

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : Electrotechnique
Spécialité : Energie et environnement

Présenté par : **BOUKEFFOUS Houssam Eddine**

ABDERREZAK Zakaria

Thème

**Modélisation et commande d'un système de
conversion électromécanique (STEP)**

Soutenu publiquement, le / 07 / 2019 , devant le jury composé de :

Dr.CHIALI Anisse	Maître de conférence B	ESSA. Tlemcen	Président
Dr.FARADJI Djamila	Maître de conférence B	ESSA. Tlemcen	Directeur de mémoire
Dr.GHOMRI Amina	Maître de conférence A	ESSA. Tlemcen	Co- Directeur de mémoire
Dr.Mohammed bennekrouf	Maître de conférence B	ESSA. Tlemcen	Examineur 1
Dr.KERAI Salim	Maître de conférence B	U. Abou Bekr Belkaid Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire : 2018 /2019

Résumé

Ce mémoire se répartie en deux grandes parties , la première est consacrée à une description de l'énergie hydroélectrique, et les types des centrales afin de justifier le choix fixé sur la machine synchrone à aimant permanent. Dans la deuxième partie nous avons réalisé :

- Une modélisation des deux organes principaux de la centrale (turbine et machine), la machine est modélisée dans les deux modes (moteur et génératrice)
- Une commande vectorielle de la machine pour contrôler le couple et la vitesse séparément.
- Une simulation de la centrale avec l'utilisation de la commande vectorielle, en utilisant le logiciel MATLAB/Simulink afin de valider la fiabilité et le bon fonctionnement du système, ainsi que la fiabilité de la commande qu'on a fait.

Mots clés : Energie hydraulique , STEP, Moteur synchrone, Modélisation, Simulation.

Abstract

This memory is divided into two main parts, the first is devoted to a description of the hydroelectric energy, and the types of power plants to justify the choice on the machine. synchronous permanent magnet. In the second part we realized :

- A modeling of the two main organs of the plant (turbine and machine), the machine is modeled in both modes (engine and generator)
- A vector control of the machine to control the torque and speed separately.
- A simulation of the plant with the use of the vector control, using MATLAB / Simulink software to validate the reliability and the good functioning of the system, as well as the reliability of the control that we made.

Key words : hydraulic energy, STEP, synchronous motor, modeling, simulation.

ملخص

في هذه الأطروحة، سنقدم في المقام الأول وصفاً للطاقة الكهرومائية وأنواع المحطات من أجل تبرير الاختيار المثبت على الجهاز المتزامن بالمغناطيس الدائم.

ثم تكرر دراسة أكثر تفصيلاً من أجل:

- نمذجة الجهازين الرئيسيين لمحطة توليد الطاقة (التوربينات والآلة)، ثم تصميم الآلة في كلا الوضعين (المحرك والمولد).
- التحكم في ناقلات الجهاز للسيطرة على عزم الدوران والسرعة بشكل منفصل.
- محاكاة المحطة باستخدام التحكم في ناقل الحركة، باستخدام برنامج MATLAB/Simulink من أجل التحقق من موثوقية النظام وحسن أدائه، وبالتالي موثوقية عنصر التحكم الذي تم القيام به.

الكلمات المفتاحية: الطاقة الهيدروليكية، محطة تحويل الطاقة بالضخ، المحرك المتزامن، النمذجة، المحاكاة.

Remerciement

Nous remercions d'abord ALLAH le tout puissant de m'avoir donné la force, la patience et la volonté pour achever ce travail.

Si nous sommes ici aujourd'hui, c'est grâce au soutien et aux encouragements de nos parents et de nos frères et sœurs, nous exprimons nos plus vifs remerciements.

Nous remercions nos promoteurs madame KHERBOUCH DJAMILA et madame GHOMRI AMINA pour son long soutien et ses efforts qui nous ont permis de réaliser ce mémoire.

Nous remercions aussi tous les enseignants nobles qui nous ont aidés de près ou de loin tout au long de notre parcours universitaire.

Dédicaces

*Je dédie ce travail, à mes parents qui m'ont orienté et soutenu
dans les choix difficiles et à mes sœurs et frères, sans oublié*

Bentayeb Malak

*A ma grande famille que ce soit du côté paternel ou du côté
maternel.*

A tous mes amis : Salah, Amine, Samir, Aymen, Brahim, Sofiane

*Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à
l'aboutissement de ce mémoire.*

ZAKARIA....

Dédicace

*Je dédie cette goutte de sueur qui sillonne mon front pour aller remplir Ce
modeste travail :*

A la source d'amour et de tendresse, à celle qui m'a tout donné :

A toi ma chère mère "ZOHRA"

A mon symbole de sacrifice et d'affection, à celui que j'estime le plus :

A toi mon cher père "AHMED"

*A mes très chères frères : FATIMA ZOHRA, WALID, ZINEDDINE
et CHAHLA Pour vous quatre, je vous souhaite le bonheur et la réussite.*

A tous les autres membres de ma grande famille oncles, tantes et cousins.

*A mes très chères amis : SALAH, HASSAN, MAKHTER, YASSER,
YASSINE, ABDESLAM*

A mes très chères amis que je les connais dans ces 3ans

A mon binôme : ABDEERRAZAK ZAKARIA pour ces efforts.

*A toute personne dont j'ai une place dans son cœur, que je connais, que
j'estime et que j'aime. , Mes meilleurs vœux de succès et de bonheur dans leur
vie.*

HOUSSAM EDDINE

Table des matières

Résumé	I
Abstract	II
ملخص	III
Remerciment	IV
Dedicace	V
Introduction générale	1
1 Généralités sur les centrales hydroélectriques	4
Introduction	4
1.1 Centrales hydroélectriques	5
1.2 Catégories des centrales hydroélectriques	5
1.2.1 Centrales gravitaires	5
1.2.2 Les stations de transfert d'énergie par pompage STEP	7
1.3 Les STEPs :	8
1.3.1 Historique de développement des STEP :	8
1.3.2 Les types des STEPs :	10
1.3.3 Principe de fonctionnement des centrales hydroélectriques :	10
1.3.4 Qualités des STEPs :	11
1.3.5 La puissance d'une STEP :	12
1.3.6 Performances dynamiques des STEPs :	12
1.3.7 Les enjeux et la rentabilité liées aux centrales hydroélectriques :	12
1.4 Les équipements électromécaniques d'une centrale hydroélectrique :	13
1.4.1 La turbine :	13

1.4.1.1	Catégories des turbines :	14
1.4.1.2	Principaux types de turbine :	14
1.4.2	Pompes :	18
1.4.2.1	Pompes centrifuges :	18
1.4.2.2	Pompe volumétrique :	20
1.4.2.3	Couplage des pompes :	20
1.4.3	Alternateur :	23
1.4.3.1	Les différents types d'alternateur :	23
1.4.3.2	Description de la machine synchrone à aimant permanent : . . .	24
1.4.3.3	Caractéristiques de la machine synchrone à aimant permanent : .	24
1.4.4	Transformateur :	25
1.5	Les STEPs dans le monde :	26
Conclusion		28
2 Modélisation et commande des différentes parties de la centrale		29
Introduction		29
2.1	Modélisation du groupe pompe turbine :	30
2.2	Machine synchrone :	30
2.2.1	Machine synchrone a aimant permanent MSAP :	30
2.2.2	Fonctionnement de la machine synchrone MSAP :	30
2.3	Modélisation de la machine synchrone MSAP en mode moteur :	31
2.3.1	Hypothèses simplificatrices :	31
2.3.2	Mise en équations de la machine MSAP dans le repère (abc) :	32
2.3.2.1	Equations électriques :	33
2.3.2.2	Equations magnétiques :	34
2.3.2.3	Equations mécaniques :	35
2.3.3	Transformation de Park :	35
2.3.4	Application de la transformation de Park à la MSAP :	37
2.4	Modélisation de la machine synchrone MSAP en mode génératrice :	38
2.4.1	Modélisation de la GSAP à vide :	39
2.4.2	Modélisation de la GSAP en charge :	39
2.5	Commande vectorielle de la génératrice GSAP :	40

2.5.1	Principe de la commande vectorielle de la GSAP :	40
2.5.2	Avantages et inconvénients de la commande vectorielle [13]	43
2.6	Synthèse des contrôleurs PI du convertisseur de puissance	43
2.6.1	Régulation de la tension :	43
2.6.2	Régulation du courant :	44
2.7	Contrôle de la vitesse de rotation	46
Conclusion		49
3 Simulation et interprétations des résultats		50
Introduction		50
3.1	Introduction sur logiciel de simulation	50
3.1.1	La barre d'outils Simulink	51
3.1.2	Bibliothèque de SIMULINK :	52
3.2	Résultat de simulation	53
3.2.1	Résultat de simulation à couple turbine fixe	53
Interprétation	55
3.2.2	Résultat de simulation à un échelon de couple turbine	56
Interprétation	58
3.3	Test de robustesse :	58
Interprétation	60
Interprétation	62
Conclusion		63
Conclusion général		64

Table des figures

1.1	Central au file de l'eau en Suisse [1]	6
1.2	Central lac	6
1.3	Centrales d'éclusées	7
1.4	Les différentes technologies de stockage [9]	9
1.5	Principe de fonctionnement des STEPs [3]	11
1.6	Turbine Pelton verticale à 6 jets [4]	15
1.7	Turbine CrossFlow [5]	16
1.8	Turbine Francis	17
1.9	Turbine Kaplan [6]	18
1.10	Coplage en serie des deux pompes	21
1.11	Les caractéristiques de couplage en série	21
1.12	Coplage en parallèle des deux pompes	22
1.13	Les caractéristiques de couplage en parallèle	22
1.14	Transformateur	26
2.1	Shéma de la MSAP dans le repère abc	32
2.2	MSAP dans le repère de PARK	36
2.3	Schémas fonctionnelle du modèle de Park de la MS	38
2.4	Structure générale de la commande vectorielle de la GSAP	42
2.5	Boucle de régulation de tension	44
2.6	Boucle de régulation du courant	45
2.7	Caractéristique couple-vitesse de la turbine pour différentes valeurs de débit	47
2.8	Schéma pour annuler l'erreur statique	48
3.1	Exemple simulink	51
3.2	Barre d'outil de Simulink	52
3.3	Les courants statorique i_{abc}	53

3.4	Les tensions V_{abc}	53
3.5	Les courants i_d et i_{dref}	54
3.6	Les courants i_q et i_{qref}	54
3.7	La vitesse de rotation w et w_{ref}	55
3.8	Le couple électromagnétique	55
3.9	Les courants statorique i_{abc}	56
3.10	Les tensions V_{abc}	56
3.11	Les courants i_d et i_{dref}	57
3.12	Les courants i_q et i_{qref}	57
3.13	La vitesse de rotation w et w_{ref}	58
3.14	Les courants i_d et i_{dref}	59
3.15	Les courants i_q et i_{qref}	59
3.16	La vitesse de rotation w et w_{ref}	60
3.17	Les courants i_d et i_{dref}	61
3.18	Les courants i_q et i_{qref}	61
3.19	La vitesse de rotation w et w_{ref}	62
3.20	La machine asynchrone à aimant permanent MSAP	67

Liste des tableaux

1.1	Principaux pays équipés en STEP	27
3.1	Les principale librairies dans Simulink	52
3.2	Les paramètres de la machine	66
3.3	Les paramètres du correcteur de commande	66

Introduction générale

L'eau et l'énergie sont deux facteurs essentiels pour l'être humain, et de manière globale, l'augmentation de la population mondiale et des niveaux de vie font augmenter la consommation de ces facteurs afin d'assurer le confort et le bien-être de la race humaine.

