot \phi_r \cdot \Omega_s \quad (\text{II.7})$$

Il apparaît alors que le couple est directement proportionnel au courant dans les phases de la machine ainsi qu'au cosinus de l'angle φ :

$$C \cdot \Omega_s = 3 \cdot E \cdot I \cdot \cos(\varphi) = 3 \cdot K_e \phi_r \cdot \Omega_s \cdot I \cdot \cos(\varphi) \quad (\text{II.8})$$

Un bon contrôle du couple lors de la commande d'une machine synchrone passera donc par un contrôle de l'angle φ .

II.1.6.3 Bilan des puissances – Rendement

La turbine, ou le moteur à essence pour un groupe électrogène, entraîne l'arbre de l'alternateur [20].

➤ La puissance absorbée

La puissance absorbée (P_{abs}) par le générateur synchrone est la puissance mécanique (P_{mec}) à l'arbre $P_{abs} = P_{mec}$.

$$P_a = \Omega_s \cdot T_M = 2\pi n_s T_M \quad (\text{II.9})$$

Avec :

Ω_s : Pulsation de rotation ;

n_s : Vitesse en tr/s ;

T_M : Couple utile sur l'arbre en N.m .

Si l'alternateur n'est pas auto-excité il faut encore tenir compte de l'énergie électrique absorbée par l'excitation (rotor).

$$P_a = \Omega_s \cdot T_M + U_e \cdot I_e = 2\pi n_s T_M + U_e \cdot I_e \quad (\text{II.10})$$

➤ La puissance utile

La puissance active P_{utile} fournie au réseau, ou aux consommateurs, s'exprime en fonction de la tension aux bornes d'une phase et du courant dans chaque phase par:

$$P_{\text{utile}} = 3 \cdot U_{\text{ph}} \cdot I_{\text{ph}} \cdot \cos \varphi \quad (\text{II.11})$$

Et en fonction de la tension composée et du courant de ligne:

$$P_{\text{utile}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ligne}} \cdot I_{\text{ligne}} \cdot \cos \varphi \quad (\text{II.12})$$

La différence entre les puissances absorbée et fournie représente les pertes dans le générateur synchrone:

$$P_{\text{abs}} - P_{\text{utile}} = \sum \text{PERTES} \quad (\text{II.13})$$

➤ Les différentes pertes sont

• Les pertes mécaniques

Ces pertes dues au frottement de l'arbre sur la résistance de l'air (entrefer) au mouvement du rotor. Elles dépendent de la vitesse qui est constante.

• Les pertes fer

Dues aux courants de Foucault induits dans le milieu conducteur, ces pertes dépendent de la fréquence f et l'induction maximum de l'entrefer B_{δ} .

Remarque

Les pertes fer et mécaniques sont constantes dites pertes collectives notées P_C .

• Pertes par effet joules dans l'inducteur

Ce sont des pertes dans l'enroulement rotorique qui dépendent du courant d'excitation.

$$P_{J_e} = U_e I_e = r_e I_e^2 \quad (\text{II.14})$$

Avec :

r_e : Résistance d'enroulement ;

I_e : Intensité du courant inducteur.

• Pertes par effet joule dans l'induit

Ce sont des pertes variables dépendant de la charge est transformées en chaleur.

En monophasé :

$$P_J = RI^2 [\text{W}] \quad (\text{II.15})$$

En triphasée couplage en étoile :

$$P_J = \frac{3}{2} RI^2 [\text{W}] \quad (\text{II.16})$$

R : Résistance aux bornes de l'alternateur.

➤ Le rendement

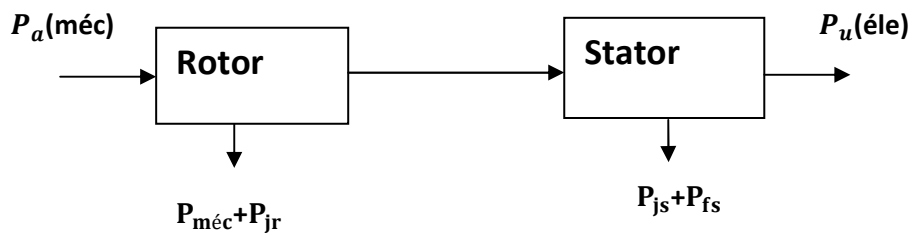
Le rendement est le rapport entre la puissance mécanique de l'alternateur et la puissance électrique fournie, il est donné par :

$$\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{absorbée}}} = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{utile}} + \Sigma P_{\text{pertes}}} \quad (\text{II.17})$$

$$\eta = \frac{\sqrt{3} UI \cos \varphi}{\sqrt{3} UI \cos \varphi + UI_e + \frac{3}{2} RI_e + P_c} \quad (\text{II.18})$$

En général, on peut dire que le rendement est de l'ordre de 90% pour les alternateurs, le facteur de puissance $\cos \varphi$ atteint 0,9 pour les alternateurs de grandes puissance [21].

Le bilan de puissance est représenté sur la figure(II.6) suivante :



La figure II.6:Le bilan de puissance[21]

II.1.7 Compléments sur l'alternateur synchrone

Les alternateurs de très forte puissance sont différents des machines synchrones classiques essentiellement [20]:

- Par leur géométrie : l'augmentation de la puissance des alternateurs entraîne nécessairement une augmentation de leur taille. Afin de réduire les problèmes liés à l'accélération normale à la périphérie du rotor, les fabricants limitent le rayon des machines, ce qui entraîne une augmentation de la longueur ;

- Par leur système d'excitation : les puissances d'excitation des alternateurs de forte puissance sont telles (plusieurs mégawatts) qu'il est intéressant d'utiliser la puissance mécanique disponible sur l'arbre pour fournir le courant d'excitation. On utilise alors un système d'excitation monté sur le même arbre que le rotor de l'alternateur. De plus, il est alors possible de supprimer les contacts glissants nécessaires à l'alimentation de l'excitation : L'excitatrice est en fait un alternateur inversé où le circuit d'excitation est placé sur le stator. Le rotor comporte un système d'enroulement triphasé dont les courants sont redressés afin d'alimenter l'inducteur de l'alternateur.
- Par leur refroidissement : Même si le rendement des alternateurs est excellent (proche de 99% pour un alternateur 1000MW) les puissances dissipées sous forme pertes joules sont énormes (proche de 1MW pour un alternateur 1000MW) et ceci dans un volume restreint. Il est donc nécessaire de mettre en place des systèmes d'évacuation des calories basés sur l'utilisation de fluides caloporteurs circulants dans le stator, dans le rotor ainsi que dans les conducteurs statorique.

II.1.8 Connexion au réseau

Il existe deux type de connexion au réseau sont :

II.1.8.1 Fonctionnement en réseau interconnecté

On entend par réseau interconnecté, le réseau principal où la tension U et la fréquence f sont rigides, c'est-à-dire que leur valeur ne varie pratiquement pas en fonction de la charge.

La génératrice synchrone est analysée du point de vue [12]:

▪ Des réglages des puissances active et réactive ; Pour la machines synchrone, la puissance active fournie par la génératrice est fonction du débit d'eau à disposition. Il faut donc prévoir un régulateur agissant sur le débit (vanne motorisée, distributeur, pointeau, ..). Le régulateur de la turbine a pour fonction de maintenir un niveau d'eau constant (prise d'eau) pour assurer la mise en pression de l'installation ; Le réglage de la puissance réactive se fait au moyen du réglage du courant d'excitation. Pour augmenter la puissance réactive fournie au réseau (inductif $\varphi > 0$), il faut augmenter le courant d'excitation par rapport au fonctionnement à vide (sans charge). Si l'on diminue le courant d'excitation par rapport au fonctionnement à vide, la machine absorbe de l'énergie réactive (réseau capacitif $\varphi < 0$). Dans tous les cas, il faut surveiller le courant du stator pour qu'il ne dépasse pas le courant nominal.

- De leur mise en marche pour produire de l'énergie sur le réseau principal. Les 4 conditions de mise en parallèle d'une génératrice synchrone sur un réseau interconnecté sont:
 - mêmes sens du champ tournant;
 - mêmes fréquences;
 - mêmes tensions;
 - phase nulle entre les 2 systèmes triphasés de tensions.

II.1.8.2 Fonctionnement en réseau isolé

On appelle réseau isolé [12]:

- le cas d'une station de production qui fournit de l'énergie électrique à un ou plusieurs consommateurs, la centrale pouvant comporter 2 générateurs par exemple;
- ou le cas de 2 stations de production qui fournissent en parallèle de l'énergie électrique à plusieurs consommateurs. Dans le cas d'un réseau isolé, les tensions et fréquence délivrées varient en fonction de la charge : $U \neq \text{cte}$ et $f \neq \text{cte}$.

▪ le réglage de la fréquence, c'est-à-dire de la vitesse de rotation, se fait par le réglage du débit d'eau dans la turbine en fonction de la charge. Dans les cas où le débit n'est pas réglé, il faut alors prévoir une charge ballast. Mais dans la machine synchrone il faut Maintenir la vitesse constante égale à la vitesse synchrone.

▪ Réglage de la tension : La valeur à mesurer est la tension aux bornes du (des) consommateur (s) avec pour consigne la tension nominale. Dans les machines synchrones se fait par le réglage du courant d'excitation par l'intermédiaire d'un régulateur de tension.

II.2 La machine asynchrone

II.2.1 Description

On appelle machine asynchrone une machine à courant alternatif dont la vitesse de rotation du rotor est inférieure à celle du champ magnétique du stator et dépend de la charge. Une machine asynchrone, de même que d'autres machines électriques, est réversible, c'est-à-dire peut fonctionner en moteur et en génératrice. Elle est constituée de deux armatures coaxiales : l'une fixe appelée le stator et l'autre mobile appelée le rotor, ces armatures comportent des encoches dont on fait loger le bobinage. La figure (II.7) représente la constitution d'une machine asynchrone [17].

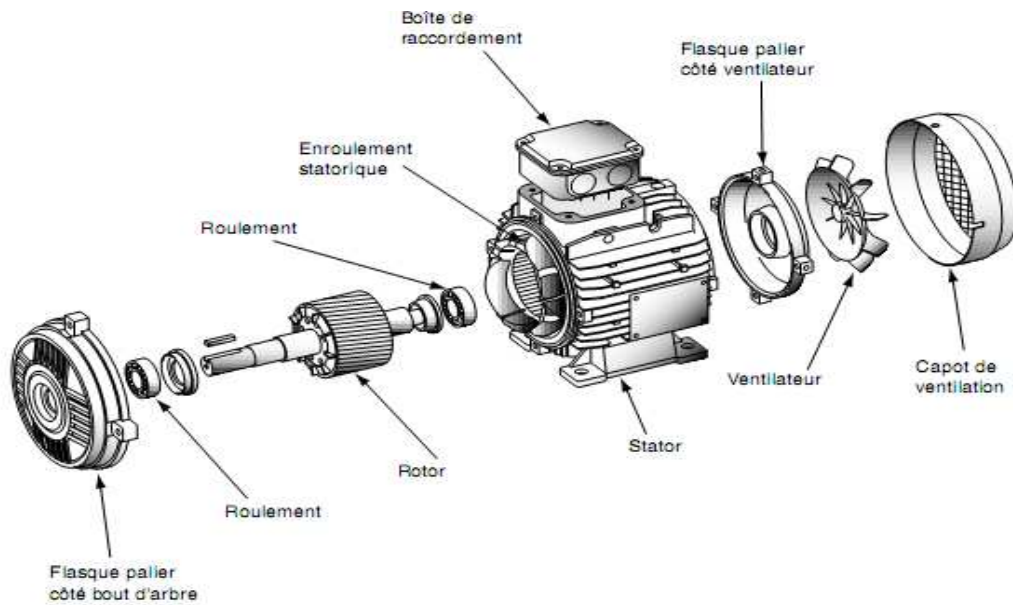


Figure II.7 : Constitution d'une machine asynchrone [19].

• Le stator (inducteur)

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique statorique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine.

• Le rotor (induit)

Comporte un bobinage en court-circuit. Il peut être constitué aussi d'un cylindre massif en matériau conducteur. Dans les deux cas, le bobinage rotorique forme un circuit fermé sur lui-même.

• Entrefer

C'est la partie d'air entre le stator et le rotor et doit être très étroit pour éviter les pertes de flux.

• Le bobinage

On peut effectuer le bobinage d'une machine tournante de plusieurs façons, mais on utilise habituellement deux enroulements à une seule ou à deux couches au stator, mais vu la forme des sections on distingue trois types d'enroulements les plus utilisés ; l'enroulement concentrique, imbriqué et ondulé. Chaque type présente des avantages dans certaines applications. L'enroulement imbriqué s'emploie généralement pour le bobinage des stators des moteurs de quelque dizaine de kilowatt et plus. L'enroulement ondulé est idéale

pour les rotors des moteurs asynchrones à bague. Dans le cas de bobinage petits moteurs asynchrones, particulièrement lorsque le bobinage est mécanisé, on utilise généralement l'enroulement concentrique. Leur disposition dans les encoches différencie ces différents types d'enroulement. L'enroulement concentrique est un bobinage obligatoirement à couche unique, de telle sorte que chaque encoche contient un seul côté de bobine.

- **Glissement**

Le rotor tourne à la vitesse Ω plus petite que la vitesse de synchronisme Ω_s . On dit que le rotor « glisse » par rapport au champ tournant. Ce glissement g va dépendre de la charge.

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad (\text{II.19})$$

Avec:

n_s : vitesse de rotation de synchronisme du champ tournant [tr/min].

n : vitesse de rotation du rotor [tr/min].

- **Vitesse de synchronisme**

La vitesse de synchronisme des moteurs asynchrones triphasés est proportionnelle à la fréquence du courant d'alimentation et inversement proportionnelle au nombre de paires de pôles constituant le stator.

$$n_s = \frac{60 f}{p} \quad (\text{II.20})$$

Avec :

n_s : Vitesse de synchronisme [tr/min] ;

f : fréquence [Hz] ;

p : nombre de paires de pôles.

- **Le champ tournant**

Le stator supporte trois enroulements décalés de 120° , alimentés par une tension alternative triphasée ces trois bobines produisent un champ magnétique variable qui a la particularité de tourner autour de l'axe du stator suivant la fréquence de la tension

d'alimentation, ce champ magnétique est appelé champ tournant. La figure (II.8) suivante schématise la création du champ tournant.

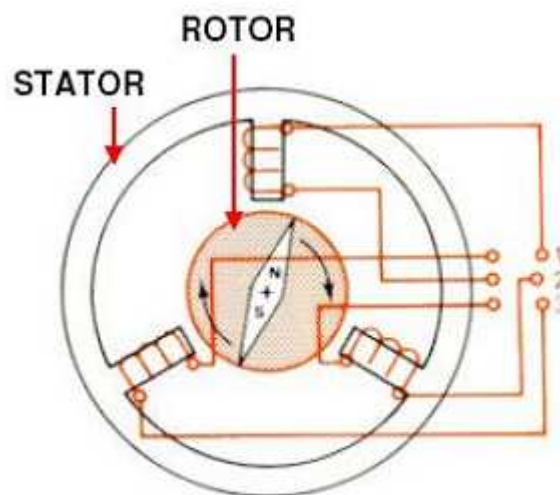


Figure II.8 : Le champ tournant[17]

II.2.2 Les différents types de machines asynchrone

On a deux types de machines asynchrone :

- La machine asynchrone à rotor bobiné ;
- La machine asynchrone à cage.