En parallèle a son utilisation pour boire et irriguer, l'eau offre un potentiel énorme et depuis longtemps utilisé pour subvenir au besoin énergétique des humains, ceci dit l'eau est utilisée pour produire de l'énergie électrique (16% de la production mondiale vien des barrages d'eau)

L'énergie électrique est un élément indispensable pour le développement et l'évolution des sociétés humaines soit pour moderniser les conditions de vie ou bien pour améliorer les activités industrielles. L'énergie électrique joue un rôle très important, par sa facilité d'utilisation et le pluralisme des domaines d'activités, elle est donc une forme d'énergies indispensable car tous nos équipements modernes ont besoin de cette énergie sous cette forme (électrique) pour fonctionner.

Aujourd'hui, plus de tiers de la population ne possède pas d'accès a l'électricité et d'ici 2025, il est prévu que ce chiffre atteigne 50% de la population mondiale si aucune action n'est prise (Sustainable Hydropower Association (SHA), 2006). En parallèle, la production d'énergie maintenant est basée sur l'énergie fossile. Ces énergies participent avec un pourcentage élevé a la pollution environnemental (émission de gaz à effets de serre, CO_2), et aux changements climatiques. En plus les réserves en énergies fossiles sont limitées. L'enjeux majeur qui obsède les gouvernements actuellement c'est de préserver la terre en contribuant à la diminution de l'émission des gaz à effets de serre CO_2 , méthane et ozone

Or Il existe un autre impact qui est l'augmentation de la demande énergétique par habitant. Plus l'être humain vieilli plus ses besoins en énergie augmente par conséquent sa consommation énergétique augmente. Cette consommation croit par un facteur de trois à cinq dans les pays en développement et ce d'ici 2050 (Word Bank, 2006). Les pays en développement utilisent

les énergies fossiles pour couvrir leur besoin énergétique. Il est de ce fait fondamental que la production d'énergies qui procurera l'électricité à cette population future doit être de source d'énergie renouvelable, propre, et durable afin de minimiser l'impact sur l'environnement.

L'augmentation de la consommation énergétique conduit à des conséquences sur l'environnement. Donc il est indispensable de trouver des solutions propres et durables pour la production de l'énergie. L'accès à une source d'énergies renouvelable, durable, et propre est un pas très important pour la diminution de la pauvreté, la croissance économique, et la protection environnementale.

Parmi les sources de production de l'énergie électrique par le biais d'une source renouvelable c'est l'hydroélectricité ou bien les centrales hydroélectriques. L'énergie hydroélectrique est l'investissement de l'énergie potentielle d'eau, ou bien la transformation de l'énergie cinétique de l'eau en énergie mécanique par la turbine, puis en énergie électrique à l'aide d'un alternateur.

L'hydroélectricité devient alors la première source d'énergie renouvelable, et la troisième source d'énergie mondiale après le charbon et le gaz, avec un pourcentage de 16% de la production électrique mondiale.

L'énergie hydroélectrique est la plus économique des énergies renouvelables, elle possède un facteur de transformation très élevé, et un rendement excellent. Elle offre une meilleure densité de puissance entre autre c'est une technologie relativement plus ancienne que ses autres conquérant donc elle est maîtrisée et son coût ne cessent de diminuer, il n'est pas secret que les nouvelles technologies prennent du temps pour prouver leur efficacité et leur endurance et présentent tout le temps des défis de mise en œuvre ceci dit un coût important.

De côté environnemental l'énergie hydroélectrique est favorable, elle ne dégage pas les gaz à effet de serre, CO_2 ... etc... Mais chaque technologie présente certains inconvénients, l'hydroélectricité possède des désavantages environnementaux tel que l'Inondation des terres sous le niveau du réservoir produisant l'électricité ; Baisse de la production biologique en aval due à la retenue.

Entre autre la diminution de la taille des turbines a permis l'installation des systèmes dans des rivières et par conséquent réduire les inconvénients voir les multiplier par zéro.

Le premier chapitre fait d'objet d'une description rapide de l'énergie hydroélectrique, et les types des centrales afin de justifier le choix fixé sur les stations de transfert d'énergie par

pompage STEPs. Nous avons expliqué le rôle de ces stations dans le stockage d'énergie et citer les différents composants de la STEP.

Dans le deuxième chapitre nous avons modélisé les deux organes principaux de la centrale (turbine et machine), la machine est modélisée dans les deux modes (moteur et génératrice). Ensuite nous avons fait la commande vectorielle de la machine pour contrôler le couple et la vitesse séparément.

Le troisième chapitre est consacré pour la simulation de la centrale avec l'utilisation de la commande vectorielle, en utilisant le logiciel MATLAB/Simulink.

Enfin une conclusion générale, donne une synthèse des principaux résultats et résume l'apport de ce travail.

Chapitre 1

Généralités sur les centrales hydroélectriques

Introduction

L'énergie hydraulique utilise l'énergie qui se trouve dans l'eau (potentiel) pour la transformer en électricité. Le poids et la vitesse d'eau fait tourner une turbine donc l'énergie hydraulique est transformée en énergie mécanique. La turbine entraîne à son tour un alternateur (génératrice) qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Aujourd'hui l'énergie hydraulique est devenue la première source mondiale de production d'énergie électrique dans le domaine des énergies renouvelables.

Ce chapitre fait d'objet en premier lieu d'une présentation des centrales hydroélectriques en commençant par l'explication de l'énergie hydroélectrique, ensuite en passe aux centrales hydrauliques et leurs types.

Puis on passera aux composants qui constituent la centrale hydraulique et les différents types des turbines. Ensuite on présente les types des machines utilisées dans les centrales hydrauliques on donnant une grande importance à présenter la machine synchrone à aimant permanent qui serait la machine étudié.

Ensuite, on va présenter les stations de transfert d'énergie par pompage STEP, en donnant une explication, puis le rôle de ces stations dans le stockage d'énergie mise à disposition du réseau électrique.

Enfin, on termine ce chapitre par une conclusion qui résumera le travail étudié qui serait un travail très important pour passer au chapitre suivant.

1.1 Centrales hydroélectriques

L'énergie hydroélectrique est une ancienne énergie utilisée pour la production électrique développée, et bénéficiant de ce fait d'une très grande maturité technologique. Elle est aujourd'hui de très loin la première énergie renouvelable électrique, produisant dans le monde, et la troisième énergie après le charbon et le gaz.

Une centrale hydroélectrique contient une prise d'eau ou d'une retenue d'eau, et une installation de production. L'eau passe par le point de prise (barrage) et le point de restitution (centrale) par l'intermédiaire d'un canal. La puissance produite dépend de la hauteur de chute et le débit d'eau. Plus la différence de hauteur est importante, plus la pression de l'eau dans la centrale sera grande et plus la puissance produite sera importante.

La quantité d'énergie est proportionnelle à la quantité d'eau turbinée multipliée par la hauteur de chute. Il existe plusieurs modes de production d'électricité à partir de l'hydraulique terrestre, qui remplissent des rôles différents dans l'alimentation du réseau électrique.

1.2 Catégories des centrales hydroélectriques

1.2.1 Centrales gravitaires

Trois types de centrales gravitaires sont classées selon la hauteur de chute et le débit d'eau turbiné :

- **Centrales au fil de l'eau** : l'idée consiste à installer une turbine dans le chemin d'écoulement d'un fleuve ou une rivière d'où l'appellation "au fil de l'eau". Cette prouesse technologique permet de fournir une puissance moyenne injectée directement sur le réseau. La mise en place de système est relativement simple, et parfois le système est dotée d'un réservoir parallèle d'eau éventuellement utilisé lorsque le débit d'écoulement est trop bas.

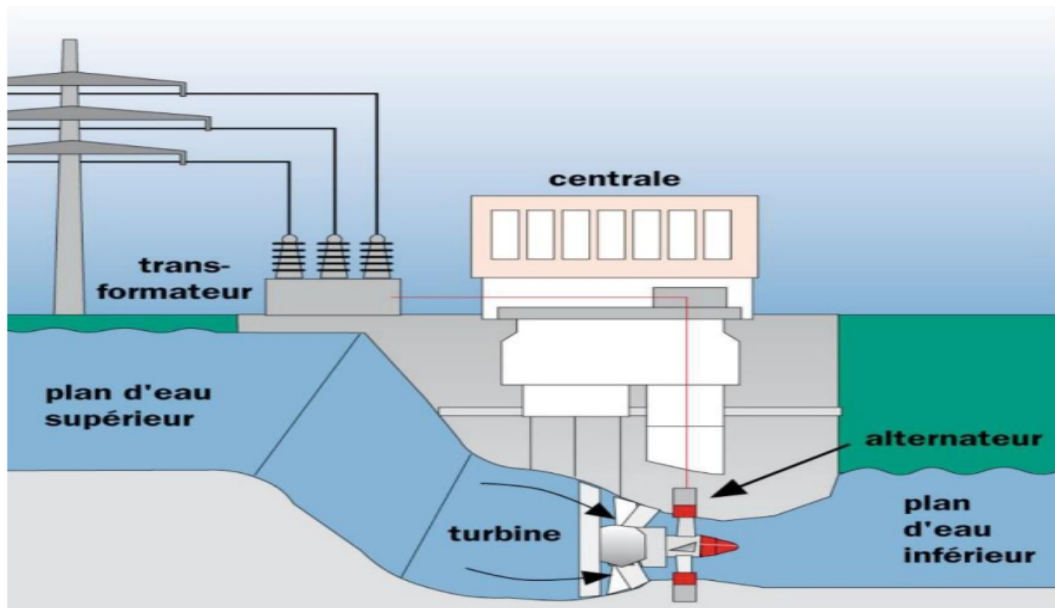


FIGURE 1.1: Central au file de l'eau en Suisse [1]

- **Centrales lacs** : (plus de 300m de chute) appelée également centrale a haute chutes sont mis en place avec un retour d'eau par le barrage l'électricité est générée grâce à la chute d'eau ces centrales sont automatiquement appelée dans le cas de pics de tensions.

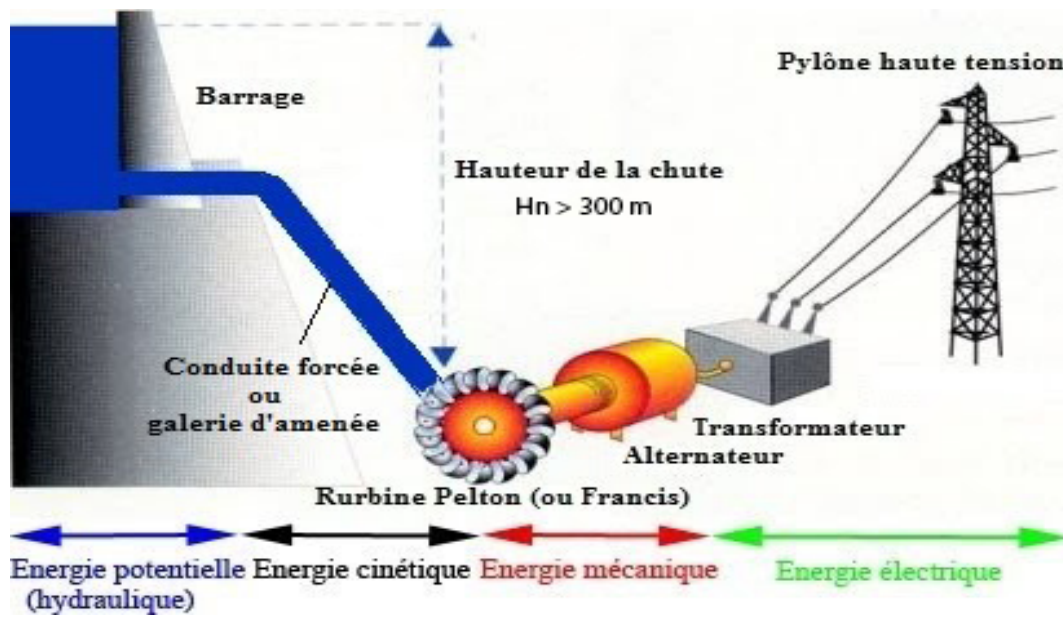


FIGURE 1.2: Central lac

- **Centrales d'éclusées** : (la hauteur de chute entre 25 m et 300 m) ce type de centrale est utilisé dans les grands fleuves, la pente doit être forte, les usines hydroélectriques (turbines) sont placées éventuellement au pieds de ces derniers, on peut construire en parallèle aussi un barrage au fleuve pour assurer la continuité d'écoulement en cas d'éventuel perturbation (système d'appuie).

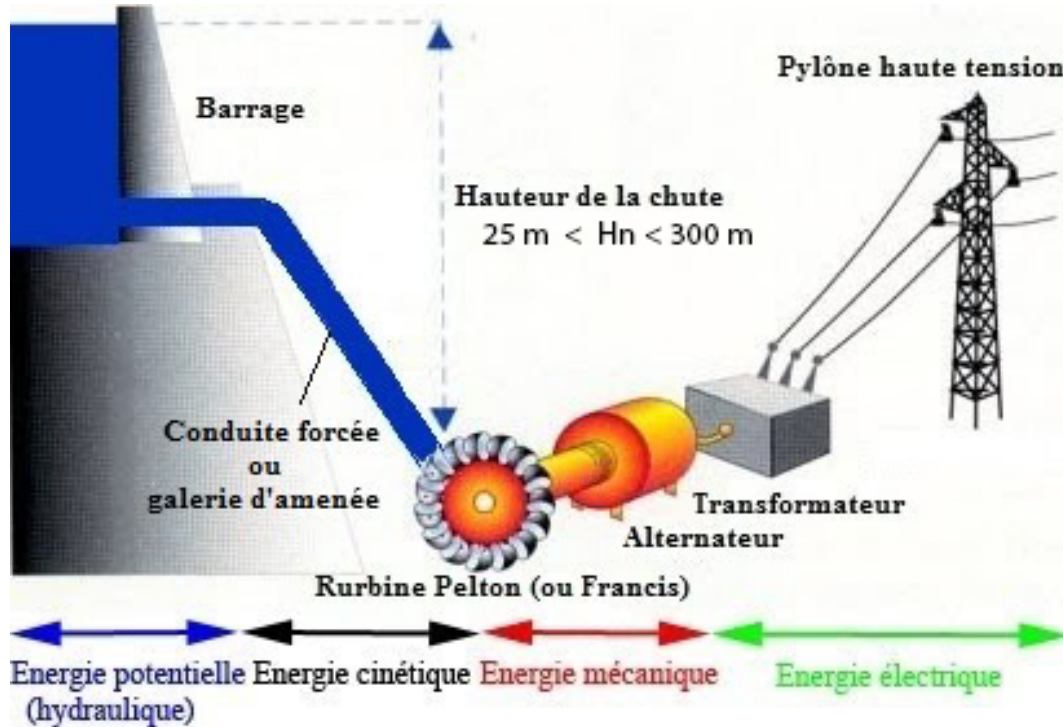


FIGURE 1.3: Centrales d'éclusées

1.2.2 Les stations de transfert d'énergie par pompage STEP

Les stations de transfert d'énergie par pompage possèdent deux bassins un bassin en amont et un bassin en aval, permettant d'assurer le transfert d'eau l'un vers l'autre entre lesquels une usine équipée de dispositifs réversible TURBINE-POMPE. Elles permettent de stocker l'électricité dans les heures creuses en pompant l'eau du bassin inférieure vers le bassin supérieur, et de produire l'électricité dans les heures de pointe, l'eau du bassin supérieur est turbine vers le bassin inférieure. Contrairement au précédente la STEP n'est pas considérée comme productrice d'énergie de source renouvelable parce qu'elle consomme l'énergie électrique pour le pompage. Le rapport entre l'énergie produite et l'énergie consomme entre 70 à 80 %.

1.3 Les STEPs :

Parmi les catégories des centrales hydroélectriques, on s'intéresse maintenant sur les STEP (station de transfert d'énergie par pompage), ou « pumped Storage power plants » (PSP) en anglais. Le stockage direct de l'énergie est une opération difficile surtout pour les grandes quantités d'énergie. Pour faciliter le stockage il faut transformer cette énergie en une autre forme pour assurer un bon rendement. Plusieurs moyens de stockage existent

- **Énergie mécanique (potentielle ou cinétique) :** Stockage gravitaire par pompage (STEP), stockage par air comprimé (CAES), volants d'inertie.
- **Énergies électrochimique et électrostatique :** Batteries, condensateurs, super conducteurs.
- **Énergies thermique et thermochimique :** chaleur Sensible ou chaleur latente, énergie par sorption.
- **Énergie chimique :** hydrogène, méthanisations,... etc...
- **Énergie électromagnétique** Bobine supraconductrice, supercapacité.

Chaque mode de stockage contient des avantages et des inconvénients selon le mode d'utilisation. Les systèmes de stockage d'électricité sont souvent cartographiés selon leur temps de décharge et leur dimensionnement en puissance. La figure 1.4 nous permet de choisir le mode de stockage correspondant :

1.3.1 Historique de développement des STEP :

Les premières STEP ont pris naissance au début du XXe siècle dans le contexte de systèmes électriques locaux, non interconnectés, souvent constitués d'un couple : ville-centrale hydroélectrique. Il s'agissait de répondre aux pics de demande électrique des villes, en pompant la nuit pour restituer de l'énergie sur le réseau en heure de pointe. La première STEP pourrait avoir été celle de Ruppoldingen en Suisse, sur l'Aar, en 1902. La première STEP en Allemagne serait celle de NIEDERWARTHA, mise en service en 1929. La STEP des Lacs Blanc et Noir, dans les Vosges, a été construite en 1933-1934, en liaison avec l'usine hydroélectrique de Kembs sur le Rhin, pour les besoins de la ville de Mulhouse ; sa mise en service a été retardée jusqu'en 1938 à cause d'un accident.

Une seconde vague de développement des STEP se situe dans les années 1970-1990, en lien

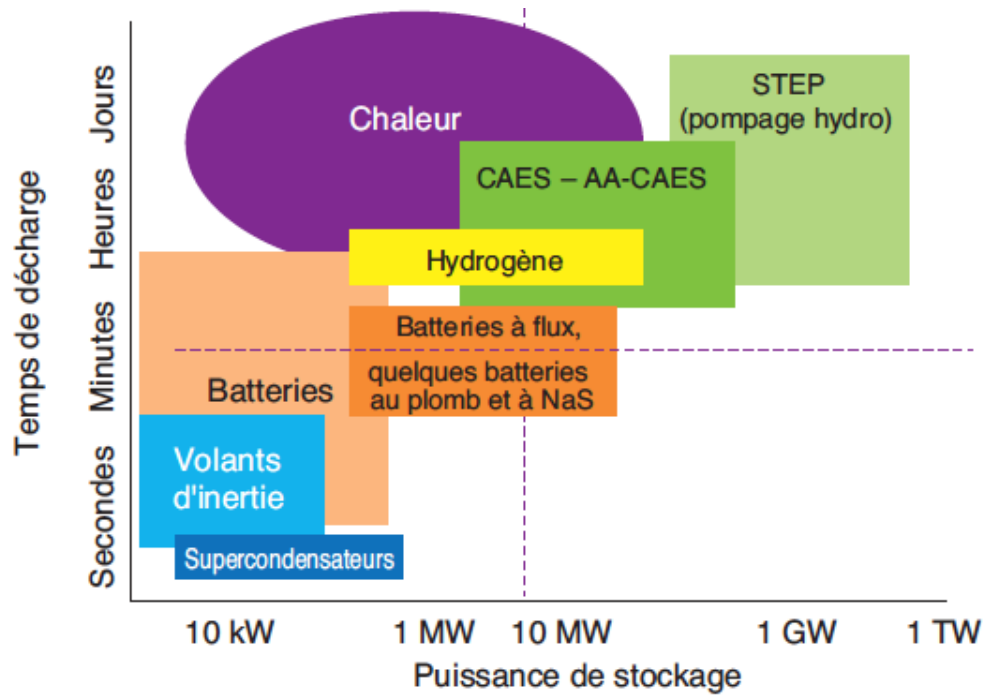


FIGURE 1.4: Les différentes technologies de stockage [9]

avec les constructions des grandes centrales de production d'électricité, nucléaires ou centrales à charbon, qu'il est plus intéressant de faire fonctionner le plus longtemps possible, comme toutes les installations ayant un coût d'investissement élevé. La STEP en est alors le complément. Les STEP de Ludington (États-Unis, 1976), Dinorwig (RU, 1984), Guanzhou (Chine, 2000) ont été construites pour répondre à ce besoin.