II.2.2.1 Machine asynchrone a cage d'écureuil

Le circuit du rotor est constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques formant les extrémités, le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil. Bien entendu, cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique analogue

à celui du moteur à rotor bobiné. Les barres sont faites en cuivre, en bronze ou en aluminium, suivant les caractéristiques mécaniques et électriques recherchées par le constructeur. Dans certaines constructions, notamment pour des moteurs à basse tension (par exemple 230/400 V), la cage est réalisée par coulée et centrifugation d'aluminium [12]. La figure (II.9) représente un rotor en cage d'écureuil.

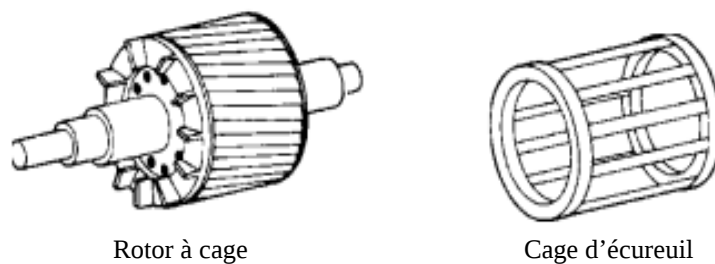


Figure II.9 : Rotor à cage avec une cage d'écureuil[25]

Ce type de moteur, beaucoup plus aisé à construire que le moteur à rotor bobiné est par conséquent d'un prix de revient inférieur et a une robustesse intrinsèquement plus grande. Il n'est donc pas étonnant qu'il constitue la plus grande partie du parc des moteurs asynchrones actuellement en service. La plupart des applications utilisant cette machine sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais de collecteur ou de contacts glissants sur les bagues, la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans la condition parfois extrême. Son inconvénient majeur est qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et faible couple). C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développés deux autres types de cages (rotor à double cage et rotor à encoches profondes).

II.2.2.2 Machine asynchrone à rotor bobiné

Dans ce type de moteur le rotor est constitué de bobines de fil isolé placées dans des encoches et reliées, comme le bobinage statorique, de façon à réaliser un enroulement

triphasé. En fonctionnement normal, les trois phases sont court-circuitées entre elles. Sous l'action du champ tournant, des tensions sont induites dans les conducteurs rotoriques. Ces derniers sont alors parcourus par des courants induits (courants de Foucault) qui créent le champ tournant induit. L'interaction du champ exciteur et du champ induit crée un couple moteur responsable de la rotation du moteur. D'après la loi de Lenz, le système réagit en s'opposant à la cause du phénomène d'induction magnétique, c'est-à-dire au déplacement relatif du champ tournant par rapport aux conducteurs rotoriques [12]. Il est aussi appelé moteur à bagues. Le rotor bobiné est représenté par la figure (II.10) :

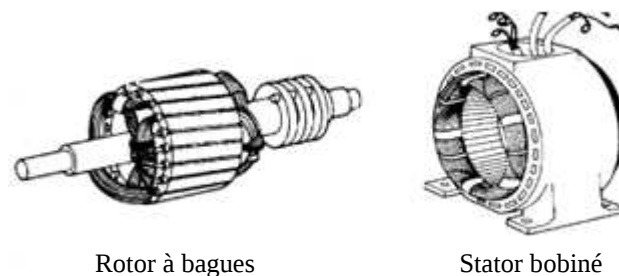


Figure II.10 : Rotor à bagues avec un stator bobiné[25]

Bien que le moteur à bagues soit plus coûteux que le moteur à cage, il offre, cependant, les avantages suivants :

- Son courant de démarrage est moins élevé que celui d'un moteur à cage lorsqu'on intercale trois résistances extérieures dans l'enroulement triphasé du rotor ;
- Son couple de démarrage est alors supérieur à celui du moteur à cage ordinaire ;
- Sa vitesse peut être réglée au moyen de résistances extérieures ;

En plus de convenir aux charges qui demandent une vitesse variable, ce moteur s'adapte parfaitement aux charges qui exigent une période de démarrage prolongée, accompagnée d'un couple de démarrage élevé.

II.2.3 Utilisation de la machine asynchrone en génératrice

Comme nous l'avons dit au paravent la machine asynchrone peut fonctionner en générateur mais sous certaines conditions :

- elle doit être entraînée (turbine) à une vitesse supérieure à la vitesse synchrone; ainsi le glissement est négatif. Pour un fonctionnement nominal en génératrice, la puissance électrique fournie correspondra environ à la puissance mécanique nominale en moteur. Le glissement sera proche, au signe près, du glissement nominal.
- la machine asynchrone consomme toujours de la puissance réactive, aussi bien en moteur qu'en générateur du fait que l'enroulement statorique est toujours l'enroulement exciteur. Cette puissance réactive sera fournie par le réseau ou par une batterie de condensateurs[12].

II.2.3.1 Principe de fonctionnement

Pour que la machine fonctionne en génératrice, il faut que le rotor tourne dans le sens du champ tournant à une vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme (vitesse du champ tournant) exprimée par l'équation suivante :

$$\omega = \frac{\omega_s}{p} \quad (\text{II.21})$$

Avec :

P :le nombre de pair de pôles du stator.

Si le rotor tourne au synchronisme chacun de ses enroulements embrasse un flux statorique constant et n'est donc siège d'aucune f.e.m par conséquent, la machine ne transforme aucune énergie. Si le rotor tourne à une vitesse ω_r différente de ω_s , les enroulements rotorique voient un flux statorique variable, il apparaîtra à leurs bornes un système de f.e .m triphasé de pulsation P ($\omega - \omega_r$) la valeur relative de la différence ($\omega - \omega_r$) par rapport à la vitesse ω_s est appelée glissement [17].

$$g = \frac{\omega - \omega_r}{\omega_s} \quad (\text{II..22})$$

De cette définition, il en résulte que :

Si on exerce un couple résistant sur l'arbre, la machine ralentit ($0 < g < 1$), le champ du stator tend à accélérer le rotor pour atteindre la vitesse de synchronisme, ce qui lui permet d'absorber du réseau, une énergie électrique qu'elle transforme en énergie mécanique, la machine fonctionne dans ce cas en moteur. Si on exerce sur le rotor un couple telle que la vitesse ω_r devienne supérieure à ω_s ($0 > g > -1$), le champ statorique tend à la ramener au synchronisme, elle développe ainsi un couple résistant et absorbe de l'énergie mécanique

qu'elle va restituer au réseau, la machine fonctionne alors en générateur. Le générateur asynchrone présente deux modes de fonctionnements différents :

➤ **Fonctionnement non autonome**

Dans ce mode de fonctionnement, la génératrice est couplée à un réseau assez puissant. Ce dernier impose alors à la génératrice sa propre tension et sa propre fréquence. Par ailleurs, il lui fournit automatiquement l'énergie réactive dont il a besoin pour son fonctionnement [12].

➤ **Fonctionnement autonome**

Dans ce mode de fonctionnement, la génératrice asynchrone est isolée du réseau et entraînée à une vitesse suffisante. Le fonctionnement autonome nécessite l'apport de l'énergie réactive qui dans ce cas est fournie par une batterie de condensateurs qui sont montés en parallèle avec le primaire (stator) [12].

II .2.3.2 Bilan des puissances

Le bilan de puissance pour une génératrice asynchrone est représenté par la figure (II.11).

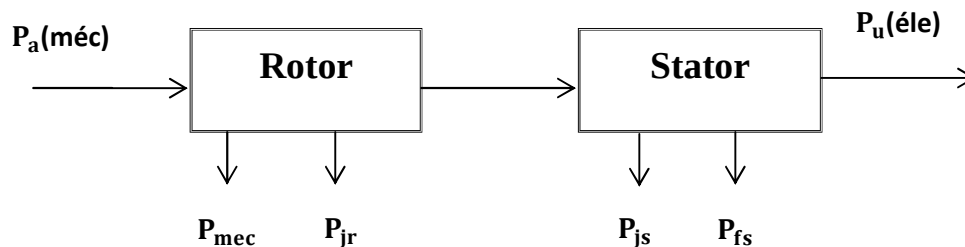


Figure II.11 : Le bilan de puissance [17]

➤ **Puissance absorbée**

L'arbre de la génératrice asynchrone est entraîné par une turbine hydraulique, donc la puissance absorbée (p_{abs}) par la génératrice asynchrone est une puissance mécanique (p_{mec}), à l'arbre $p_{abs} = p_{mec}$.

$$p_a = p_{mec} = C_{em} \cdot \Omega \quad (II.23)$$

Avec :

C_{em} : Le couple électromagnétique.

Ω : La vitesse du rotor.

➤ Le couple électromagnétique

Il est généré par le flux tournant réel quid est le flux d'entrefer résultant des deux flux rotorique et statorique. Le couple électromagnétique en fonction du glissement est donné par l'expression suivante :

$$C_{em} = 3P \frac{V_s^2 \frac{R_r'}{g}}{\omega_s (N_r \cdot \omega_s)^2 + \left(\frac{R_r'}{g}\right)^2} \quad (II.24)$$

Pour une machine à p paires de pôles on a :

$$\Omega = (1 - g) \frac{\omega_s}{p} \quad (II.25)$$

La figure (II.12) représente le couple en fonction de glissement :

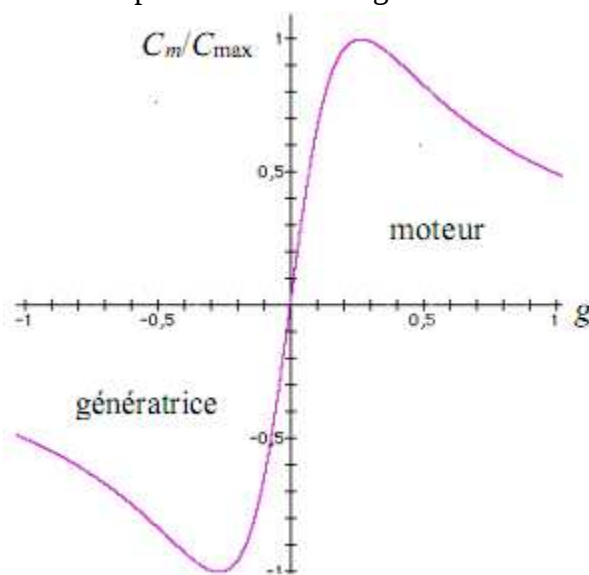


Figure II.12: Courbe représentant le couple en fonction du glissement [19]

De la caractéristique statique d'une MAS est réversible, elle est représentée par la figure précédente. On en déduit que cette machine peut fonctionner en génératrice pour $g < 0$ ("hypersynchronisme" : $\Omega > \Omega_s$).

➤ **La puissance utile**

La puissance active p_{utile} fournie au réseau, ou aux consommateurs, s'exprime en fonction de la tension composée et du courant de ligne:

$$p_u = \sqrt{3} UI \cos \varphi \quad (\text{II.26})$$

Avec :

U: la tension entre deux bornes du générateur

I : courant en ligne.

La différence entre les puissances absorbée et fournie représente les pertes dans la génératrice asynchrone:

$$p_a - p_u = \sum \text{pertes} \quad (\text{II.27})$$

➤ **Les différentes pertes sont**

- **Les pertes mécaniques :** Elles regroupent les pertes dues aux frottements et à la ventilation.
- **Les pertes fer :** par hystérésis et courants de Foucault dues aux champs magnétiques alternatifs. Au rotor, elles sont négligeables du fait de la faible fréquence du champ.
- **Pertes par effet joules dans le rotor :**

$$p_{jr} = z_r \cdot R_r \cdot I_r \quad (\text{II.28})$$

Avec :

R_r : La résistance d'une barre rotorique ;

z_r : Le nombre de barres rotorique.

- **Pertes par effet joule dans le stator :**

$$p_{js} = 3 R_s \cdot I_s \quad (\text{II.29})$$

Avec :

R_s : La résistance du stator.

➤ Le rendement

C'est le rapport entre la puissance mécanique de la génératrice et la puissance électrique fournie, il est donné par :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{P_u + \Sigma p_{\text{pertes}}} \quad (\text{II.30})$$

II.2.3.3 Connexion au réseau

Il existe deux types de connexion au réseau :

➤ Fonctionnement en réseau interconnecté

- Réglage de la puissance active

La puissance active fournie par la génératrice est fonction du débit d'eau à disposition. Il faut donc prévoir un régulateur agissant sur le débit (vanne motorisée, distributeur, pointeau, ...). Le régulateur de la turbine a pour fonction de maintenir un niveau d'eau constant (prise d'eau) pour assurer la mise en pression de l'installation.

- Réglage La puissance réactive

La machine asynchrone absorbe toujours de la puissance réactive, qu'elle fonctionne en moteur ou en génératrice. L'amplitude de cette puissance réactive varie avec la charge [12].

Si elle doit être compensée pour améliorer le facteur de puissance d'une valeur $\cos \varphi_1$ à une autre $\cos \varphi_2$, il faut installer une batterie de condensateurs, à raison d'un condensateur par phase de capacité C_{phase} avec :

$$C_{\text{phase}} = \frac{P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)}{3 \cdot \omega \cdot U_{\text{cphase}}^2} \quad (\text{II.31})$$

La compensation parfaite est celle qui correspond à $\cos \varphi_2 = 1$ ($\varphi_2 = 0$). En pratique la compensation se fait à $\cos \varphi_2 = 0,9$. Pour les génératrices asynchrones de petite puissance, l'angle φ_1 , correspondant aux conditions nominales, il peut être estimé par :

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_{\text{mec n}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ligne n}} \cdot I_{\text{ligne n}}} \quad (\text{II.32})$$

- Mise en marche

La mise en marche de la génératrice asynchrone est plus simple que pour la machine synchrone.

1-Démarrer le groupe au moyen de la turbine de manière à atteindre approximativement la vitesse synchrone.

2- Enclencher le disjoncteur I (voir la figure II.14) permettant d'interconnecter la génératrice asynchrone et le réseau. Une pointe de courant (environ 5 fois le courant nominal) apparaîtra au moment de l'enclenchement. La machine asynchrone est capable de supporter cette surintensité temporaire. Cependant, les protections doivent être prévues en conséquence.

3-Enclencher la batterie de condensateurs, s'il y a compensation du facteur de puissance.

4- Pour augmenter la puissance active fournie au réseau, augmenter le débit d'eau dans la turbine [12].

Remarque :

L'échange de puissance réactive avec le réseau dépend de la valeur des capacités de la batterie de condensateurs.

➤ Fonctionnement en réseau isolé

- Réglage de la fréquence

Il faudrait varier la vitesse (au-dessus de la vitesse du synchronisme). En pratique, on peut obtenir une fréquence plus ou moins constante ($\pm 5\%$) par le maintien d'une tension constante.

- Réglage de la tension

Devrait se faire en variant les condensateurs d'excitation en fonction de la charge. Cependant, ceci étant impossible à un coût raisonnable, il faut choisir une capacité moyenne de manière à ce que les variations de tension ne dépassent pas les limites de $\pm 10\%$.

Avantages de la machine asynchrone :

- L'absence d'entretien ;
- L'absence de connexion avec la partie tournante (sauf moteur à bagues) ;
- La Robustesse ;
- L'étanchéité élevée ;
- Le coût relativement faible par rapport à un moteur à courant continu.

II.2.5 Machine asynchrone doublement alimentée (MADA)

La MADA est un générateur à induction à rotor bobiné. Les enroulements du stator sont connectés directement au réseau triphasé de distribution alors que les enroulements du rotor sont reliés à des convertisseurs de puissance bidirectionnels en courant : la puissance traversant ces convertisseurs peut alors être absorbée ou produite par la machine, selon le mode de fonctionnement. Son rôle est la production de l'énergie électrique en transformant l'énergie mécanique fournie par la turbine en énergie électrique sous forme de courant alternatif qu'elle peut fournir à une installation autonome ou débiter directement sur un réseau. La MADA se compose principalement de deux parties, le stator triphasé identique à celui des machines asynchrone classique, et le rotor tourne à l'intérieur de la cavité de la machine et sépare du stator par un entrefer. Le circuit électrique du stator est constitué de trois enroulements identiques couplés en triangle ou en étoile, la seule différence que celui du rotor est relié aux bagues sur lesquelles glissent les balais [14]. La figure (II.13) présente la structure de la MADA.