Une troisième vague de développement a commencé au début du *XXI^e* siècle, la STEP répondant aux besoins de flexibilité des systèmes électriques, et le stockage d'énergie se trouvant susceptible de favoriser ou même rendre possible l'intégration des énergies renouvelables intermittentes. Ce développement concerne notamment l'EUROPE et plus récemment l'Asie (Chine).

Les STEPs sont employées pour déplacer de grandes quantités l'énergie sur une période de plusieurs heures/jours (journalière/hebdomadaire). La technique de pompage-turbinage est existée depuis le 19^{ème} siècle, elle permet de stocker une grande quantité d'énergie électrique sous forme d'énergie potentielle à travers l'eau. Une station de transfert d'énergie par pompage est constitué de deux bassins à différente altitude, aux heures de pointe (faible demande) la STEP stocke l'énergie, en pompant l'eau du bassin inférieure vers le bassin supérieure. aux heures creuses (forte demande) elle produit l'énergie en turbinant l'eau vers le bassin inférieure.

La demande d'énergie est faible le week-end que les jours de semaine et la nuit que le jour.

1.3.2 Les types des STEPs :

On distingue deux types de STEP :

- Journalier : lorsque les réservoirs ne stockent que l'eau nécessaire à quelques heures de fonctionnement.
- Hebdomadaire : lorsqu'ils permettent quelques dizaines d'heures de pompage ou turbinage.

L'écart de prix entre heures creuses et heures pleines plus le rendement du cycle sont deux facteurs essentiels pour générer un revenu en effectuant des cycles de pompage-turbinage.

Les STEP génèrent un revenu lorsque l'écart de prix est strictement supérieur au rendement de cycle. Les STEPs hebdomadaires sont avantageux, elles ont des cycles bénéficiaires plus que les STEPs journalières.

1.3.3 Principe de fonctionnement des centrales hydroélectriques :

Les centrales hydroélectriques se divisent en deux unités principales :

- Une retenue d'eau ou prise d'eau qui emmagasine l'énergie contenue dans l'eau (énergie de potentiel), une ouverture d'échappement est mise en place pour canaliser la chute d'eau et contrôler le flux à n'importe quel moment (citer l'utilisation des vannes d'ouvertures /fermeture).
- L'usine ou bien la centrale qui contient un dispositif réversible (la turbine), ce dernier utilise la chute d'eau et le débit pour faire tourner la turbine, par la suite la turbine entraîne l'alternateur par le biais d'un arbre permettant la conversion d'énergie. Il est à noter que l'utilisation d'un transformateur est primordiale pour permettre l'injection de l'électricité produite dans le réseau et enfin l'eau qui a servi perd naturellement son énergie et rejoint la rivière ou un bassin inférieur à travers les Canales de fuites .

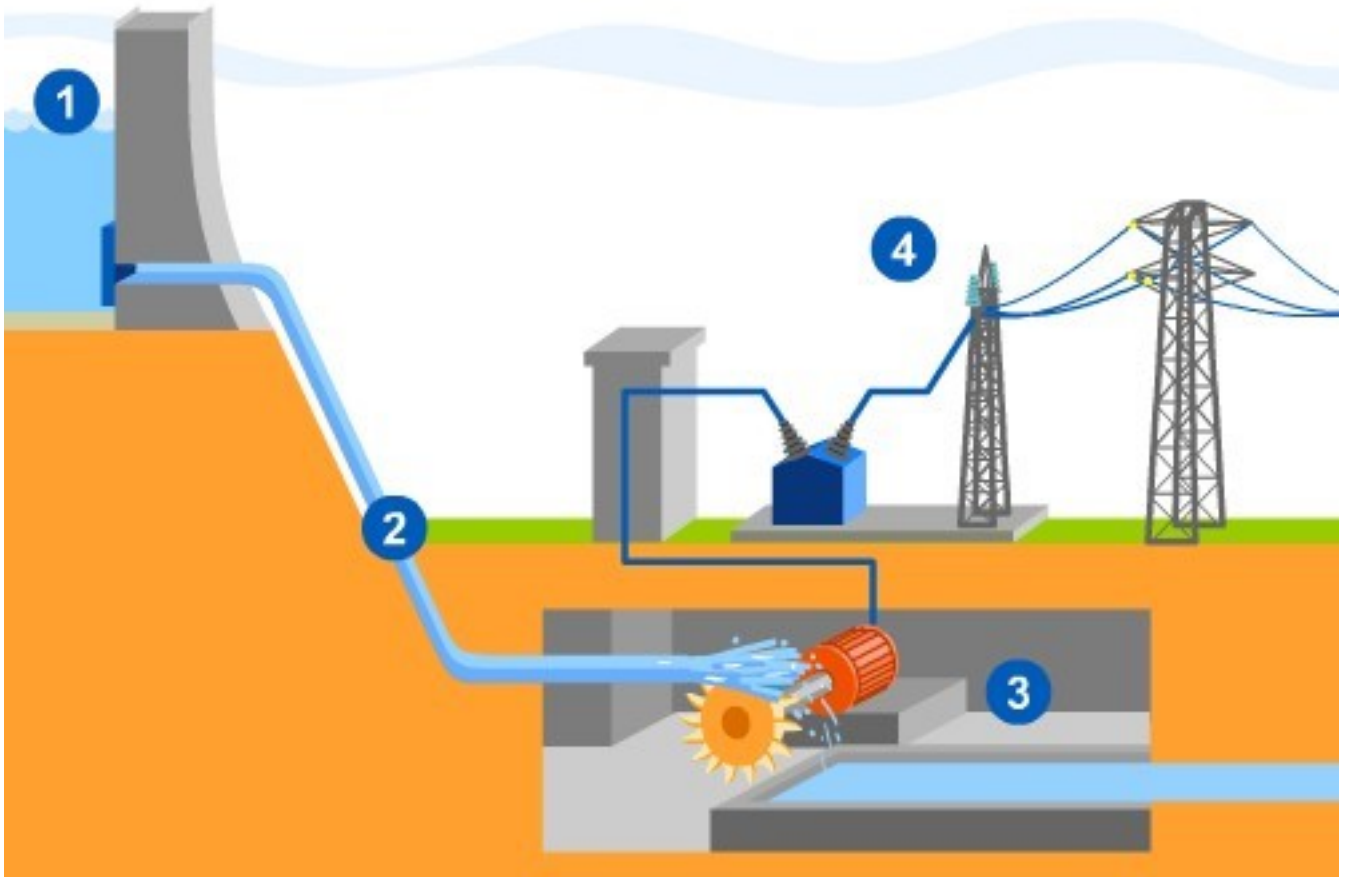


FIGURE 1.5: Principe de fonctionnement des STEPs [3]

- 1 La retenue de l'eau :** Un barrage retient de grandes quantités d'eau.
- 2 La conduite forcée de l'eau :** Des vannes sont ouvertes pour acheminer l'eau jusqu'à la centrale par de longs tuyaux.
- 3 La production d'électricité :** L'eau fait tourner la turbine qui entraîne un alternateur
- 4 L'adaptation de la tension :** Un transformateur élève la tension de l'électricité pour le transport dans les lignes haute tension.

1.3.4 Qualités des STEPs :

- Les STEPs stockent une énergie de l'ordre de 10 GWh
- STEP est la technologie de stockage la plus ancienne, et la moins coûteuse en termes d'investissement et de rendement par rapport aux autres technologies.
- D'après l'Union Française de l'Electricité ; il n'existe pas de technologie de stockage équivalente aux STEP, en terme de capacité, de volume, de compétitivité et de rendement.
- Les STEPs assurent la sécurité du système électrique. Leurs temps de réaction est très

court, elles absorbent rapidement l'électricité en cas de surtension pour protéger le système, elles couvrent aussi le demande en énergie en quelques minutes pour garantir l'équilibre du réseau électrique

- Les STEPs participent avec un grand pourcentage dans le réglage de la fréquence et le mécanisme d'ajustement

1.3.5 La puissance d'une STEP :

La puissance d'une STEP dépend de deux paramètres essentiels ; la hauteur de chute et le débit. Elle est donnée par la formule : $P = Q * H * \rho * g * r$

Tel que :

$H(m)$: c'est la hauteur de chute.

$Q(m^3/s)$: le débit d'eau.

$\rho = 1000kg/m^3$: la masse volumique de l'eau.

$g = 9.81m/s^2$: la constante d'accélération de la gravité.

r : est le rendement de l'installation, pour les centrales hydroélectriques entre 0.75 à 0.8.

Le rendement de la STEP est le rapport entre l'énergie produite et celle utilisée pour pomper l'eau. Généralement elle est de l'ordre de 80%. D'après EDF chaque heure de fonctionnement a pleine charge d'une centrale EDF de Grand 'Maison permet de réduire 142 tonnes d'équivalent pétrole, et de réduire l'émission de CO_2 de l'ordre de 990 tonnes.

1.3.6 Performances dynamiques des STEPs :

- Mode turbine : de 0 à 100 -> environ 2 minutes.
- Mode pompe : de 0 à 100 -> environ 5 minutes.
- De 100% en turbine à 100% en pompe -> environ 10 minutes.
- Mode turbine : de 50% à 100% -> presque 15 secondes.

1.3.7 Les enjeux et la rentabilité liées aux centrales hydroélectriques :

La production hydroélectrique présente un défi technologique et économique, pour mettre en place une usine hydroélectrique les couts croient plus la hauteur du barrage est importante. Les caractéristiques de l'aménagement et les frais liées aux contraintes sociales et environnementales

font la différence des frais d'investissement. Malgré ces frais mais les avantages économiques de cette usine permet de rendre l'investissement plus rentable grâce à la source hydraulique qui est gratuite, et les frais d'entretien qui sont réduits. L'hydroélectricité répond aux besoins de correspondance de la production électrique par leur système de stockage d'eau dans les réservoirs. Les fluctuations sont des facteurs majeurs pour la production d'électricité. Si les sources hydrauliques fortes alors la production croit de 15%, par contre s'il y a une grande sécheresse alors la production diminue de 30%. Ce problème est lié aux centrales de circuit ouvert (dans l'absence de pompe pour remonter l'eau vers le bassin supérieur).

1.4 Les équipements électromécaniques d'une centrale hydroélectrique :

Nous avons parlé déjà sur le complexe hydroélectrique qui contient les bassins, les conduites, maintenant on doit parler sur les équipements électromécaniques des centrales qui sont principalement la turbine et la génératrice.

1.4.1 La turbine :

La turbine transforme l'eau qui passe de la conduite en énergie de rotation. Les catégories d'installation hydroélectrique dans lesquelles les turbines sont employées sont les facteurs essentiels pour déterminer la forme et les caractéristiques de la turbine. Elle transforme l'énergie potentielle associée à une hauteur en énergie mécanique. Les turbines hydrauliques modernes sont le résultat de plusieurs années de développement progressif. La turbine contient des organes fixes, mobile, et de réglage. La partie fixe et de réglage sont utilisés principalement pour diriger l'eau sur la roue dans les meilleures conditions. Concernant la partie mobile est utilisée pour produire un couple moteur sur l'arbre toute en transformant la puissance disponible en puissance mécanique.

1.4.1.1 Catégories des turbines :

Deux catégories principales de turbines se distinguent :

i **Turbine à action** : la turbine à action est reposée par le fait que l'énergie de l'aubage est totalement sous forme d'énergie cinétique. La pression reste constante entre l'eau et l'aubage (pression atmosphérique). La roue de la turbine est dénoyée et tourne dans l'air. Un jet entraîne les augets en exerçant une force pour les mettre en mouvement de rotation. Ce mouvement est transformé en couple et puissance mécanique sur l'arbre de la turbine. Comme la turbine Pelton, et Banki.

ii **Turbine à réaction** : la turbine à réaction est une machine fermée. Elle utilise deux sources d'énergies; une énergie cinétique qui est la vitesse de l'eau, et une deuxième énergie qui est la différence de pression. Le principe de fonctionnement de ce type est basé sur :

- Création d'un tourbillon au moyen d'une bêche, d'aubages directeurs, ou les deux à la fois.
- Récupération du mouvement circulaire du tourbillon par les aubages d'une roue en rotation qui dévient les filets d'eau pour leur donner une direction parallèle à l'axe de rotation.

Comme la turbine Francis, et Kaplan.

1.4.1.2 Principaux types de turbine :

1. **Turbine Pelton** : Cette turbine est une turbine à action. Elle est utilisée pour des hauteurs de chute supérieures à 300m et des faibles débits. Sa roue est constituée d'augets en forme de double cuillère qui sont mis en mouvement par un jet d'eau provenant d'un injecteur, avec des échancrures médianes qui assurent une pénétration progressive optimale du jet dans l'auget. Le nombre d'augets varie en fonction de la hauteur de chute et de la vitesse spécifique. Une turbine Pelton peut être équipée de plusieurs injecteurs, jusqu'à 6. Un pointeau mobile à l'intérieur de l'injecteur assure le réglage du débit, qui est déplacé par un servomoteur hydraulique ou électrique. Ce pointeau est asservi à la régulation de la turbine. La turbine Pelton comporte aussi dans la majorité des cas un déflecteur qui se place rapidement entre l'injecteur et la roue pour dévier le jet, ceci pour éviter l'emballement de la turbine en cas de déclenchement brusque de la génératrice.

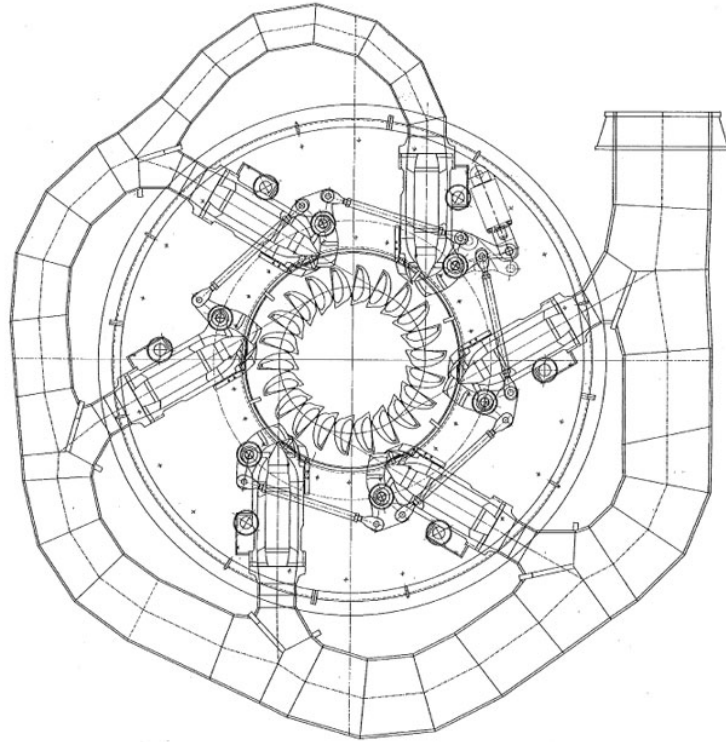


FIGURE 1.6: Turbine Pelton verticale à 6 jets [4]

2. **Turbine a crossflow** :La turbine Crossflow est une machine à action, l'eau passe deux fois par la roue. Le double passage de l'eau à travers la roue permet de limiter la sensibilité aux corps étrangers. Elle a une deuxième appellation « turbine à flux traversant ». Leur construction est simple, elle est composée principalement en trois parties :

- Une roue en forme de tambour, dotée d'aubes cylindriques profilées.
- Un injecteur qui contient une aube profilée rotative pour assurer le réglage du débit. Cet injecteur est de section rectangulaire. Un contrepoids qui assure l'arrêt de la turbine sans énergie extérieure, et l'ouverture est assuré par un vérin hydraulique.
- Une bâche recouvre la roue où les paliers de la turbine sont fixés.

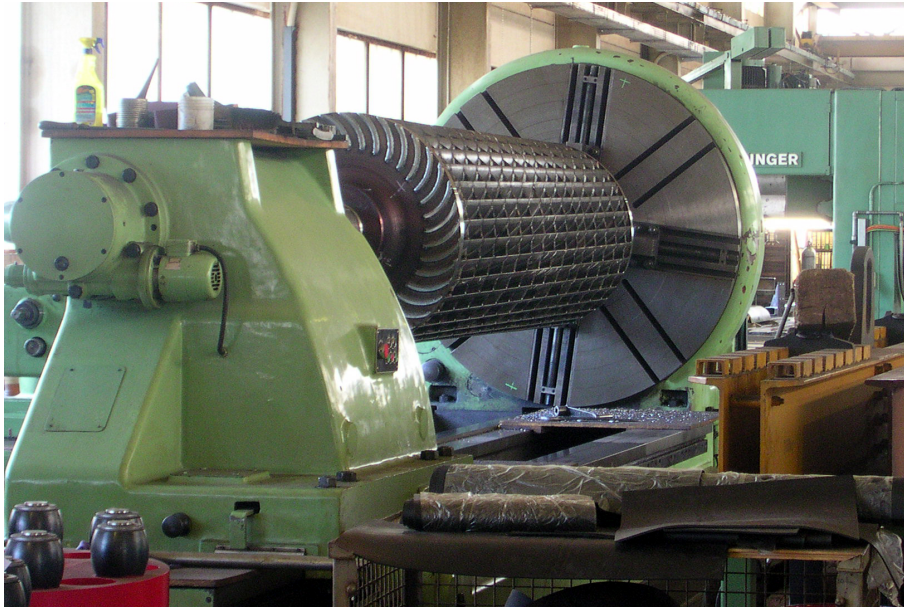


FIGURE 1.7: Turbine CrossFlow [5]

3. **Turbine Francis** : La turbine Francis est une machine à réaction, compacte, robuste. Sa roue est immergée et elle exploite aussi bien la vitesse de l'eau (énergie cinétique) qu'une différence de pression. La turbine Francis se présente fréquemment dans les micro-centrales anciennes. Elle est utilisée pour les moyennes et basses chutes (40m à 600m). Cette turbine est alimentée par une bêche attachée à une conduite forcée. Une série d'avant directrices se trouve à la fin de la bêche pour guider l'eau vers le distributeur. Le distributeur sert à régler le débit, il fait varier le débit de zéro à la valeur maximale par la turbine et orienter l'eau vers la roue avec un angle à cause de diminuer les pertes. La roue de la turbine est placée à l'intérieur du distributeur, elle est composée par des aubes profilées, le nombre d'aubes dépend de la puissance de la turbine (8 à 16 aubes). La roue est attachée avec la génératrice avec l'intermédiaire d'un arbre. Cette dernière est guidée par le palier principal de la turbine. La turbine Francis est à injection totale parce que la roue est alimentée sur toute sa périphérie.

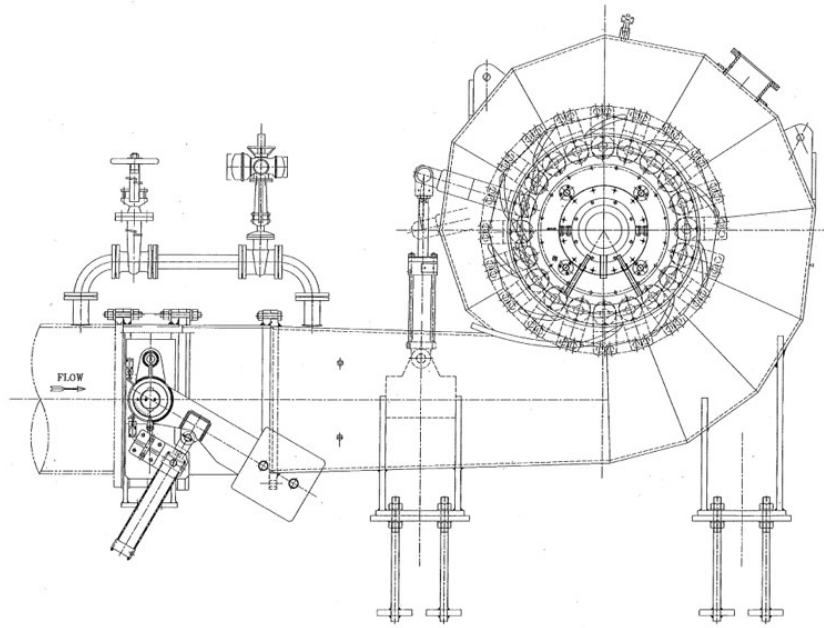


FIGURE 1.8: Turbine Francis

4. **Turbine Kaplan et hélice** : Les turbines Kaplan et hélice sont des machines à réaction. Elles sont utilisées dans la basse chutes (inférieure à 50m) et vitesse spécifique élevée. L'alimentation en eau est similaire à une turbine Francis. La roue de la turbine sous forme d'une hélice. La turbine Kaplan est adaptée pour les très grands débits (70 à 800m³/s), et de faibles chutes. Le diamètre varie de 2 à 11 mètres avec une plage de rotation entre 50 et 250 tr/min L'avantage de la turbine Kaplan par rapport à hélice c'est que ses pales sont orientables, tel que le pas varie pendant le fonctionnement, qui permet à la turbine Kaplan d'augmenter le rendement (90% à 95%) pour des débits variables. La turbine Kaplan est un développement technique de longue durée de la turbine Francis. Cette évolution permet le fonctionnement de la turbine Kaplan (production de l'énergie) quand la turbine Francis ne pourrait pas être utilisée.