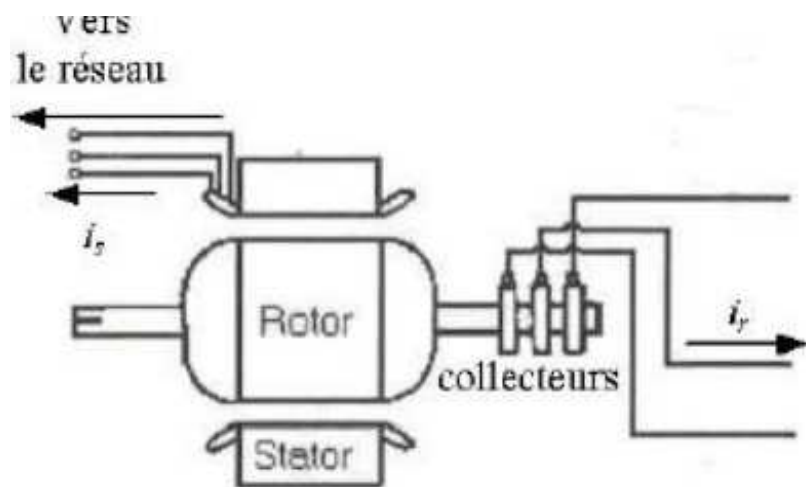


Figure II.13: Structure de la MADA bobiné [14]

- **Fonctionnement à vitesse fixe**

- Système électrique plus simple,
- plus grande fiabilité,
- Pas besoin de système électrique de commande,
- moins cher.

- **Fonctionnement a vitesse variable**

En générale, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur, mais la différence avec les autres types de machine réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. En effet nous savons qu'une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur. Par contre dans le cas de la MADA, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper synchronisme ou en hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur[14].

- **Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone ($g \geq 0$)**

Le fonctionnement en mode hypo synchrone du moteur est réalisé lorsqu'il s'agit d'une plage de réglage de vitesse étendant de la vitesse de synchronisme Ω_s à une vitesse plus faible que Ω_{min} dans ce cas de fonctionnement la puissance est fournie par le réseau au stator ; la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, "la puissance de glissement" est renvoyée sur le réseau via les convertisseurs connectés au rotor, c'est la cascade hypo synchrone[14].

- **Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone ($g < 0$)**

Le fonctionnement en mode hyper synchrone du moteur est réalisé lorsque la vitesse de la machine peut varier au-delà de la vitesse de synchronisme. Dans ce mode de fonctionnement une partie de la puissance fournie par le réseau va au rotor via les convertisseurs statiques et est convertie en puissance mécanique.

- **Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone ($g \geq 0$)**

La puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator au rotor. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement.

➤ **Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone ($g < 0$)**

La puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en perte joule dans le rotor.

Avantages et inconvénients de la MADA

Les avantages et les inconvénients de la machine asynchrone à double alimentation sont présentés dans le tableau ci-dessous :

TableauII.1 : Les avantages et les inconvénients de la MADA[14]

Avantages	Inconvénients
Fonctionnement à vitesse variable $\pm 30\% \omega_{syn}$.	Prix de l'électronique de puissance relativement élevée.
La possibilité de fonctionner à couple constant au de la de vitesse nominal.	Contrôle-Commande complexe.
La possibilité de mesure les courants au stator et au rotor contrairement à la machine à cage.	Machine plus volumineuse, elle est plus long à cause de balais.
Connexion de la machine plus facile à gérer.	Maintenance de boite à vitesse et (balai-bague).
La puissance massique est plus légère que les autres machines à grande puissance	

Remarque

La machine asynchrone à double alimentation à deux avantages sur la machine à cage classique :

- La production de la puissance électrique quel que soit sa vitesse de rotation (hypo ou hyper synchrone).
- La récupération de la puissance de glissement.

II.3 Comparaison entre les générateurs synchrone et asynchrone

II.3.1 Construction

- Machine asynchrone:

Les rotors à cage d'écureuil sont simples et robustes. Il en résulte une grande fiabilité. Les moteurs asynchrones sont fabriqués en très grande série pour les petites et moyennes puissances.

- Machine synchrone:

Elle nécessite une bobine d'excitation qui doit être alimentée en courant continu, soit par une source externe à travers des bagues et des charbons, soit par l'intermédiaire d'une machine auxiliaire alternative et des diodes tournantes[12].

II.3.2 Synchronisation

- Machine asynchrone:

Pas nécessaire. Toutefois, à l'enclenchement sur le réseau, il apparaît une pointe de courant dont la durée dépend de la valeur du glissement au moment de la connexion.

- Machine synchrone:

Pour un fonctionnement sur un réseau interconnecté, nécessité d'un synchroscope pour contrôler les 3 conditions de synchronisation. Pour les machines de très petite puissance (<1kVA), on peut à la limite se dispenser de cet équipement.

II.3.3 Régulation de U et f en réseau isolé et système d'excitation

- Le système hydraulique comprend un réglage de débit

Dans ce cas, la fréquence est ajustée par le réglage de vitesse, donc du débit.

Pour le réglage de la tension:

- Machine asynchrone: Excitation par des capacités en parallèle. En général, 2 valeurs de capacités suffisent à garantir la tension dans la tolérance de $\pm 10\%$.

La commutation sur l'une ou l'autre des capacités dépendra du niveau de tension (relais detension).

- Machine synchrone: Régulateur de tension agissant sur le courant d'excitation.

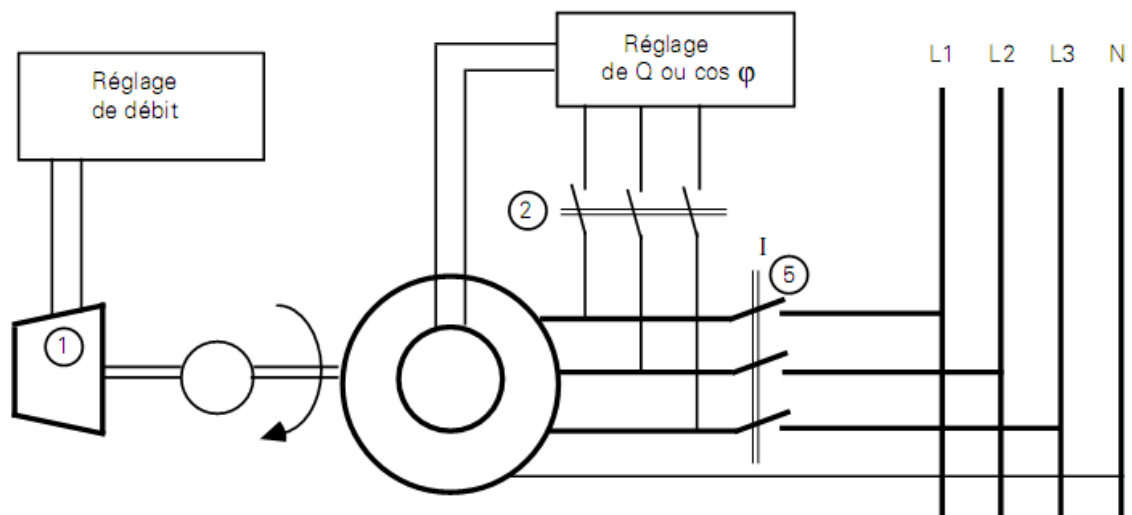


Figure II.14 :Schéma global d'une installation (machine synchrone) avec réglages de débit d'eau et de courant d'excitation[12]

Avec :

- 1 : Turbine ;
- 2 : Contacteur d'alimentation de l'excitation ;
- 5 : Disjoncteur de connexion au réseau.

• Le système hydraulique ne comprend pas de réglage de débit

La fréquence et la tension sont réglées par une charge ballast (paragraphe II.1.8.2) :

1) Si la puissance réactive de la charge est constante

- Machine asynchrone: Une seule capacité suffit
- Machine synchrone: Régulateur de tension pas nécessaire

2) Si la puissance réactive de la charge varie:

- Machine asynchrone: Il faut prévoir deux capacités dont les valeurs seront calculées de manière à ce que la variation de tension en fonction de la charge ne sorte pas de la tolérance de $\pm 10\%$.

La commutation sur l'une ou l'autre des capacités dépendra du niveau de tension (relais de tension). La figure II.15 représente le schéma global sans réglage de débit (cas d'une machine asynchrone) avec compensation.

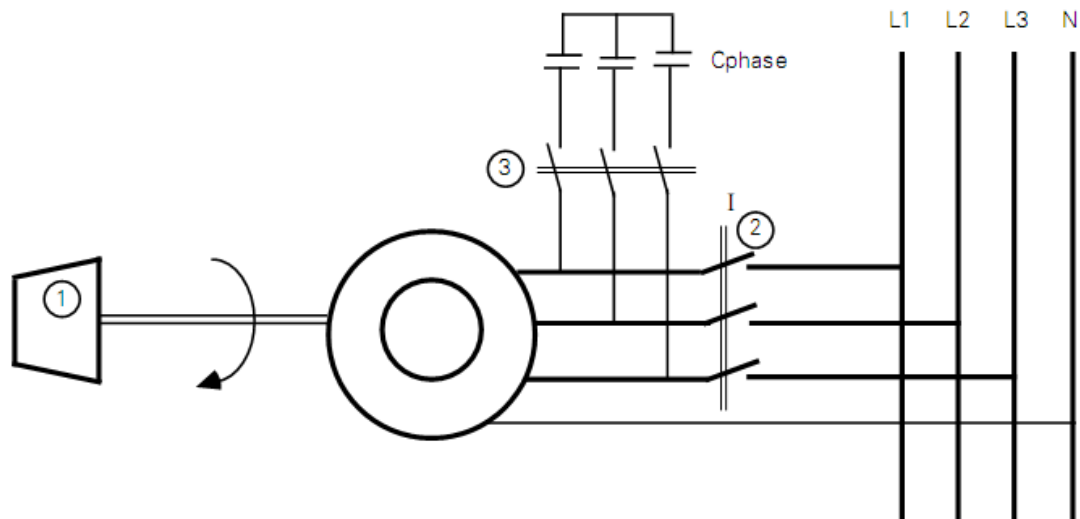


Figure II.15: Schéma global sans réglage de débit (cas d'une machine asynchrone) avec compensation [12].

Avec :

1 : Turbine;

2 : Disjoncteur de connexion au réseau;

3 : Contacteur d'enclenchement des condensateurs.

– Machine synchrone: Régulateur de tension agissant sur le courant d'excitation. La figure II.16 représente le schéma global sans réglage de débit à $I_{ext} = \text{constante}$ (cas d'une machine synchrone)

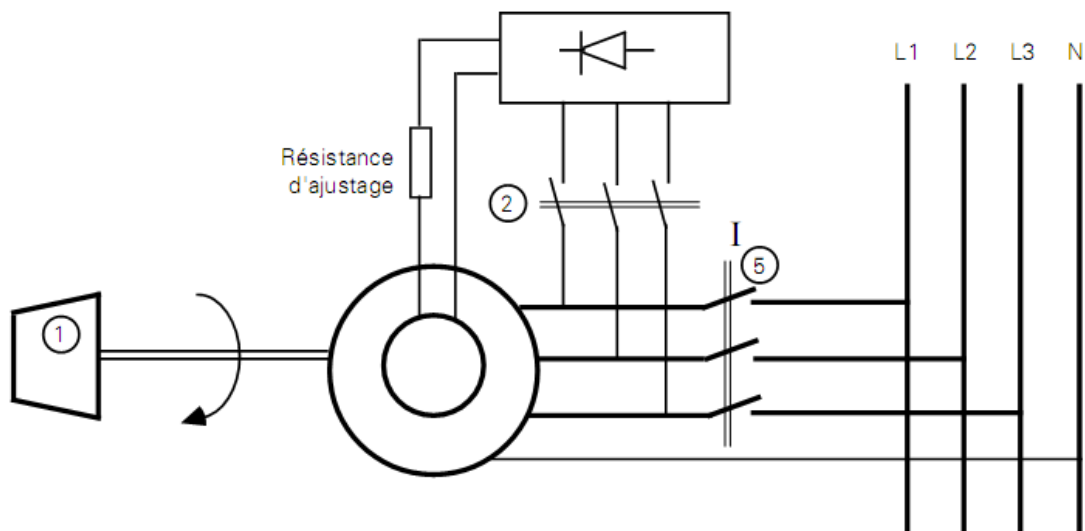


Figure II.16: Schéma global sans réglage de débit à $I_{ext} = \text{constante}$ (cas d'une machine synchrone) [12]

Avec :

- 1 : Turbine
- 2 : Contacteur d'alimentation de l'excitation
- 5 : Disjoncteur de connexion au réseau

II.3.4 Rendement

- Machine asynchrone:

Le rendement et le facteur de puissance diminuent fortement à puissance réduite (débit inférieur au débit nominal).

Le rendement est inférieur à celui des machines synchrones. Pour l'améliorer, on peut bobiner spécialement les machines.

- Machine synchrone:

Le rendement est encore bon à charge partielle[12].

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait un rappel sur les différents types machine synchrone et asynchrone, leurs constitution, principe de fonctionnement ainsi que leurs mode de fonctionnement.

On a vu que les deux machines sont réversibles (peuvent être utilisées en moteur et en générateur), les deux générateurs sont utilisés dans les mini centrales hydroélectriques, mais les plus utilisés sont les générateurs asynchrone ; vue leurs robustesse, faible cout et surtout leurs possibilité de fonctionnement à des vitesses variables.

Dans le prochain chapitre on s'intéressera à la modélisation de la génératrice asynchrone.

Introduction

La plupart des génératrices utilisées par les micro-centrales hydroélectrique sont des génératrices asynchrones triphasées. Celles-ci ont plusieurs avantages : elles sont robustes, leur coût est faible et ont une simplicité mécanique. Par ailleurs, leurs inconvénients se trouvent au niveau de la consommation d'énergie réactive, qu'elles tirent soit du réseau, soit elles sont compensées par une batterie de condensateurs d'où la possibilité de fonctionnent autonome. Il existe deux types de machine asynchrone : la machine asynchrone à cage d'écureuil et la machine asynchrone à rotor bobiné. Dans ce chapitre nous allons nous intéresser à la machine asynchrone à cage d'écureuil, la plus utilisée dans l'hydroélectricité tournant à une vitesse variable, en partant d'un certain nombre d'hypothèses simplificatrices pour la modélisation mathématique de la machine.

III.1 Représentation de la machine asynchrone dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation

Dans la figure.III.1 est schématisée la machine asynchrone triphasée avec ses trois axes a ,b et c qui représentent les enroulements statorique et rotorique, et les deux axes magnétiques (Od) qui est l'axe direct et (Oq) qui est l'axe en quadrature Les angles définis sur la figure.II.1. Sont :

$(O_{as}, O_d) = \theta_s$: Angle entre l'axe statorique as , et l'axe direct O_d .

$(O_{bs}, O_d) = \theta_s - \left(\frac{2\pi}{3}\right)$: Angle entre l'axe statorique bs , et l'axe direct O_d .

$(O_{cs}, O_d) = \theta_s - \left(\frac{4\pi}{3}\right)$: Angle entre l'axe statorique cs , et l'axe direct O_d .

$(O_{ar}, O_d) = \theta_r$: Angle entre l'axe rotorique ar , et l'axe direct O_d .

$(O_{br}, O_d) = \theta_r - \left(\frac{2\pi}{3}\right)$: Angle entre l'axe rotorique br et l'axe direct O_d .

$(O_{cr}, O_d) = \theta_r - \left(\frac{4\pi}{3}\right)$: Angle entre l'axe rotorique cr et l'axe direct O_d .

$(O_d, O_q) = \frac{\pi}{2}$: Angle entre l'axe rotorique O_d et l'axe direct O_q

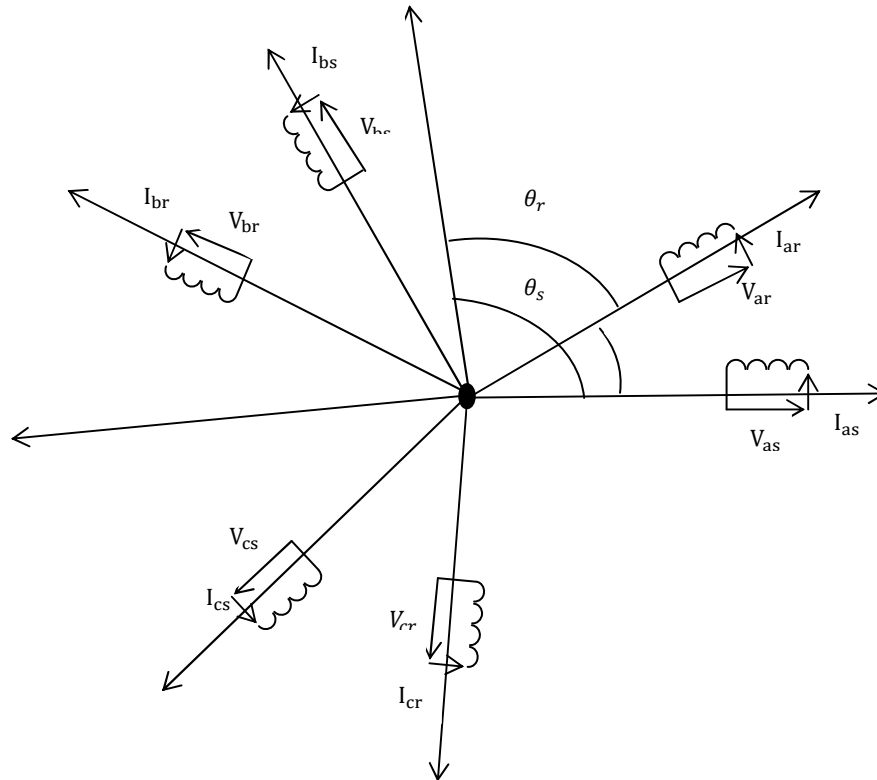


Figure III.1:Reperage angulaire des axes magnetiques d'une machine asynchrone triphasée.

Les trois enroulements identiques du stator et du rotor sont respectivement décalés dans l'espace d'un angle de 120° et on désigne par :

- $\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$: la vitesse de rotation angulaire du champ tournant ;
- $\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$: la vitesse de rotation angulaire ;
- $\omega = \omega_s - \omega_r = \frac{d\theta}{dt} = p\Omega$: la vitesse angulaire électrique ;
- $\Omega = \frac{1}{p} \frac{d\theta}{dt}$: la vitesse angulaire de rotation.

Avec :

p : Le nombre de paires de pôles

III.2 Modélisation de la génératrice asynchrone

III.2.1 Hypothèses simplificatrices

La machine asynchrone, avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie, est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte, il est alors nécessaire d'adopter des hypothèses simplificatrices.

- On suppose les circuits magnétiques non saturés, et suffisamment feuilletés pour que les pertes fer soient négligeables. Les relations entre les flux et les courants sont d'ordres linéaires.
- On considère une densité de courant uniforme dans la section des conducteurs élémentaires, l'effet de peau est donc négligé.
- Le phénomène d'hystérésis et les courants de Foucault sont négligés.
- Les enroulements statoriques et rotoriques sont symétriques et la f.m.m est distribuée sinusoïdalement le long de la périphérie des deux armatures.
- On ne tient compte que du premier harmonique d'espace de distribution de force magnétomotrice de chaque phase du stator et du rotor. L'entrefer est d'épaisseur uniforme (constant), les inductances propres sont constantes. Les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes des enroulements rotoriques et statoriques.
- On considère que la machine fonctionne en régime équilibré.

III.2.2 Modèle mathématique de la machine asynchrone

➤ Mise en équations de la machine

Le comportement de la machine peut être traduit par trois types de phénomènes régit par leurs équations respectives : équations électriques ; magnétiques et mécaniques. La figure III.2 représente le schéma en phase ramené au stator de la machine.

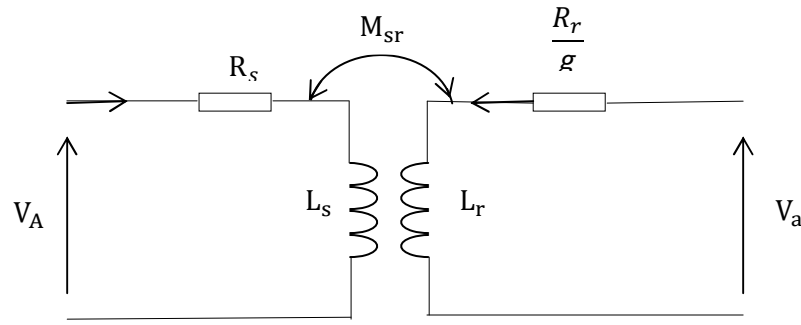


Figure III.2 : Le schéma en phase de la machine.

➤ Equations électriques

Soient $(V_{s\ abc})$, $(I_{s\ abc})$ et $(\phi_{s\ abc})$ respectivement, le vecteur tension, courant et flux des trois phases statorique de la machine.

$$[V_{s\ abc}] = \begin{bmatrix} V_{s\ a} \\ V_{s\ b} \\ V_{s\ c} \end{bmatrix}; [I_{s\ abc}] = \begin{bmatrix} I_{s\ a} \\ I_{s\ b} \\ I_{s\ c} \end{bmatrix}; \quad [\phi_{s\ abc}] = \begin{bmatrix} \phi_{s\ a} \\ \phi_{s\ b} \\ \phi_{s\ c} \end{bmatrix} \quad (\text{III.1})$$

Les mêmes notations sont adoptées pour les grandeurs rotoriques en remplaçant l'indice « s » par l'indice « r ». On définit les notations statoriques et rotoriques comme suit :

1- Phase statorique

Pour l'ensemble des enroulements statoriques, on écrira en notation matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{s\ a} \\ V_{s\ b} \\ V_{s\ c} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s\ a} \\ I_{s\ b} \\ I_{s\ c} \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{s\ a} \\ \phi_{s\ b} \\ \phi_{s\ c} \end{bmatrix} \quad (\text{III.2})$$

R_s : Résistance de phase du stator.

2- Phase rotorique

Pour l'ensemble des enroulements rotoriques, on écrira en notation matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.3})$$

R_r : Résistance de la phase du rotor.

➤ Equation magnétique

Les hypothèses citées précédemment, entraînent les relations suivantes entre les flux (ϕ) et les courants (I) des phases statoriques et rotoriques.

$$\begin{cases} \phi_{sabc} = [L_s][I_{sabc}] + [M_{sr}][I_{rabc}] \\ \phi_{rabc} = [M_{rs}][I_{sabc}] + [L_r][I_{rabc}] \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{as} & M_s & M_s \\ M_s & L_{as} & M_s \\ M_s & M_s & L_{as} \end{bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{ar} & M_r & M_r \\ M_r & L_{ar} & M_r \\ M_r & M_r & L_{ar} \end{bmatrix} \quad (\text{III.6})$$

Les mutuelles inductances stator – rotor dépendent de l'angle α (position du rotor) et ont pour vecteur crête M_{sr} .

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \cos(\alpha + 2\pi/3) & \cos(\alpha - 2\pi/3) \\ \cos(\alpha - 2\pi/3) & \cos \alpha & \cos(\alpha + 2\pi/3) \\ \cos(\alpha + 2\pi/3) & \cos(\alpha - 2\pi/3) & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

Avec : $\alpha = \omega t$

A partir des relations (III.2) ;(III.3) et (III.4) leséquationsélectriques deviennent :

$$\begin{cases} [V_{sabc}] = -[R_s][I_{sabc}] - \frac{d}{dt} \{ [L_s][I_{sabc}] + [M_{sr}][I_{rabc}] \} \\ [V_{rabc}] = [R_r][I_{rabc}] + \frac{d}{dt} \{ [M_{rs}][I_{sabc}] + [L_r][I_{rabc}] \} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Avec :

$[R_s]$: La matrice de la résistance statorique par phase ;

$[R_r]$: La matrice de la résistance rotorique par phase ;

$[V_{sabc}]$: Vecteur tension statorique ;

$[V_{rabc}]$: Vecteur tension rotorique ;

$[I_{sabc}]$: Vecteur courant statorique ;

$[I_{rabc}]$: Vecteur courant rotorique ;

$[\phi_{sabc}]$: Matrice du flux statorique suivant l'axe a, b, c ;

$[\phi_{rabc}]$: Matrice du flux rotorique suivant l'axe a, b, c.

$[L_s]$: représente la matrice inductances statorique exprimées en fonction des inductances propres et mutuelles.

$[L_r]$: représente la matrice inductance rotorique exprimée en fonction des inductances propres et mutuelles.

➤ Equation mécanique

L'équation mécanique régissant la vitesse de rotation ω de la machine est donnée par :

$$C_m - C_{em} = J \frac{d\omega}{dt} + f\omega \quad (\text{III.9})$$

Avec :

J : Moment d'inertie ramené sur l'arbre de la machine ;

C_{em} : Couple électromagnétique développé par la machine ;

C_m : Couple mécanique.

Le couple électromagnétique est la dérivée partielle de la coénergie magnétique par rapport à la position. Sachant que les inductances propres sont de dérivées nulles, il ne reste que le terme relatif aux dérivées des inductances mutuelles. Son expression est donnée par :

$$C_{em} = \frac{1}{2} p [I_{sabc}]^t \frac{\partial}{\partial \theta} [M_{sr}] [I_{sabc}] \quad (\text{III.10})$$

Avec :

P : le nombre de paires de pôles

III.3 Transformation de Park

Elle consiste à appliquer aux courants, tension et flux, un changement de variables faisant intervenir l'angle entre les axes des phases et les axes d et q. La matrice de Park transforme un système de grandeurs triphasées équilibrées en un système de grandeurs diphasées équivalent d'axe (d,q).

Les composantes relatives et réelles sont liées par l'équation :

$$[X_{dqo}] = [P(\theta)] \cdot [X_{abc}] \quad (\text{III.11})$$

Ou d,q,o sont respectivement indice des composantes directe, quadratique et homopolaire.

La matrice de Park $[P(\theta)]$ est exprimée par :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.12})$$

Avec :

θ : l'angle entre l'axe d et l'axe as de la figure III.1 pour une transformation au stator ou l'angle entre d et ar pour une transformation au rotor.

Les grandeurs (courants, tensions et flux) transformées, du système diphasé sont égales à la matrice de Park multipliée par les grandeurs du système triphasé suivantes:

La matrice de passage inverse est donné par :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.13})$$

Le modèle de la machine est établi dans le repère des axes d et q solide au champ tournant suite à la nullité des composants homopolaires (système équilibré).

III.4 Equation de la machine dans les axes d et q

La représentation de la machine dans les axes d et q est donnée par la figure III.2

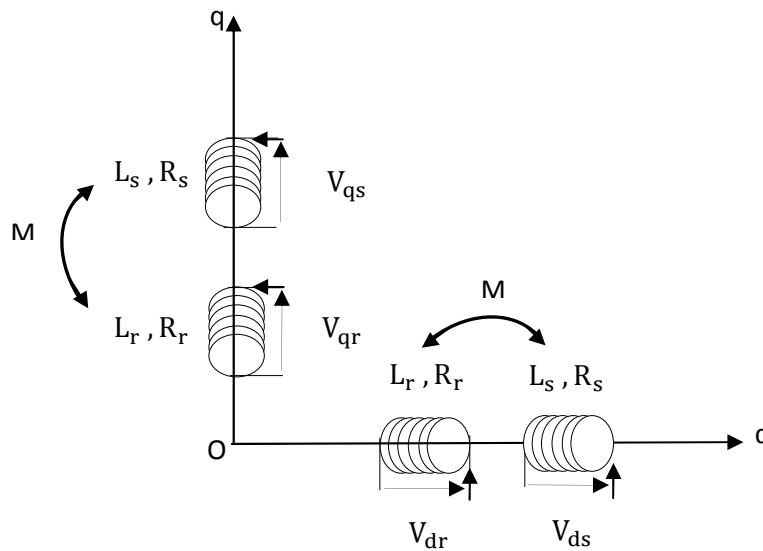


Figure III.2 : Représentation des enroulements fictifs des axes d et q

III.4.1 Equations électriques

On appliquant la transformée de Park :

$$\begin{cases} [V_{s,dq}] = [P(\theta_s)][V_{s,abc}] \\ [V_{r,dq}] = [P(\theta_s - \theta)][V_{r,abc}] \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

Ainsi, en multipliant les systèmes d'équations (III.8) par la matrice de Park, on obtient :

$$\begin{cases} V_{ds} = -r_s I_{ds} - \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \phi_{qs} \frac{d\theta_s}{dt} \\ V_{qs} = -r_s I_{qs} - \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \phi_{ds} \frac{d\theta_s}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

$$\begin{cases} V_{dr} = 0 = r_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - \phi_{qr} \frac{d\theta_r}{dt} \\ V_{qr} = 0 = r_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + \phi_{dr} \frac{d\theta_r}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

III.4.2 Equation magnétique

On applique la transformation de Park :

$$\begin{cases} [\phi_{s,dq}] = [P(\theta_s)][\phi_{s,abc}] \\ [\phi_{r,dq}] = [P(\theta_s - \theta)][\phi_{r,abc}] \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

Les équations magnétiques deviennent aussi :

$$\begin{cases} \phi_{dqs} = L_s I_{dqs} + M_{sr} I_{dqr} \\ \phi_{dqr} = M_{sr} I_{dqs} + L_r I_{dqr} \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

III.4.3 Equation mécanique

L'équation mécanique reste inchangée dans le repère (d,q). par contre le couple électromagnétique est concerné par la transformation de Park ; en dérivant les inductances mutuelles et en appliquant la transformé de Park pour l'équation (III.10) On aura l'expression suivante :

$$C_{em} = P(\phi_{dr} I_{qs} - \phi_{qr} I_{ds}) \quad (\text{III.19})$$

III.5 Choix du référentiel

Il est plus intéressant d' écrire les équations dans un référentiel lié soit au stator, soit au rotor, ou au champ tournant, selon les objectifs de l'application. Dans chacun de ces nouveaux référentiels, les équations de la machine deviennent plus simples que dans le référentiel quelconque.