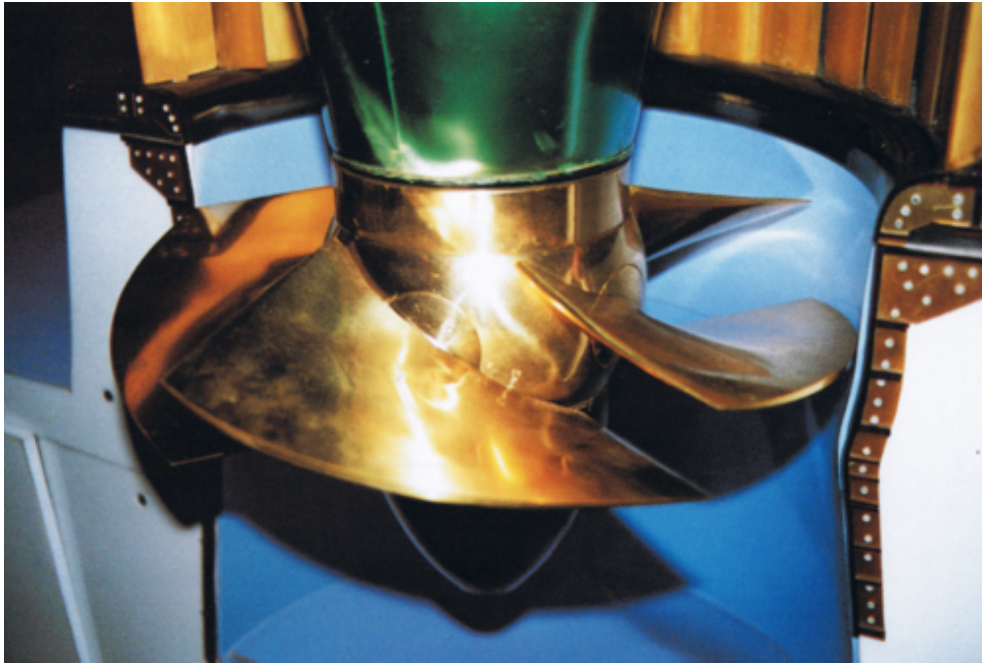


FIGURE 1.9: Turbine Kaplan [6]

1.4.2 Pompes :

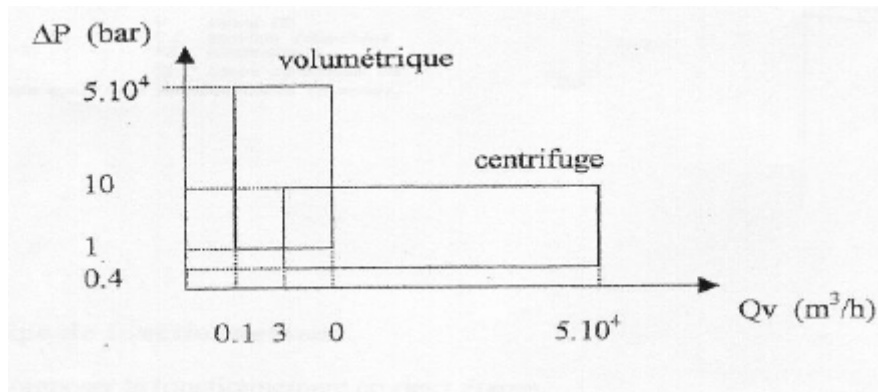
Les pompes transforment l'énergie mécanique en énergie hydraulique, elles sont appelées aussi générateurs de débit. Le choix de la pompe dans une centrale repose sur les caractéristiques hydrauliques du site (débit, et hauteur de chute). Pour cela il existe deux types de pompes :

- Pompes centrifuges qui sont modelé pour des hauteurs limites, et des débits moyens et élevés.
- Pompes volumétriques pour les grandes hauteurs et faibles débits.

Les groupes de pompage-turbinage utilisés actuellement sont tous à vitesse constante. Mais les performances de la même machine à vitesse variable donne plus d'avantages ; régulation de la puissance active de la pompe, une large gamme de fonctionnement en mode turbinage, et la stabilité du système. Le choix de type de pompe dans une installation dépend des conditions du fluide. Si on veut augmenter le débit on utilisera les pompes centrifuges, par contre si on veut augmenter la pression on utilisera les pompes volumétriques

1.4.2.1 Pompes centrifuges :

1. **Définition** : la construction d'une pompe centrifuge est très simple. Cette pompe est constituée d'une pièce en rotation, le rotor tourne dans un carter (corps de pompe). A la sortie grâce a un divergent, l'énergie cinétique se transforme en pression motrice. Les



éléments de construction de cette pompe sont alors :

- un distributeur
- l'ouïe d'aspiration
- le corps de la pompe ou volute
- le refoulement qui va s'élargir
- l'ouïe de refoulement

2. **Principe de fonctionnement :** Le principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge est divisé en deux étapes :

L'aspiration : le distributeur fait aspirer le liquide qui se trouve dans les conduites jusqu'à la section d'entrée du rotor. Maintenant la pompe est pleine de liquide, donc à l'intérieur de la pompe et au niveau de la roue la vitesse de liquide augmente, et la pression dans l'ouïe diminue ainsi une aspiration et maintient l'amorçage.

L'accélération : après l'étape de l'aspiration. Le rôle du rotor est de transformer l'énergie mécanique à l'arbre de machine en énergie cinétique. A la sortie du rotor, le fluide se trouve projeté dans la volute dont le but est de collecter le fluide et de le ramener dans la section de sortie. La section offerte au liquide étant de plus en plus grande, son énergie cinétique se transforme en énergie de pression.

3. **Avantages et inconvénients :**

Avantages :

- Un bon rendement
- Moins coûteuse
- Une simple construction
- Peu d'entretien
- Un mauvais fonctionnement du circuit de refoulement, la pompe ne subit aucun dommage

Inconvénients :

- En cas de fluide trop visqueux, la pompe ne fonctionne pas
- la nécessité des dispositifs d'équilibrage
- cette pompe n'est pas auto-amorçant

1.4.2.2 Pompe volumétrique :

Les pompes volumétriques se divisent en deux types, alternatives et rotatives

1. **Pompes alternatives (à piston) :** Ce type de pompe est classé parmi les anciennes pompes. La pompe à piston utilise les variations de volumes occasionnées par le déplacement d'un piston dans un cylindre. Ce type de pompe nécessite un jeu de soupapes ou de clapets comme son nom l'indique pour obtenir l'aspiration dans le cylindre. Les différents types de pompe à piston sont : pompe à simple effet, à double effet, et à plusieurs pistons déphasés
2. **Pompes rotatives :** Les pompes rotatives nécessitent deux rotors. Ces deux rotors tournent en roulant l'un sur l'autre sans glisser pour ne pas tomber dans le piège de frottement et déplacent un volume de fluide.

Avantages :

- Machine robuste
- Rendement élevé
- Fonctionnement normale en cas de liquide trop visqueux
- Amorçage automatique

Inconvénients :

- Machine coûteuse
- Très lourde et plus encombrante
- Demande plus d'entretien donc les frais augmentent
- Impossibilité d'obtenir de gros débits sous faible pression

1.4.2.3 Couplage des pompes :

Pour améliorer les caractéristiques de la centrale, exactement la pompe, on doit augmenter la hauteur et le débit. Pour cela il existe deux possibilités ; couplage en série, couplage en parallèle.

1. **Couplage en série** : Soit une pompe P1 fournit une hauteur H_1 , et P2 fournit une hauteur H_2 . Les deux pompes refoulent le même débit Q .

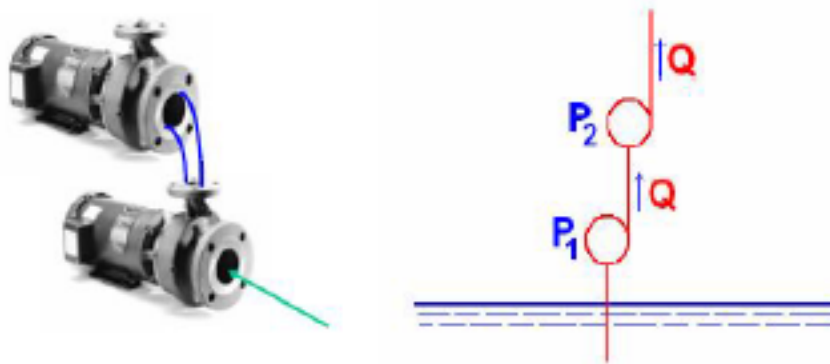


FIGURE 1.10: Couplage en série des deux pompes

Le couplage des deux pompes en série fournit une hauteur (H_1+H_2) et le débit reste constant Q , La figure 1.10 représente les caractéristiques de couplage en série[7].

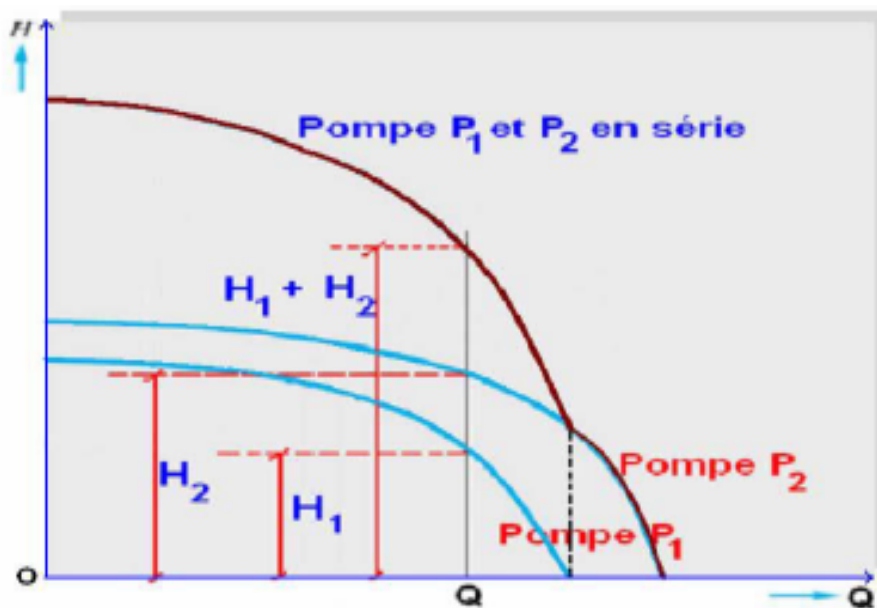


FIGURE 1.11: Les caractéristiques de couplage en série

2. **Couplage en parallèle** : Soit une pompe P1 refoule un débit partiel Q_1 , une pompe P2 refoule un débit partiel Q_2 .