III.5.1 Référentiel immobile par rapport au stator

Ce référentiel est choisi dans le cas d'étude de variations importantes de vitesse de rotation associé ou non avec les variations de fréquence d'alimentation. Il se traduit par les conditions suivantes :

$\frac{d\theta_s}{dt} = 0$; $\frac{d\theta_r}{dt} = -\omega_r$; ($\theta_r = -\theta$) Les équations électriques deviennent alors :

$$\begin{cases} V_{ds} = -r_s I_{ds} - \frac{d}{dt} \phi_{ds} \\ V_{qs} = -r_s I_{qs} - \frac{d}{dt} \phi_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

$$\begin{cases} V_{dr} = 0 = r_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} + \omega_r \phi_{qr} \\ V_{qr} = 0 = r_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} - \omega_r \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.21})$$

III.5.2 Référentiel immobile par rapport au rotor (lié au rotor)

Ce référentiel est lié au rotor donc il tourne à la même vitesse que lui. Ce référentiel est donc préférable pour l'étude des exemples où la vitesse de rotation peut-être considérée comme constante. Il se traduit par les conditions suivantes :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_r ; \frac{d\theta_r}{dt} = 0 ; (\theta_r = \theta)$$

Les équations électriques deviennent :

$$\begin{cases} V_{ds} = -r_s I_{ds} - \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_r \phi_{qs} \\ V_{qs} = -r_s I_{qs} - \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_r \phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.22})$$

$$\begin{cases} V_{dr} = 0 = r_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} \\ V_{qr} = 0 = r_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.23})$$

III.5.3 Référentiel immobile par rapport au champ tournant (lié au champ tournant)

Ce référentiel est lié au champ tournant, ce choix est intéressant lors de l'étude des exemples où la fréquence d'alimentation est constante. Il est aussi utilisé dans l'alimentation à fréquence variable, lorsqu'on désire étudier sa fonction de transfert vis-à-vis des petites perturbations. Il se traduit par les conditions suivantes :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s ; \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r ; \omega = \omega_s - \omega_r = p\Omega$$

Les équations électriques deviennent:

$$\begin{cases} V_{ds} = -r_s I_{ds} - \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = -r_s I_{qs} - \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_s \phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.24})$$

$$\begin{cases} V_{dr} = 0 = r_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - \omega_r \phi_{qr} \\ V_{qr} = 0 = r_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + \omega_r \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.25})$$

Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'établir un modèle mathématique de la génératrice asynchrone à travers des équations simples dans les axes (a.b.c) puis dans les axes (d et q) à l'aide de la transformation de Park. Dans le prochain chapitre on s'intéressera à la description du site.

Introduction

Les énergies renouvelables sont des énergies dont la source est illimitée et non polluante, et dont l'exploitation n'engendre pas de dégâts écologiques. Parmi ces énergies, l'énergie hydraulique. Dans ce contexte la micro-centrale présente un potentiel important car elle est d'une envergure plus simple qu'une centrale, d'une part son faible coût et d'autre part son rôle majeur à jouer dans la sauvegarde de notre environnement. Le but de ce chapitre est la description du potentiel existant pour l'implantation de micro-centrale hydroélectrique sur le réseau d'eau potable de la commune d'Iferhounene.

IV.1 Etude du potentiel

La production d'énergie hydroélectrique dépend de deux paramètres fondamentaux : la hauteur de chute et le débit d'eau turbiné. A ces deux données principales, et indispensables pour le calcul de la puissance électrique installable, il faut rajouter un coefficient de performance comprenant les divers rendements des machines (turbine, générateur, transformateur) ainsi que le rendement tenant compte de la perte de la charge dans la conduite forcée. Les étapes à suivre pour le calcul de la puissance électrique sont résumées dans l'organigramme de la figure IV.1 :

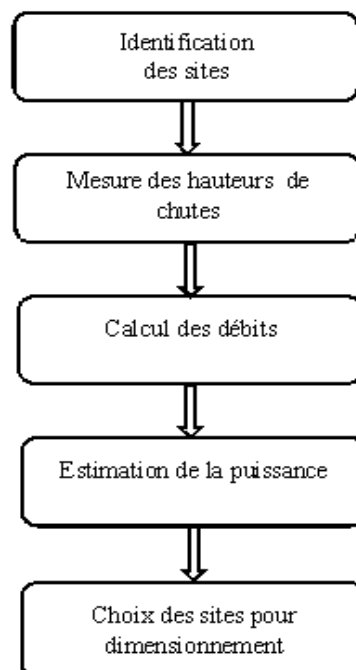


Figure IV.1 : Organigramme de l'étude du potentiel[15]

IV.2 Identification des sites

Les sites appropriés pour les centrales hydrauliques sur eau potable se situent principalement en région de montagne, où la dénivellation entre le captage d'eau de source et réservoir est importante et se trouve de se fait pour l'Algérie en Kabylie (la wilaya de Tizi-Ouzou), où les sites sont les plus favorables. L'identification des sites du potentiel s'est effectuée d'après le plan de profil en long du réseau et en collaboration avec les services de l'ADE la wilaya de Tizi-Ouzou. Pour faire l'identification des sites différents critères sont déterminants ; comme l'écoulement gravitaire ; le débit ; la hauteur de chute ; l'emplacement géographique ; la disponibilité d'un réseau électrique assez proche ...etc[15]

IV.3 Description du site

Comme le montre le schéma hydraulique de la chaîne d'Iferhounene représenté sur la figure III.2, le site est constitué d'une prise d'eau (source), d'une conduite d'amenée et d'un réservoir d'arrivée, à côté de ce réservoir on trouve une station de refoulement d'eau à une hauteur de 200m en amont vers un autre réservoir pour la consommation. La figure III.2 représente le schéma hydraulique de la chaîne d'Iferhounene.

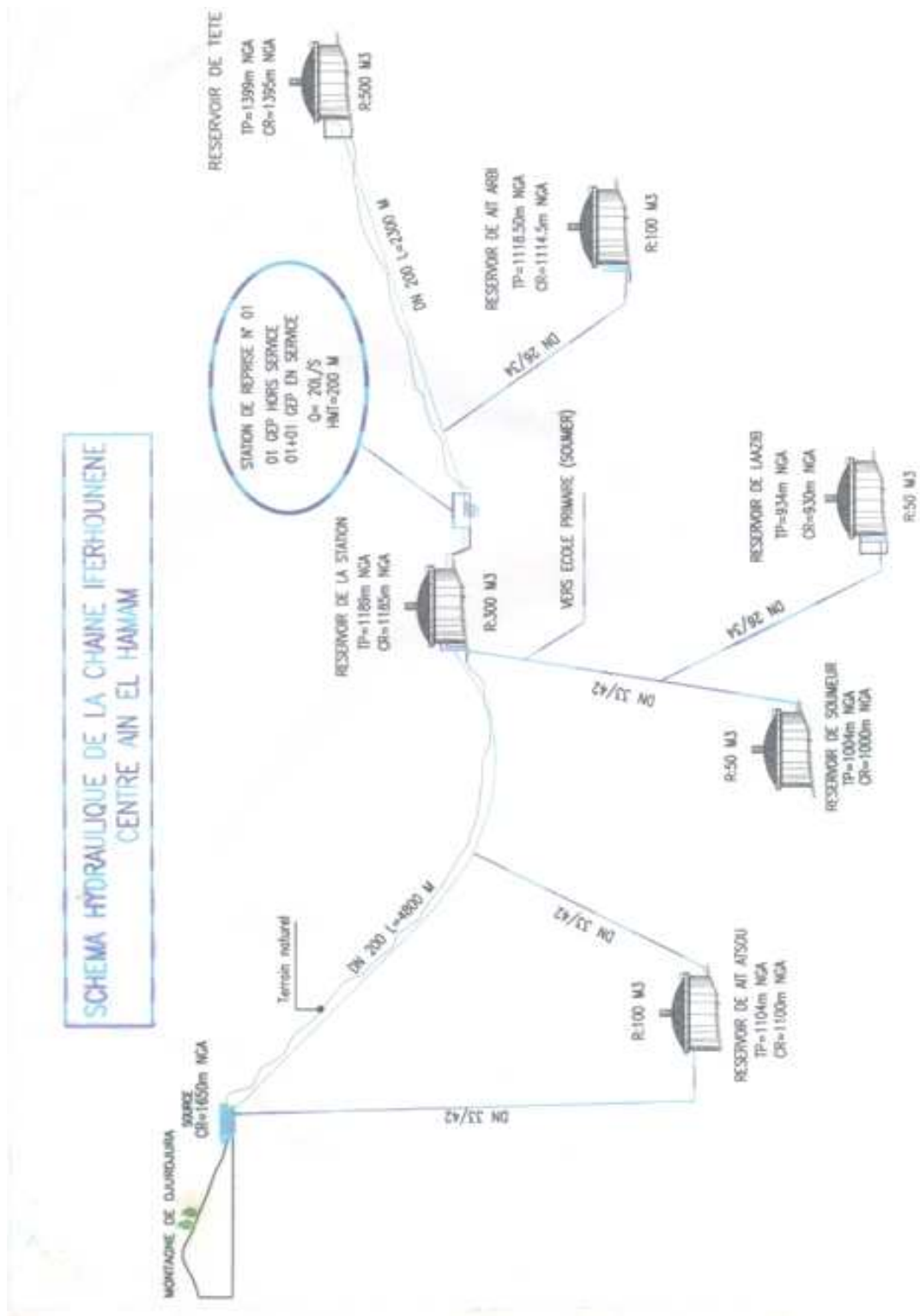


Figure IV.2 : Le schéma hydraulique de la chaîne d'iferhounene

IV. 3.1 La prise d'eau

Les ressources en eau de la région se composent exclusivement des eaux de sources. Actuellement l'alimentation en eau potable se fait exclusivement par le captage de la source « El AinseurAmokrane » qui a été réalisé à l'époque coloniale ; cette source de coordonnées (X=355.35 – Y=649.40), situé au contact par faille des schistes du houiller et des calcaires du trias dans un ravin, affluent de l'oued Ttirourda, à 1Km du sud-ouest du village Takhlijt Ait Atsou. Sondébit est de l'ordre de 110l/s, ce captage est située à l'altitude 1650 m issue du massif du Djurdjura à l'aval d'Azerou N'Thor alimentant gravitairement la station de reprise n°1 et deux réservoirs, le réservoir d'Ait Atsou et le réservoir de Soumeur. La figure IV.3 montre les images de la source « El AinseurAmokrane » [15].



Figure IV.3 : La source « El Ainseur Amokrane » [15]

IV.3.2 Les conduites

IV.3.2.1 La conduite d'amenée

La conduite d'adduction est gravitaire de diamètre DN200mm en acier enrobé et de longueur 4800 ml (mètre linéaire) alimentant par gravité la station de reprise n°1, le réservoir de Soumeur ainsi que le réservoir de Ait Atsou, contenant des chambres de mise en

charge .La conduite actuelle est en mauvais état, d'un point de vue technique, les conduites existantes comportent de très grandes pertes de charge. Il sera nécessaire de remplacer pour obtenir un meilleur rendement et ainsi profiter pleinement du potentiel existant. La figure IV.4 montre une image de la conduite d'amenée[15].



Figure IV.4 : conduite d'amenée[15]

IV.3.2.2 La conduite d'aspiration

C'est cette conduite qui lie le réservoir principal et les pompes de refoulement, elle a un diamètre nominale de 200mm sont matériaux est l'acier, elle est munie d'une vanne pour le contrôle du débit d'eau à l'entrée des troispompes, de cette conduite sort trois autres conduites munies chacune d'une vanne de commande pour commander le débit d'eau qui passe dans les pompes de refoulements. La figure IV.5 représente la conduite d'aspiration.



Figure IV.5 : La conduite d'aspiration

IV.3.2.3 Conduite de refoulement

Les sorties des trois pompes sont reliées à la conduite de refoulement principale, qui est aussi faite en acier et d'un diamètre de 150mm. La conduite de refoulement est représentée par la figure IV.6.



Figure IV.6: La conduite de refoulement

IV.3.3 Le réservoir d'arrivée

Le réservoir d'arrivée couvre une capacité de 300 m³ situé avec un débit d'eau à l'arrivée qui peut atteindre 27 l/s à l'altitude de 1189m. Il alimente par gravité la station de reprise n°1 et le réservoir de Soumeur de 50m³ de capacité. Le réservoir d'arrivée et l'arrivée de l'eau au réservoir sont représentés par la figure IV.5.



a: Réservoir d'arrivée

b:L'arrivée de l'eau au réservoir

FigureIV.5 : Réservoir d'arrivée et l'arrivée de l'eau au réservoir

IV.3.4 La station de refoulement

La station de refoulement alimenté par un réseau de moyenne tension (30KV), utilisant un transformateur abaisseur pour avoir la tension de 400V. La ligne alimentant cette station est représentée sur la figure IV.6.



Figure IV.6 : La ligne alimentant la station de refoulement

La station de refoulement se compose de trois pompes, Chaque pompe est munie d'une vanne de commande de débit. Les trois pompes avec leurs vannes sont représentées sur la figure IV.7.



Figure IV.7 : Les trois pompes et leurs vannes de commande

Chacune des trois pompes a les caractéristiques suivantes :

$P = 75 \text{ KW} ;$

$Q = 72 \text{ m}^3/\text{h}.$

IV.4 Etude du potentiel dans la zone d'iferhounene

IV.4.1 Mesure de la hauteur de chute

IV.4.1.1 La hauteur de chute brute H_b

La hauteur de chute H_b est égale à la différence d'altitude exprimée en mètre entre le niveau à la prise d'eau (cote de surface en eau moyenne) et la sortie de turbine. C'est une donnée topographique mesurable sur le terrain, ou grâce à une carte pour les hautes chutes.

$$H_b = H_1 - H_2 \quad (\text{IV.1})$$

Avec :

H_1 : La hauteur de la source par rapport à la mer ;

H_2 : La hauteur du réservoir par rapport à la mer.

D'après le schéma hydraulique AEP d'Iferhounene sur la figure (IV.2) on a

$$H_1 = 1650 \text{ m}$$

$$H_2 = 1189 \text{ m}$$

En remplaçant H_1 et H_2 dans l'équation (III.1) on obtient :

$$H_b = 461 \text{ m}$$

IV.4.1.2 La hauteur nette H_n

La hauteur de chute nette H_n en tenant compte des pertes hydraulique est déterminée selon la formule (I.2), en estimant les pertes de charge à 10% de la hauteur brute. On trouve que :

$$H_n = H_b - 10\% H_b$$

$$H_n = 414.9 \text{ m}$$

IV.4.2 Mesure du débit

Pour la valeur du débit, on n'a pas pu avoir la valeur exacte puis que l'appareil de mesure (débitmètre) n'était pas disponible, mais on a essayé d'avoir une valeur approximative on se basant sur le volume maximum d'eau dans le réservoir et la durée de ce remplissage.

$$V_{\text{remplit}} = 291.6 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$t_{\text{remplissage}} = 3 \text{ heures} = 10800 \text{ s}$$

$$Q = \frac{V_{\text{remplit}}}{t_{\text{remplissage}}} = \frac{291.6}{10800} = 0.027 \text{ m}^3/\text{s}$$

IV.4.3 Calcul de la puissance hydraulique

D'après la valeur du débit, on peut calculer la valeur de la puissance hydraulique par la formule suivante :

$$P_h = \rho \cdot g \cdot H_n \cdot Q \quad [\text{W}] \quad (\text{IV.2})$$

Avec :

ρ : Masse volumique de l'eau ($1000 \text{ Kg}/\text{m}^3$);

g : Accélération de la pesanteur ($9.81 \text{ m}/\text{s}^2$);

H_n : Hauteur de chute nette (414.61 m);

Q : Débit ($0.027 \text{ m}^3/\text{s}$).

Application numérique :

$$P_h = 1000 \cdot 9.81 \cdot 414.61 \cdot 0.027$$

$$P_h = 109.81 \text{ KW}$$

IV.4.4 Calculs de la puissance mécanique :

La puissance mécanique est la puissance à la sortie de la turbine et dans notre cas on a choisi la turbine Pelton.

La variabilité du débit est un paramètre important et a une grosse influence sur la détermination du rendement de la turbine. Cet impact est illustré sur la figure IV.8.

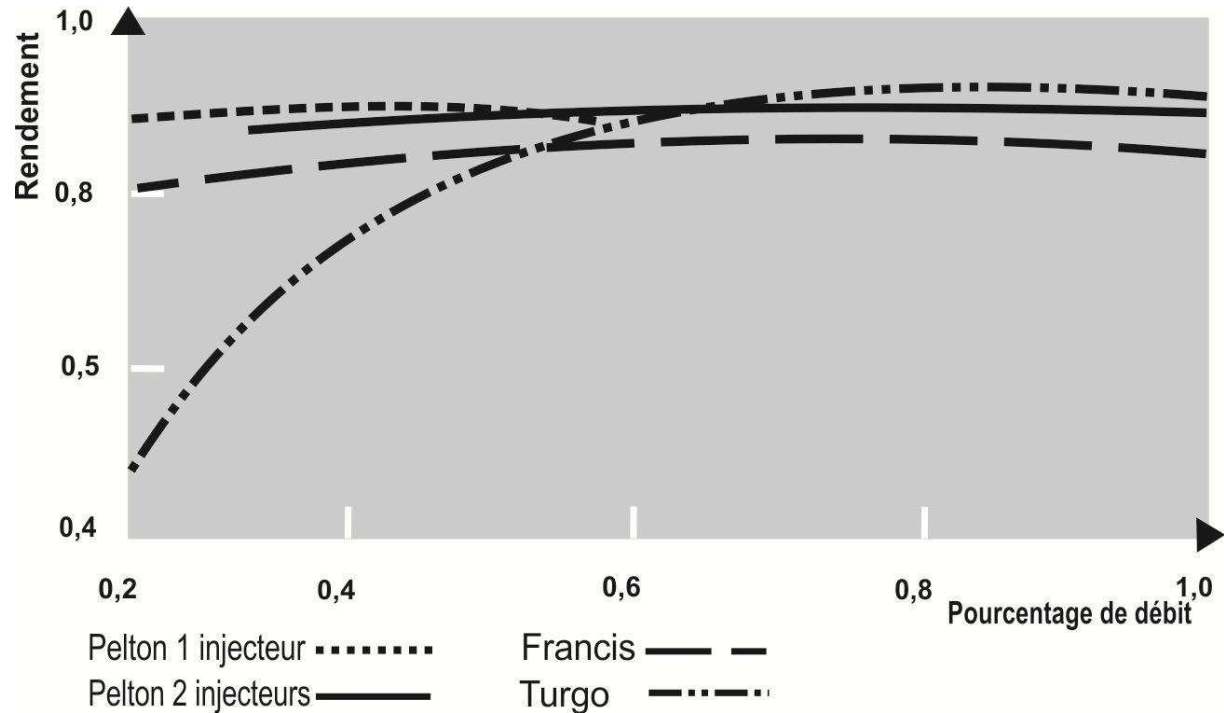


Figure IV.8: Rendement des différents types de turbines

Pour un débit $Q = 0.027 \text{ m}^3/\text{set}$ d'après la courbe de la figure IV.8 on prend une turbine Pelton avec deux injecteurs. Le rendement équivalent à ce débit est : $\eta_T = 0.9$. La puissance mécanique fournie par la turbine est donnée par la formule suivante :

$$P_m = P_h \cdot \eta_T [\text{KW}] \quad (\text{IV.3})$$

Avec:

η_T : Rendement de la turbine.

Application numérique :

$$P_m = 109.81 \cdot 0.9$$

$$P_m = 98.83 \text{ KW}$$

IV.4.5 Calcul de la puissance électrique :

La puissance électrique s'exprime en KW est donnée par la formule suivante :

$$P_{\text{éle}} = \rho \cdot g \cdot H_n \cdot Q \cdot \eta_T \cdot \eta_G \quad (\text{IV.4})$$

Avec :

η_G : Rendement du générateur.

Enfin la puissance électrique est donnée par la formule suivante :

$$P_{\text{éle}} = \rho \cdot g \cdot H_n \cdot Q \cdot \eta [\text{KW}] \quad (\text{IV.5})$$

Avec :

η : Rendement hydroélectrique de l'installation à pleine charge.

Avec :

$$\eta = \eta_T \cdot \eta_G \quad (\text{IV.6})$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} \eta = 0 & \text{si } Q/Q_{eq} \leq 0.05 \\ \eta = 72.5 + 9.5 * \ln \left(4Q/Q_{eq} \right) & \text{si } 0.05 \leq Q/Q_{eq} \leq 1 \\ \eta = \left(72.5 + 9.5 * \ln 4 \left(1 - \frac{0.05}{0.4} \frac{Q}{Q_{eq}} + \frac{0.05}{0.4} \right) \right) & \text{si } Q/Q_{eq} \leq 1.4 \end{array} \right. \quad (\text{IV.7})$$

Dans notre cas :

$0.05 \leq Q/Q_{eq} \leq 1$ Donc le rendement se calculera par la formule suivante :

$$\eta = 72.5 + 9.5 * \ln \left(4Q/Q_{eq} \right) \quad (\text{IV.8})$$

Avec :

Q : Débit effectif ;

Q_{eq} : Débit équipé, qui est défini comme le débit pour lequel le rendement de la turbine est maximum (appelé aussi débit de dimensionnement).

Pour un débit effectif constant égal au débit équipé on aura :

$$\eta = 72.5 + 9.5 * \ln(4 * 1)$$

$$\eta = 0.86$$

La figure IV.9 montre la courbe du rendement considéré pour le calcul :

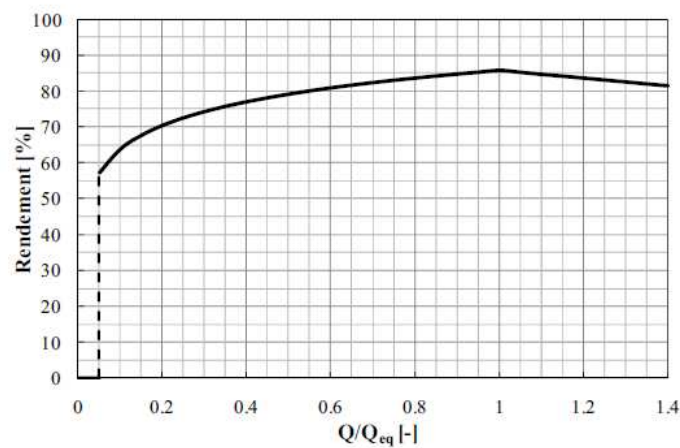


Figure IV.9 : Courbe du rendement du groupe turbine-générateur

La puissance électrique sera :

$$P_{ele} = \rho \cdot g \cdot H_n \cdot Q \cdot \eta$$

$$P_{ele} = 94.44 \text{ KW.}$$

Conclusion :

Dans ce chapitre on a choisie sur la chaine d'AEP d'Iferhounene un site sur lequel on a prédimensionné la micro-centrale hydroélectrique dont on a calculé la hauteur de chute et mesuré le débit, puis à la fin on a calculé le potentiel énergétique qu'on a trouvé de l'ordre de 94KW, il est à noter que pour qu'un projet hydraulique soit rentable il est essentielle de s'assurer que l'on dispose d'une source suffisante, car le débit moyen sur site est un facteur déterminant du fait que l'énergie produite varie proportionnellement à ce débit. Dans le chapitre suivant on s'intéressera à la simulation du système de conversion d'énergie constitué par une turbine hydraulique et une génératrice asynchrone connecté au réseau basse tension.

Introduction

En ingénierie, la simulation est un moyen efficace et économique, couramment utilisé pour faire des études préliminaire et (ou) comparatives, tant au stade du développement conception, qu'au cours du fonctionnement normal des systèmes. Actuellement, plusieurs outils de simulation, parmi lesquels Matlab/Simulink, sont utilisées dans l'industrie et dans les milieux universitaires. Dans ce chapitre, nous présenterons la simulation d'une micro-centrale hydroélectrique débitant sur un réseau basse tension

V.1 Outil de simulation Matlab-Simulink

V.1.1 Matlab

Matlab est un système interactif et convivial de calcul numérique et de visualisation graphique, destiné aux ingénieurs et scientifiques. Il possède un langage de programmation à la fois puissant et simple d'utilisation. Il permet d'exprimer les problèmes et solutions d'une façon aisée, contrairement à d'autres langages de programmation. Il intègre des fonctions d'analyse numérique, de calcul matriciel, de traitement de signal, de visualisation graphique 2D et 3D, etc. Il peut être utilisé de deux façons (interactive, programmation).

- En mode interactif, l'utilisateur a la possibilité de réaliser rapidement des calculs sophistiqués et d'en présenter sous forme numérique ou graphique.
- En mode programmation, il est possible d'écrire des programmes comme avec d'autres langages.

Dans MATLAB, l'élément de base est la matrice l'utilisateur ne s'occupe pas des allocations de mémoire ou de redimensionnement comme dans les langages classiques. Les problèmes numériques peuvent être résolus en un temps record, qui ne représente qu'une infime partie du temps à passer avec d'autres langages comme le Basic, C, C++ ou le Fortran. MATLAB s'est imposé dans les milieux universitaire et industriel comme un outil puissant de modélisation, de simulation et de visualisation de problèmes numériques. Dans le monde universitaire, MATLAB est utilisé pour l'enseignement de l'algèbre linéaire, le traitement du signal, l'automatique, etc., ainsi que dans la recherche scientifique. Dans le domaine industriel, il est utilisé pour la résolution et la simulation de problèmes d'ingénierie et de prototypage. MATLAB est une abréviation de MATRIX LABORATORY.

V.1.2 SIMULINK

SIMULINK est un programme pour la simulation des systèmes dynamiques linéaires où non linéaire ; une extension de MATLAB, dans laquelle la définition des modèles se fait par schémas bloc (diagramme structurel). Le diagramme structurel permet la représentation graphique d'un système d'équations linéaires où non linéaires. Il met en évidence la structure du système et permet de visualiser les interactions entre les différentes grandeurs internes et externes. Les éléments qui composent le diagramme structurel représentent des opérations mathématiques. SIMULINK possède une interface graphique pour visualiser les résultats sous forme graphe ou des valeurs numériques en cours de simulation. Les paramètres régissant le fonctionnement des systèmes peuvent être modifiés en ligne, c'est-à-dire en cours de simulation, et l'on peut observer leur effet immédiatement.

Il est bâti autour d'une bibliothèque de blocs (librairies) classés par catégories. Les principales librairies sont montrées dans la figure et le tableau ci-dessous :

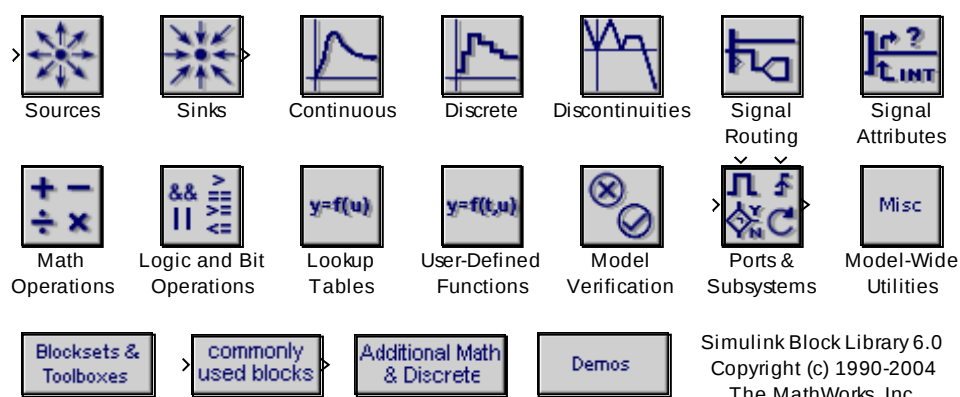


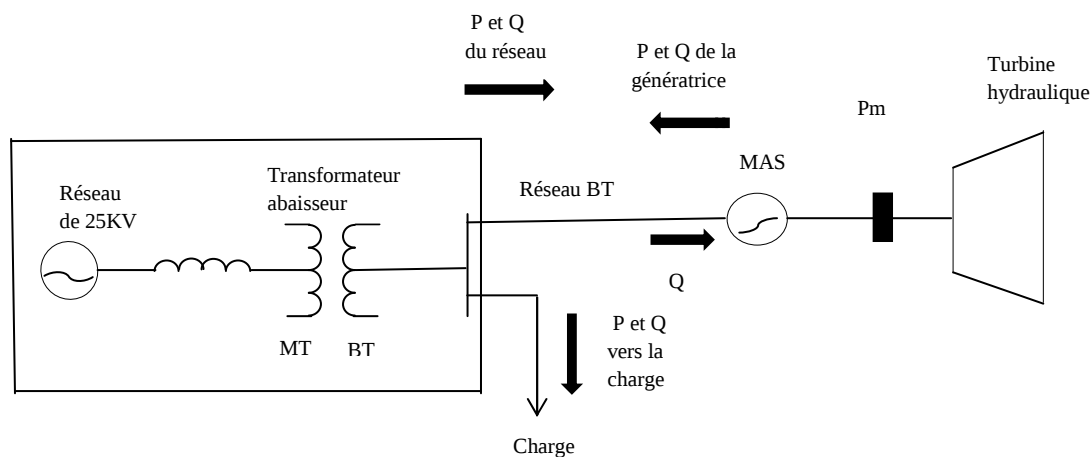
Figure V.1: Les principales librairies Simulink

TableauV.1 : Les principales librairies Simulink

Librairie	contenu
Sources	Différents types de signaux d'entrée
Sinks	Appareils virtuels de visualisation
Continuous	Systèmes et opérateurs continus
Discrete	Blocs représentant les systèmes discrets
Math	Opérateurs mathématique
Functions& Tables	Fonctions et tables de valeurs
Nonlinear	Systèmes et opérateurs non linéaires
Signal &System	Blocs de connexion et sous-systèmes

V.1.3 Le model du système

Le système à étudier représente une micro- centrale hydroélectrique schématisé par une turbine hydraulique qui tourne avec la puissance de l'eau fait tourner l'arbre d'une génératrice asynchrone, celle-ci est reliée à un réseau basse tension à partir duqu'elle absorbe l'énergie réactive dont elle a besoin pour la magnétisation du circuit magnétique au démarrage et sur lequel elle débite durant le fonctionnement, sur ce réseau est branché une charge qui représente les pompes de refoulement. La figure V.2 représente le model du système.

**FigureV.2 : Model du système**

V.1.3 Schéma de la simulation du système

On a exploité le model du système pour réaliser le schéma global de la simulation dans lequel :

➤ **La turbine :**

Dans ce schéma le model de la turbine est représenté par un bloc avec deux entrées (la puissance mécanique et la vitesse de rotation)et une sortie (le couple mécanique).

➤ **La génératrice :**

On a pris le model de la machine asynchrone à cage d'écureuil en fonctionnement génératrice (signe négatif du couple mécanique)

Le réseau basse tension :

Il regroupe un générateur de tension alternatif de 25 KV,un transformateur abaisseur(25KV/400V)et une ligne basse tension en π de 0.1 Km de longueur.

➤ **La charge :**

Nous avons considérés les pompes de refoulement existantes dans le site d'Iferhounenecomme une charge pour le système.

Les étapessuivies pendant la simulation du système sont :

- Le temps de simulation $t=4s$
- On commence la simulation avec :
 - La puissance à l'entrée de la turbine $P_m = 49415W$
 - La puissance de la charge $P_{ch} = 75KW$
- A $t=1.5 s$ en augmente la puissance mécanique à l'entrée de la génératrice ($P_m = 98830W$), ce qui signifie une variation du débit turbiné.
- A $t= 2.5 s$ on branche la deuxième charge (pompes ayant la même puissance que la première)on agissant sur la commande.

Remarque :

L'algorithme de résolution du système d'équation est : ode 23 tb.