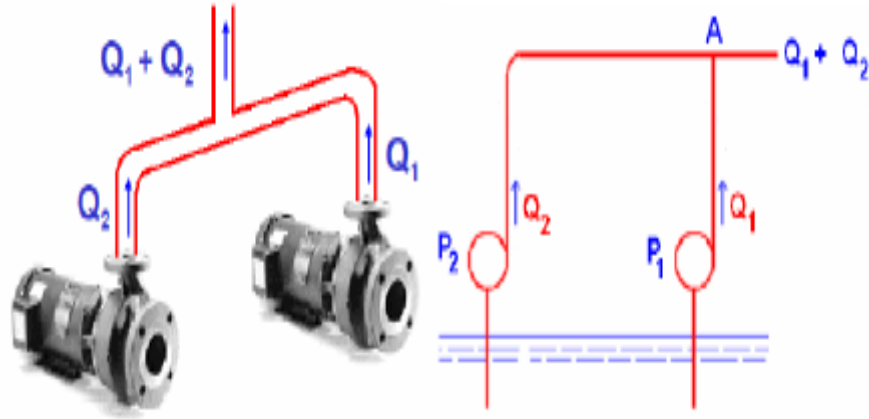


FIGURE 1.12: Coplage en parallèle des deux pompes

Le couplage en parallèle de ces deux pompes nous fournit un débit (Q_1+Q_2), La figure 1.12 représente les caractéristiques de couplage en parallèle [7].

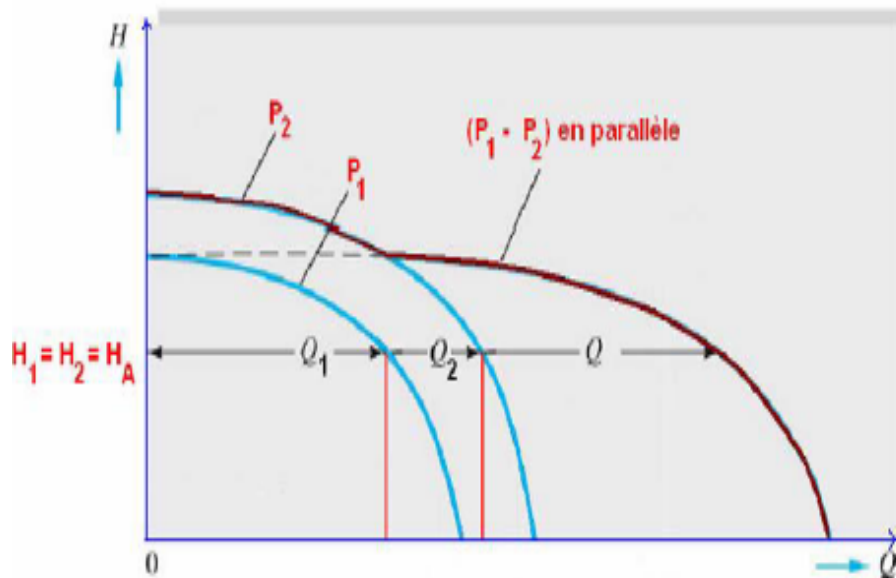


FIGURE 1.13: Les caractéristiques de couplage en parallèle

1.4.3 Alternateur :

Un alternateur transforme l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique, ils sont des machines très puissantes en service dans les centrales hydrauliques. Qui produisant un courant alternatif. Il est appelé aussi un générateur de courant alternatif. Un alternateur est composé de deux parties, une partie fixe appelée stator, et une partie mobile appelée rotor. La paroi externe du rotor contient d'électroaimants, alors que la paroi interne du stator consiste en un enroulement de barres de cuivre. Lors de fonctionnement c'est-à-dire lorsque le rotor tourne dans le stator, le mouvement des électrons consiste à créer un courant électrique.

1.4.3.1 Les différents types d'alternateur :

Les principaux alternateurs utilisés dans les centrales hydrauliques (choix de l'alternateur) :

1. **Les machines synchrones à aimants permanents ou à rotor bobiné** : Ce type de génératrice est le plus utilisé pour créer une tension alternative sinusoïdale. Pour avoir une fréquence constante à la sortie de cette machine. Il faut que le débit soit constant, à cause de cette condition il est obligatoire de faire un système de régulation de débit. Le rendement hydraulique global est diminué à cause des pertes de charge introduites par la vanne de régulation.
2. **Les machines synchrones à cage débitant sur un réseau ou sur charge isolée** : L'utilisation de ce type de génératrice est très limitée. Mais pour des raisons de coût Les machines asynchrones sont relativement faibles comparées aux machines synchrones, donc il devrait se développer rapidement. En fonctionnement autonome, la génératrice asynchrone pose des problèmes importants de stabilité en tension et en fréquence .Il faut des capacités d'auto excitation pour magnétiser la machine, et le fonctionnement ne peut se faire qu'avec une plage de vitesse restreinte.
3. **Les machines asynchrones à double alimentation (MADA)** : La machine asynchrone à double alimentation MADA est utilisée dans les systèmes hydroélectriques ou dans les éoliennes. Elle peut utiliser dans les applications a vitesse variable. La machine asynchrone a double alimentation a rotor bobiné contient un stator semblable aux autre machines triphasé, mais le rotor est composé de trois bobinage monté en étoile ensuite il est relié à trois bagues sur lesquelles viennent glisser les balais en mode fonctionnement. La MADA est alimentée par deux sources d'énergie de différentes fréquences et ten-

sions. La MADA permet d'atténuer aux problèmes précédents de stabilité de la machine asynchrone à cage et autorise réellement un fonctionnement à vitesse variable.

Dans notre étude nous allons nous intéresser à une centrale hydraulique utilisant une génératrice synchrone à aimant permanent GSAP. Nous avons choisi ce type d'alternateur grâce à ces avantages technologiques et économiques comparée aux autres types de machines. La génératrice synchrone à aimant permanent est la championne dans le domaine de l'hydroélectricité, car elle donne un rendement de conversion satisfaisant. Notre intérêt va plus particulièrement vers cette dernière catégorie, en effet avec l'apparition d'aimants permanents de plus en plus performants (faible désaimantation, énergie maximale stockée plus grande, induction de saturation et champ coercitif plus élevé). La machine synchrone à aimant permanent est devenue compétitive par rapport à la machine asynchrone, même dans le domaine de la moyenne puissance. L'utilisation des aimants comme inducteur dans la MSAP offre, par rapport aux autres types de machines, beaucoup d'avantages, entre autres [8] :

- Une plus grande robustesse par rapport au moteur à courant continu.
- Une puissance et couple massique élevée.
- Une absence de pertes résistives au rotor.
- Une possibilité d'obtenir une excitation sans pertes à effet joule.
- Un facteur de puissance et un rendement élevés.

1.4.3.2 Description de la machine synchrone à aimant permanent :

Lorsqu'on dit une machine synchrone alors on regroupe toutes les machines ayant la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse du champ tournant du stator. Il existe deux méthodes pour générer le champ magnétique rotorique soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La vitesse de rotation du champ tournant est proportionnelle au nombre de pôles de la machine et à la pulsation des courants statoriques sous l'équation :

$$\omega_r = \frac{\omega}{p}$$

1.4.3.3 Caractéristiques de la machine synchrone à aimant permanent :

La machine synchrone est composée de deux éléments essentiels : un rotor et un stator

- **Stator** : c'est la partie fixe de la machine synchrone constituée d'enroulements reliés à une source alternative. Il est constitué de trois (3) bobines déphasées mécaniquement de 120° l'une par rapport à l'autre.
- **Rotor** : c'est la partie mobile de la machine synchrone composée d'un électroaimant ou bien d'un aimant permanent. Dans notre cas (MSAP) le rotor est constitué d'aimant qui peut prendre plusieurs configurations :
 - Aimants en surface.
 - Aimants insérés.
 - Aimants enterrés.
 - Aimants à concentration de flux.

1.4.4 Transformateur :

Un transformateur permet de transférer l'énergie d'une source à une charge, en modifiant la tension. Cette dernière peut être augmentée, comme elle peut être diminuée selon l'utilisation voulue. Ce changement (augmentation, diminution) se fait par l'effet d'un champ magnétique.

Il existe deux types de transformateur l'un est de type cuirassé qui utilise un circuit magnétique à trois branches et les enroulements sont autour de la branche centrale. L'autre est de type à colonnes, il utilise un circuit magnétique à deux colonnes. Le transformateur est constitué de deux enroulements ou plus. Le côté de la source est le primaire, le côté de la charge est le secondaire, tel que n'existe aucune connexion entre le primaire et le secondaire, le couplage existé entre les enroulements est magnétique.

Lorsqu'on applique une tension alternative à la source, ceci crée un flux alternatif dans le noyau magnétique. Selon la loi de Faraday, ce flux crée des forces électromotrices dans les bobines. La force électromotrice induite est proportionnelle au nombre de tours dans la bobine et au taux de variation du flux. Selon le rapport du nombre de tours entre le primaire et le secondaire, le secondaire alimente la charge avec une tension différente de celle de la source.



FIGURE 1.14: Transformateur

1.5 Les STEPs dans le monde :

Au niveau mondial, 99% du stockage stationnaire de l'énergie électrique est assuré par les STEP. La capacité mondiale atteignait 140 GW à fin 2011 pour 400 STEP en fonctionnement dont 46 MW pour l'ensemble européen, 45 en Asie, 21 aux Etats Unis. La Chine est le pays le plus en pointe dans ce domaine : en 2009, elle comptait 22 STEP pour une puissance installée de 11 GW qui devrait être portée à 50/60 GW en 2020. En Europe tous les pays qui développent de façon massive leur production d'énergie intermittente ont des besoins importants de stockage [2].

Pays	Nbre de STEP P>1000 MW capa- cité correspondante	Nbre de STEP en construc- tion de P>1000 MW capa- cité correspondante	Installations remarquables
CHINE	13-17900 MW	6-8200 MW	Huizhou 2450 Mw, Guangzhou 2400 MW, Tianhuangping 1800 MW
ETATS UNIS	10-14300MW		Bath Country 3000 MW, Lundington 1930 MW
JAPON	7-9300 MW	2-4400 MW	Kannagawa 2820 MW, Okutataragi 1930 MW
EUROPE	Capacité installée	Capacité en correspon- dante	Installations remarquables
ALLEMAGNE	2580 MW	1300 MW	Goldisthal 1060 MW, Markensbach 1050 MW
AUTRICHE	1480 MW	570 MW	Malta-Reisseck 1030 MW
ESPAGNE	1600 MW	850 MW	Cortes-LaMuela 910 MW
Portugal	2260 MW	950 MW	Alqueva 520 MW
Italie	4330 MW		Roncovalgrande 1060 MW, Entracque 1320 MW
Suisse	3190 MW	1900 MW	
France	4200 MW		Grand'Maison 1790 MW, Montezic 910 MW, Super Bissorte 730 MW
Royaume Uni	2490 MW		Dinorewig

TABLE 1.1: Principaux pays équipés en STEP

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'énergie hydroélectrique, ensuite nous avons parlé sur les centrales hydrauliques, le principe de fonctionnement, et les différentes catégories des centrales hydrauliques.