Le schéma de la simulation du système est représenté sur la figure V.3

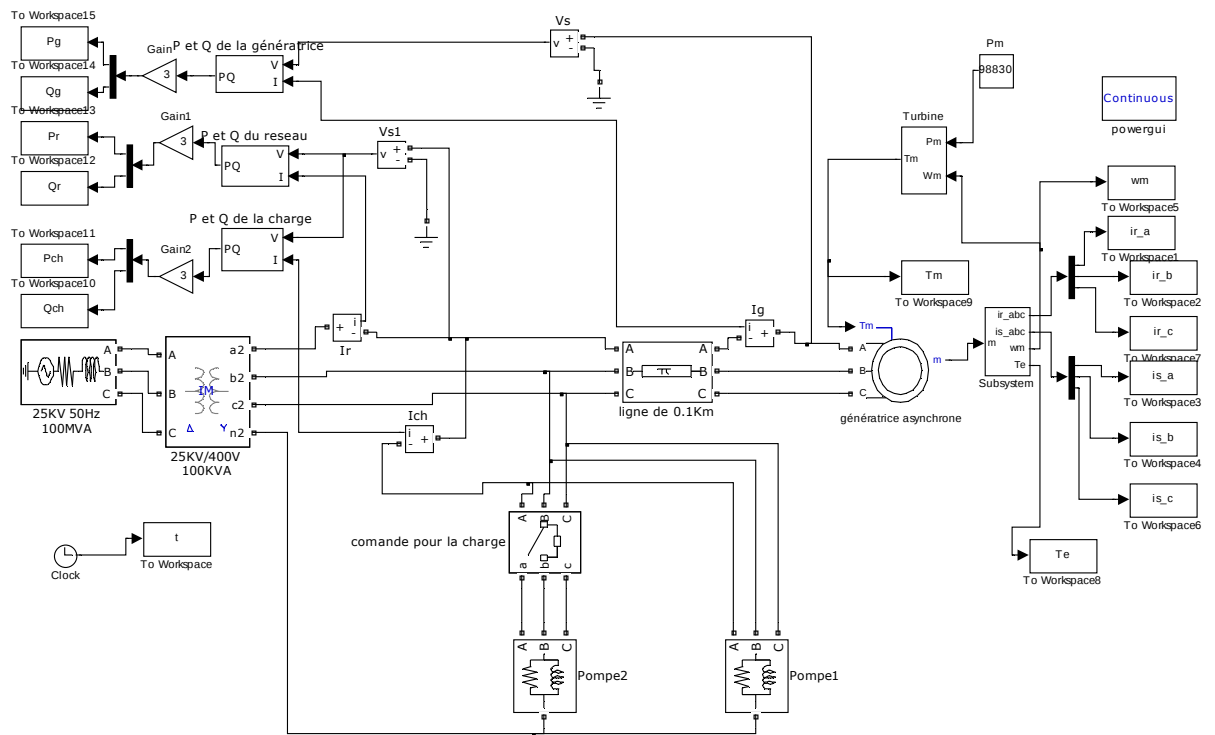


Figure V.3 : schéma de la simulation du système

V.2 Résultats de la simulation

Les figures suivantes montrent les résultats de la simulation du système hydraulique étudié :

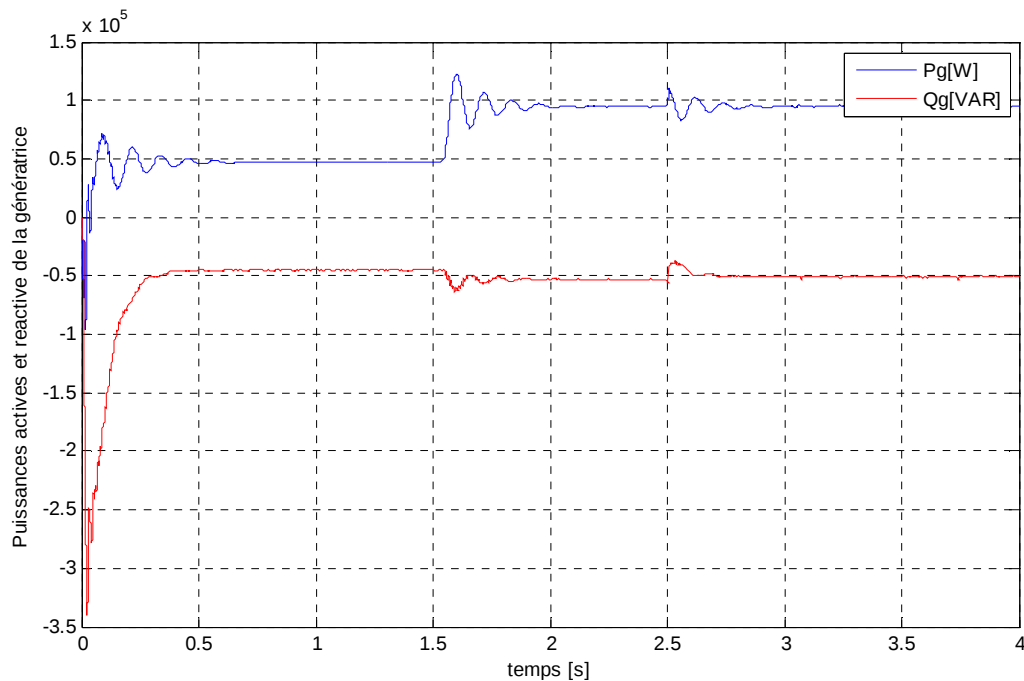


Figure V.4 : Evolution des puissances active et reactive de la génératrice en fonction du temps

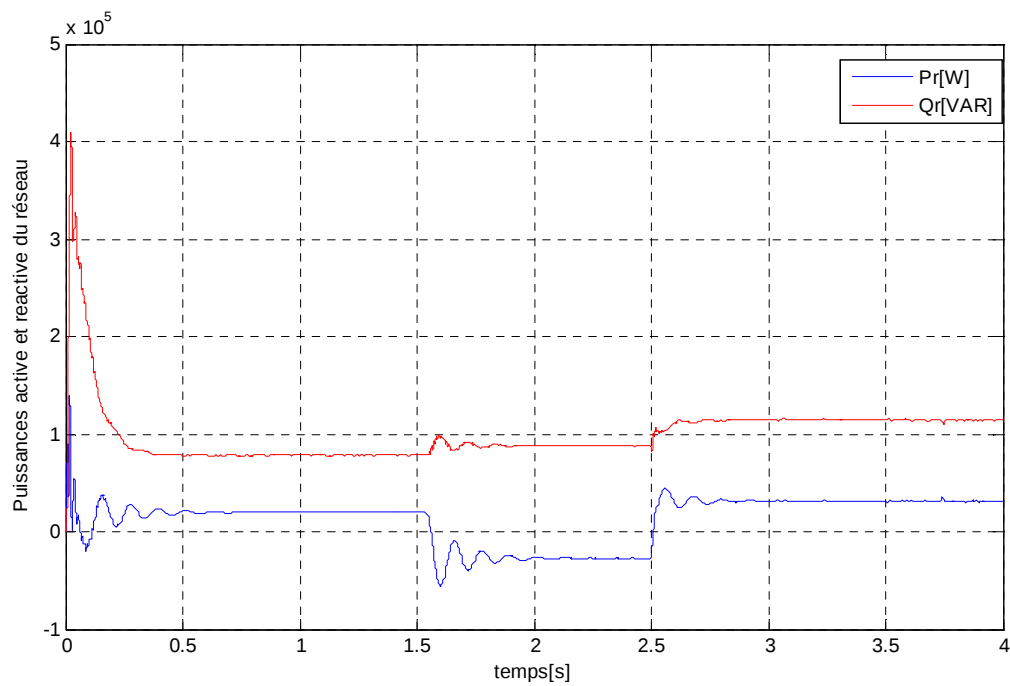


Figure V.5 :Evolution des puissances active et reactive du réseau en fonction du temps

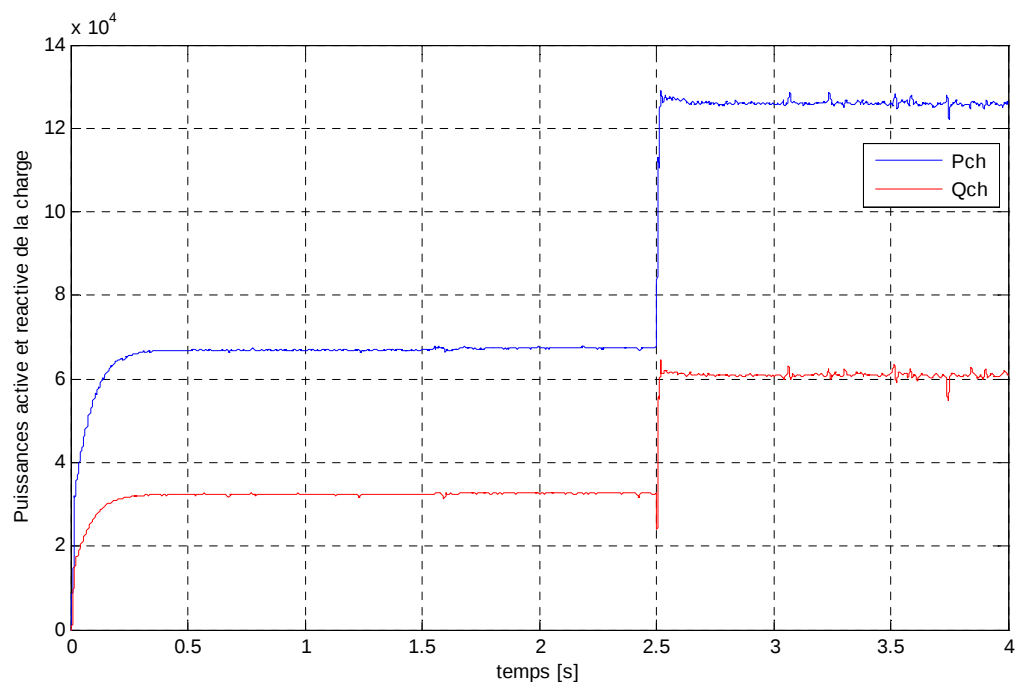


Figure V.6 :Evolution des puissances active et reactive de la charge en fonction du temps

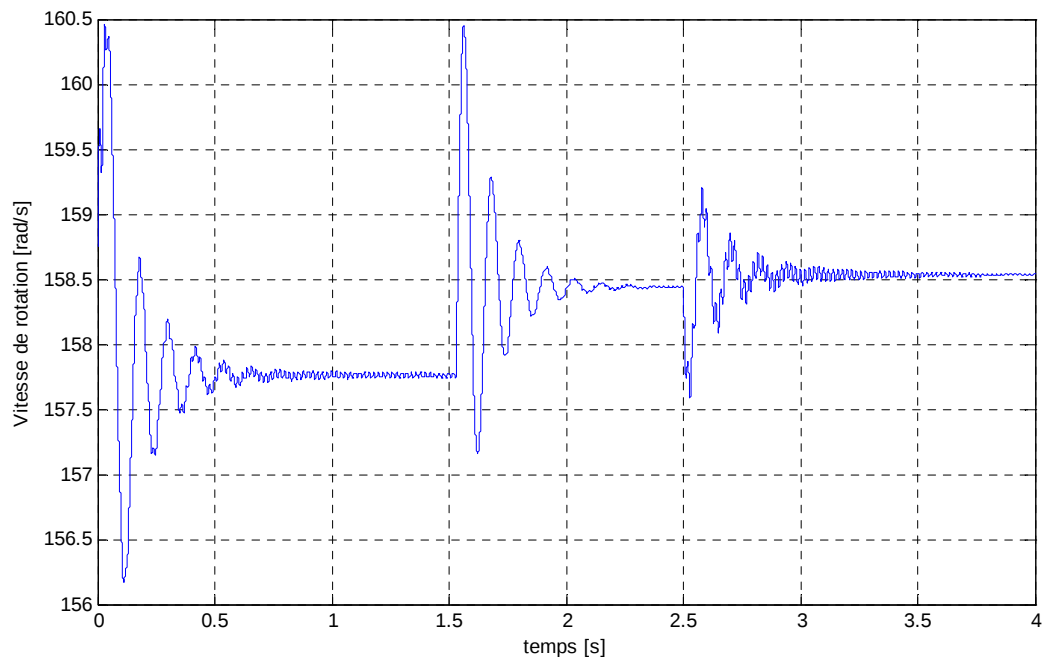


Figure V.7 : Evolution de la vitesse de rotation en fonction du temps

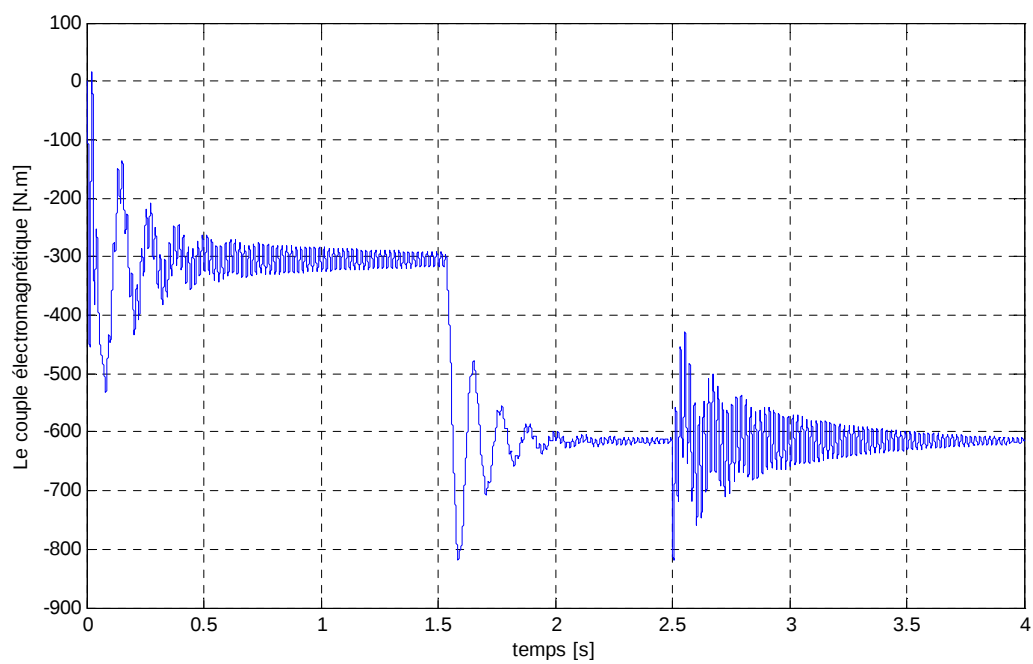


Figure V.8 : Evolution du couple électromagnétique en fonction du temps

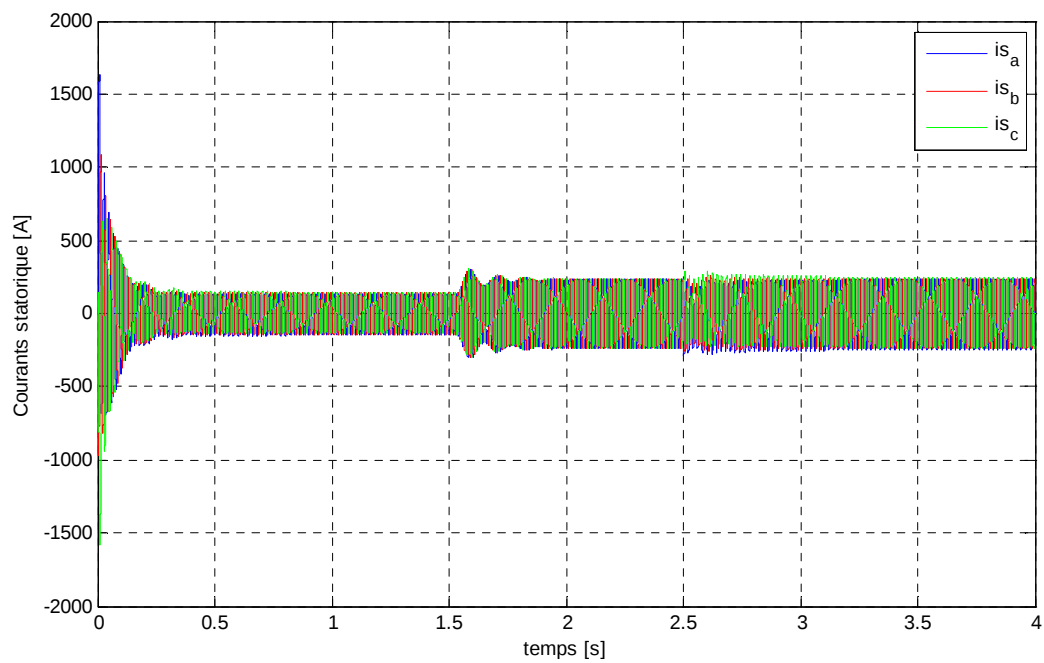


Figure V.9: Evolution des courants courants statoriques en fonction du temps

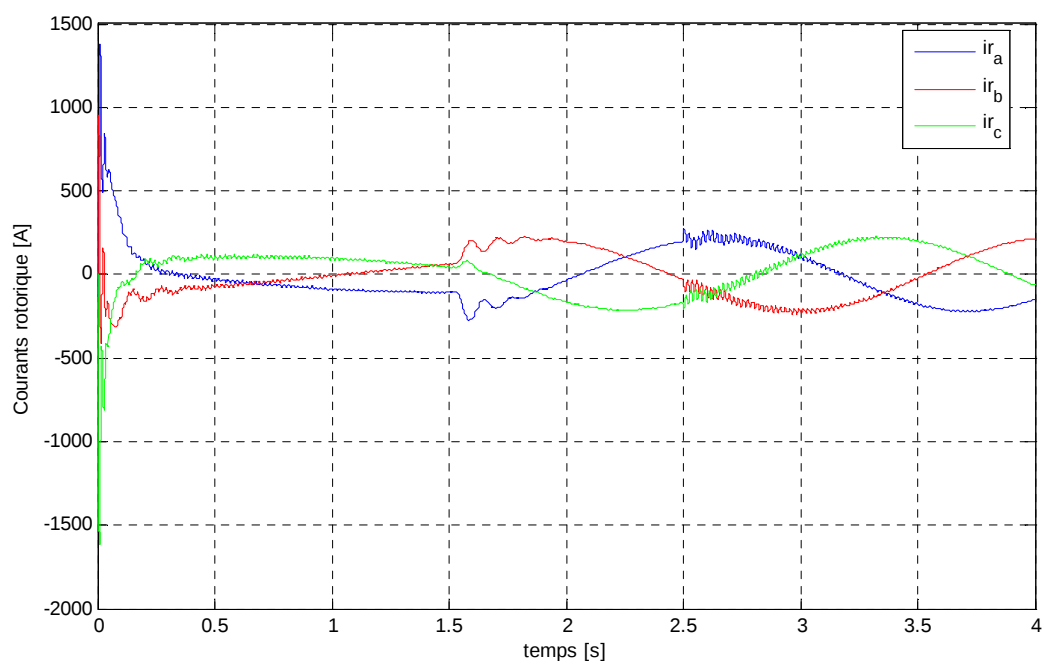


Figure V.10: Evolution des courants courants rotoriques en fonction du temps

V. 3 Interprétation des résultats

V. 3.1 Évolution des puissances réactive et active de la génératrice

➤ La puissance réactive

L'évolution de la puissance réactive de la génératrice est représentée sur la figure V.4, cette courbe est caractérisée par un pic important au démarrage ce qui assure la puissance nécessaire pour la magnétisation du circuit magnétique de la génératrice, puis elle se stabilise en régime permanent. L'augmentation de la puissance mécanique à l'entrée de la génératrice à $t=1.5$ s et la charge à $t=2.5$ s ne présente que des fluctuations négligeables sur l'évolution de la puissance réactive. Le signe négatif indique que la génératrice absorbe la puissance réactive du réseau.

➤ La puissance active

Comme montré sur la figure V.4 la génératrice fournit de la puissance active pour satisfaire la demande en puissance de la charge, à $t=1.5$ s l'augmentation de la puissance mécanique à l'entrée de la génératrice est suivie d'une augmentation de la puissance active fournie par la génératrice, par contre l'augmentation de la charge n'influence pas sur la puissance active.

V. 3.2 Évolution des puissances réactive et active du réseau

➤ La puissance réactive

L'évolution de la puissance réactive du réseau est représentée sur la figure (V.5), la courbe est caractérisée par un pic au démarrage, pour satisfaire la puissance demandée pour la magnétisation du circuit magnétique de la génératrice, puis elle diminue et se stabilise au régime permanent. À $t = 1.5$ s l'augmentation de la puissance mécanique induit une augmentation faible de la puissance fournie par le réseau. À $t=2.5$ s on augmente la charge et on observe une augmentation de la puissance réactive fournie par le réseau. Le signe positif est dû au fait que le réseau fournit de la puissance réactive à la charge et au générateur.

➤ La Puissance active

L'évolution de la puissance active du réseau est représentée sur la figure (V.5), en remarque qu'entre $t=0$ s et $t=1.5$ s le réseau fournit de la puissance active pour satisfaire la demande en puissance de la charge car la génératrice ne fournit pas assez de puissance. A

partir de $t=1.5s$ en augmente la puissance mécanique de la génératrice, le réseau recueille la puissance en excès fournie par la génératrice. Puis l'augmentation de la charge la génératrice ne satisfait pas la demande de la charge donc c'est le réseau qui l'assure.

V. 3.2 Évolution des puissances réactive et active de la charge

➤ La puissance réactive

L'évolution de la puissance réactive de la charge est représentée sur la figureV.6, on observe l'augmentation de la puissance absorbée par la charge et se stabilise en régime permanent. L'augmentation de la puissance mécanique à l'entrée de la génératrice a $t=1.5 s$ n'a aucun influence sur la charge, a $t=2.5 s$ on augmente la charge et on remarque l'augmentation de la puissance réactive absorbée par la charge celle-ci est assuré par le réseau.

➤ La puissance active

L'évolution de la puissance active de la charge est représentée sur la figureV.6, on observe l'augmentation de la puissance absorbée par la charge et se stabilise en régime permanent. L'augmentation de la puissance mécanique à l'entrée de la génératrice a $t=1.5 s$ n'a aucun influence sur la charge, a $t=2.5 s$ on augmente la charge et on remarque l'augmentation de la puissance active absorbée par la charge celle-ci est assuré premièrement par la génératrice, mais cette dernière ne satisfait pas cette demande donc c'est le réseau qui fournit à la charge la puissance qui manque.

V. 3.3 Évolution de la vitesse de rotation

La figureV.7 représente la courbe de la vitesse de rotation. Les oscillations du couple électromagnétique se font évidemment ressentir sur l'évolution de la vitesse qui se stabilise en régime permanent à $\omega_m = 157.75 \text{ rad/s}$ (1507.16 tr/min) qui est légèrement supérieure à la vitesse de synchronisme (fonctionnement génératrice), l'augmentation de puissance à $t= 1.5s$ présente une influence remarquable sur la vitesse qui augmente suite à cette perturbation et se stabilise à $\omega_m = 158.5 \text{ rad/s}$ (1514.33 tr/min). L'augmentation de la charge à $t = 2.5s$ présente une perturbation (oscillation) faible, mais elle revient à la valeur de 158.5 rad/s au régime permanent, donc la charge n'a pas une grande influence sur la vitesse de rotation.

V.3.4 Évolution du couple électromagnétique

L'évolution du couple électromagnétique est représentée sur la figure (V.8). Ou le couple subit des oscillations au démarrage et se stabilise en régime permanent, à partir de l'instant $t = 1.5s$ l'augmentation de la puissance mécanique induit une augmentation du couple électromagnétique avec des pics important, qui se stabilise à une valeur de -600 N.m. à $t = 2.5s$ le couple subit des oscillations importantes suite à l'application de la charge mais sa valeur en régime permanent ne change pas. Le signe négatif justifie sa qualité en tant que couple résistant correspondant au fonctionnement en génératrice.

V.3.5 Évolution des courants statoriques

La figure V.9 représente l'allure de l'évolution des courants statoriques, les courants au démarrage sont très importants ceci est dû à l'oscillation du couple électromagnétique puis se stabilise en régime permanent. À $t=1.5$ s les courants augmente d'une manière remarquable suite à l'augmentation de la puissance. À $t=2.5$ s l'augmentation de la charge n'a aucune influence sur les courants statoriques.

V.3.6 Évolution des courants rotoriques

La figure V.10 représente l'allure de l'évolution des courants rotoriques. Les courants au démarrage sont très importants, puis ils se stabilisent en régime permanent, à $t=1.5$ s on augmente la puissance mécanique à l'entrée de la génératrice cela induit une élévation de l'amplitude des courants rotoriques, à $t=2.5$ s on ajoute une charge mais son influence se traduit juste par de très faible perturbation et reprend ensuite sa valeur en régime permanent.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié par simulation le comportement de la génératrice, le réseau et la charge suite à une variation de la puissance mécanique à l'entrée de la génératrice puis l'augmentation de la charge. Les résultats de simulation sont présentés pour expliquer les différents comportements du système, et surtout vérifier l'équilibre de puissance entre la génératrice le réseau et la charge.

Conclusion générale

Cette étude nous a permis d'aborder la problématique de la micro- hydroélectricité sur le réseau pour une meilleur exploitation des ressources naturelles existantes en Algérie, avec la satisfaction de valoriser une énergie renouvelable, donc non polluante, non épuisable et qui est intéressante économiquement, pour cela nous avons opté pour un site qui présente des caractéristique permettant d'obtenir un potentiel énergétique qui peut être exploité.

Notre étude a été faite particulièrement sur le réseau d'eau potable de la région de Tizi-ouzou où on a choisi un lieu pour l'emplacement de la turbine hydraulique, ce lieu est celui d'Iferfounene au niveau du réservoir de Soumer, où on a choisi comme génératrice la génératrice asynchrone a cage d'écureuil, on considère les pompes de refoulement comme charge et on suppose que la génératrice débite sur le réseau basse tension. Et pour cela nous avons réalisé une simulation sous (Matlab /Simulink), Les résultats de simulation ont été présenté pour expliquer les différents comportements du système et surtout vérifier l'équilibre de puissance entre la génératrice le réseau et la charge, en cas de variation de la puissance mécanique à l'entrée de la génératrice, ce qui veut dire la variation du débit d'eau.

Les résultats de simulation ont montré que la micro-centrale installée sur le réseau peut assurer l'alimentation des pompes de refoulement et contribuer à la production du réseau surtout si on peut valoriser la micro-centrale par l'augmentation du débit turbiné.

Enfin nous espérons que ce travail sera un guide pratique pour la réalisation de projet de micro-centrale hydroélectrique en Algérie.

Références bibliographique

- [1] :Sandrine RAMEAU,La micro-hydraulique sur réseau d'adduction et d'assainissement septembre 2003
- [2] :Jean Marc PAGES, Guide pour le montage de petite hydroélectricité
- [3] :E. DAHBANI SMCH/CDER,les micros centrales hydroélectriques, document internet
- [4] :Marc-André Perron, Nicolas Guérin,Jean-Denis Allaire,Conception d'une mini-centrale hydroélectrique,Université du Québec à Chicoutim
- [5] :G. Schneider et K.Wirth, Construction d'une Mini-centrale. Hydroélectricité avec turbine à impulsion Radiale au Barrage Wehra, Klebsattel
- [6] : Jean François Afolter, Implantation de mini-centrales hydroélectriques sur le Réseau d'Eau Potable du Service Intercommunal de Gestion15-12-2006
- [7] : Le choix,ledimensionnement et les essais de réception d'une mini-turbine
- [8] : Micro-centrale Hydraulique
- [9] :Moulin de CHIGNY, Etude de faisabilité demicro-centrale hydroélectrique
- [10] :Sylvain PERRIN, Petites centrales hydrauliques
- [11] : Cogénération et énergie renouvelable - Section 8, Petites centrales hydraulique, Mai 2010
- [12] : Générateurs et installations électriques
- [13] :M. Ivan Sanchez, Développement d'une commande pour mini-centrales hydro-électriques
- [14] : Moussa Siddo ABDOULAZIZ, Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne,2007
- [15] : Etude de l'implantation d'une mini centrale hydroélectrique sur le réseau d'eau potable à Tizi-Ouzou, mémoire d'ingénieur dirigé par :Mr-A.MIOUT et réalisé par :BOUNOIRE TAOUS,BEN HAMOUM FATIHA ,AIT HAMOU YAMINA
- [16] : Dimitrios A,Les éléments nécessaires pour la gestion d'un projet de microcentrale hydroélectrique,Etude de cas d'une PCH en Grèce,GéorgakèllosUniversité du Pirée
- [17] : L. DALMASSO, Cours d'électrotechnique : machine tournantes à courant alternatifs »Edition Berlin,1999
- [18] : Le moteur asynchrone triphasé (Université Menpeullier 2008-2009)

- [19] :G. Pinson, Cours machine synchrone
- [20] : Les cours machine synchrone : technologie et différents modes d'alimentation des machine synchrone.
- [21] : Cloude DIVOUX, machine synchrone
- [22] :Polycopies du TP 423 « alternateur triphasé » U.M.M.T.O,département d'électrotechnique.
- [23] : C 24 Conversion alternatif- alternatif ; Transformateur, document internet
- [24] :Dr. A. SCHLEISS, Turbeau ; Turbinage des eaux potable, communication 44, Lausanne2010
- [25] : Michel POLOUJADOUF, Machine Asynchrone,Université Piere et Marie Curie

Les paramètres de la génératrice asynchrone

- Puissance nominale

$$P_n = 110 \text{ KW}$$

- La tension entre phase

$$V_{\text{neff}} = 400 \text{ V}$$

- La fréquence
 $f = 50 \text{ Hz}$
- Résistance du stator

$$R_s = 0.02155 \Omega$$

- Inductance du stator

$$L_s = 0.000226 \text{ H}$$

- Résistance du rotor

$$R_r = 0.0123 \Omega$$

- Inductance du rotor

$$L_r = 0.000226 \text{ H}$$

- Mutuelle Inductance

$$L_m = 0.01038 \text{ H}$$

Inertie

$$J = 2 \text{ Kg/m}^2$$

- Frottement

$$F = 30 \text{ N.m.s}$$

Nombre de paire de pôles

$$P = 2$$

Les paramètres de la ligne

Fréquence

$$F = 50 \text{ Hz}$$

$$R_1 = 0.01273 \Omega/\text{Km}$$

$$R_0 = 0.3864 \Omega/\text{Km}$$

$$L_1=0.9337.10^{-3} \text{ H/Km}$$

$$L_0=4.1264.10^{-3} \text{ H/Km}$$

$$C_1=12.7410^{-9} \text{ F/Km}$$

$$C_0=4.1264.10^{-3} \text{ F/Km}$$

Longueur

$$L=0.1\text{Km}$$

$$Q_n=100\text{KVA}$$

$$F=50\text{Hz}$$

Les paramètres du transformateur

$$V_{1\text{eff}}=25\text{KV}$$

$$V_{2\text{eff}}=400\text{V}$$

$$R_1=0.01\text{pu}$$

$$R_2=0.01\text{pu}$$