Ensuite, nous avons passé aux stations de transfert d'énergie par pompage STEP, les différents composants d'une STEP, nous avons vu aussi leurs rôles dans le stockage d'énergie, puis nous avons cité les STEPs dans le monde.

Puis, nous avons basé sur deux organes principaux dans une centrale, la turbine et leur principe de fonctionnement, les différents types de turbine. Et le deuxième organe principal qui est la génératrice, nous avons cité les différents types des génératrices, ensuite nous avons basé sur la génératrice synchrone à aimant permanent car elle est la première machine utilisée dans les STEPs au niveau mondiale grâce à ces performances.

Chapitre 2

Modélisation et commande des différentes parties de la centrale

Introduction :

Dans le premier chapitre nous avons parlé sur l'hydroélectricité, les différents types des centrales hydroélectriques, les stations de transfert d'énergie par pompage, et leurs composants.

Dans ce chapitre nous modélisons les différents composants de la STEP, en particulier l'organe principal de la conversion électromécanique à savoir la machine synchrone à aimant permanent.

Ce chapitre est consacré à la modélisation des éléments constituant d'une centrale hydraulique ou bien station de transfert d'énergie par pompage STEP. Des modèles dynamiques sont construits pour chaque élément composant la structure de la microcentrale et ce, afin que toute partie du système puisse être simulée, commandée ou émulée séparément et/ou globalement.

La démarche suivie pour réaliser le modèle de chaque sous-ensemble, commence par les équations gouvernant le fonctionnement du sous-ensemble considéré. Ces équations peuvent être hydrauliques, mécaniques ou électriques. L'organisation de ses équations sous forme de modèle tient compte des objectifs (pédagogique et scientifique) désirés [10]

La modélisation de la machine synchrone à aimant permanent est traitée par la méthode des deux axes qui utilise la théorie de l'espace vectoriel pour le passage d'un système triphasé à un système diphasé à l'aide de la transformation de Park. Puis, pour faciliter l'étude et avoir

une dynamique similaire a une machine à courant continu il serait primordial de passer par la commande vectorielle avec orientation de flux statorique.

Pour conclure, on termine par une conclusion qui résume notre travail dans ce chapitre.

2.1 Modélisation du groupe pompe turbine :

Le débit d'eau Q est représenté par un signale qui traduit deux facteurs ; le sens de direction (pompage ou turbinage) et la variation de vitesse qui sera non contrôlée (vitesse variable).

La puissance hydraulique P_h dépend de deux paramètres qui sont la hauteur de chute H , et le débit d'eau Q . l'équation de cette puissance est donnée par : $P_h = \rho G Q H$.

2.2 Machine synchrone :

2.2.1 Machine synchrone a aimant permanent MSAP :

On peut les utilisé en deux mode moteur ou bien génératrice. Les machines synchrones a aimant permanent MSAP sont devenus les plus utilisées dans l'industrie parce qu'elles répondent aux exigences de nouvelles technologies.

L'intérêt majeur pour l'utilisation de ces machines est dû en grande partie à leur faible perte et à leur robustesse ainsi qu'à leur important couple massique.

2.2.2 Fonctionnement de la machine synchrone MSAP :

La machine synchrone à aimant permanent est une machine a double fonctionnement (réversible), elle peut fonctionner comme moteur, comme elle peut fonctionner comme génératrice :

- **Fonctionnement génératrice GSAP :**

Les génératrices à base des machines synchrones sont la première source d'énergie électrique dans le monde. Elles sont entraînées par des turbines hydrauliques, à vapeur ou éoliennes, ces machines constituent les plus gros convertisseurs d'énergie au monde. Elles transforment l'énergie mécanique en énergie électrique avec des puissances allant jusqu'à 1500 MW.

L'inducteur de la génératrice synchrone, entraîné mécaniquement, crée un champ à Répartition spatiale variable dans les bobinages statoriques. Les forces-électro-motrices (f-é-m) dans ces bobinages provoquent la circulation des courants induits qui créent à leur tour un champ statorique dans l'entrefer qui tourne à la même vitesse que celui de champ inducteur [11].

- **Fonctionnement moteur MSAP :**

Après les progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance la machine synchrone à aimant permanent sera donc un concurrent à celui de moteur asynchrone dans l'utilisation des entraînements. Le moteur synchrone à aimant permanent reste alors un bon candidat.

Le moteur synchrone à aimant permanent est un convertisseur électromécanique (transforme l'énergie électrique en énergie mécanique). La vitesse de rotation du stator est directement proportionnelle à la fréquence d'alimentation du stator, le stator est alimenté par une tension triphasé, qu'il va produire un champ tournant qui fait entraîner le rotor, la vitesse de rotation de ce dernier égale à la vitesse de synchronisme.

2.3 Modélisation de la machine synchrone MSAP en mode moteur :

La modélisation d'une machine synchrone à aimant permanent nécessite l'étude de sa commande dans les différents régimes de fonctionnement transitoire et permanent.

2.3.1 Hypothèses simplificatrices :

Plus le nombre d'hypothèses est grand, plus le modèle sera simple. Ces Simplifications proviennent des propriétés des machines à courant alternatif :

- La variation des résistances en fonction de la température est négligeable.
- L'absence de saturation dans le circuit magnétique.
- L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau.
- L'effet d'encochage est négligeable.
- Les f.m.m. sont réparties sinusoïdalement dans l'entrefer de la machine, il y a une sy-

métrie par rapport à l'axe magnétique des enroulements.

2.3.2 Mise en équations de la machine MSAP dans le repère (abc) :

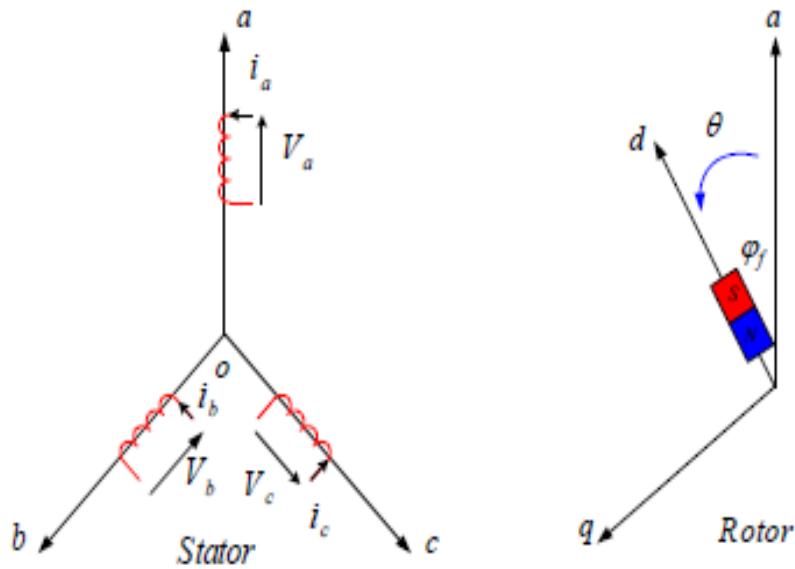


FIGURE 2.1: Shéma de la MSAP dans le repère abc

La figure 2.1 au-dessus est la représentation schématique de la machine synchrone à aimant permanent MSAP dans le repère abc.

Les caractéristiques de la machine synchrone à aimant permanent MSAP est définis par ces trois équations ; électrique, magnétique, et mécanique.

2.3.2.1 Equations électriques :

Le vecteur des tensions statoriques est donné par la relation suivante :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

Le vecteur des courants statoriques est donné par :

$$[i_s] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Le vecteur des flux statoriques est donné par la relation :

$$[\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix}$$

D'après la loi de Faraday les équations électriques du stator de la machine synchrone sont données par :

$$[V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt}[\varphi_s] \quad (2.1)$$

Où :

La matrice de résistance du stator est :

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

2.3.2.2 Equations magnétiques :

D'après les hypothèses simplificatrices qu'on a vu antérieurement. Nous avons obtenu une linéarité entre le flux et le courant de la machine. Donc ces relations s'écrivent sous la forme matricielle comme suit :

$$[\varphi_s] = [L_s][i_s] + [\varphi_{f_{abc}}] \quad (2.2)$$

Avec :

Le vecteur de flux crée par l'aimant a travers l'enroulement statorique est donné par :

$$[\varphi_{f_{abc}}] = \begin{bmatrix} \varphi_{fa} \\ \varphi_{fb} \\ \varphi_{fc} \end{bmatrix}$$

Tel que la matrice des inductances statoriques est donné par :

$$[L_s] = [L_{s0}] + [L_{s2}(\theta)]$$

Avec : $[L_{s0}]$ regroupe les termes constants :

$$[L_{s0}(\theta)] = \begin{bmatrix} L_{s0} & M_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & L_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & M_{s0} & L_{s0} \end{bmatrix}$$

$[L_{s2}(\theta)]$ regroupe les termes variables qui dépend de θ :

$$[L_{s2}(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos(2\theta) & \cos 2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos 2\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos 2\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(2\theta) \\ \cos\left(2\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(2\theta) & \cos 2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

Où :

M_{s0} : Inductance mutuelle entre deux phases statoriques.

L_{s0} : Inductance propre d'une phase statorique.

θ : Caractérise la position angulaire du rotor par rapport au stator.

2.3.2.3 Equations mécaniques :

Dans l'étude d'une machine synchrone a aimant permanent n'existe pas seulement des caractéristiques électrique e magnétique (courant, tension, et flux), mais il existe aussi des paramètres mécaniques (couple, vitesse) .

L'équation fondamentale de la mécanique décrit la dynamique du rotor de la machine synchrone sous la forme :

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - f_c \omega_r \quad (2.3)$$

Avec :

J : Moment d'inertie des masses tournantes.

C_r : Couple résistant imposé à l'arbre de la machine.

ω_r : Vitesse rotorique.

C_{em} : Couple électromagnétique.

f_c : coefficient de frottement visqueux.

D'après les équations de la machine asynchrone du plan triphasé (abc), nous avons constaté la difficulté de la résolution du modèle. Ce qui nous permet de passer au repère diphasé à l'aide d'une transformation de Park

2.3.3 Transformation de Park :

Le modèle de la machine synchrone a aimant permanent dans le repère (A ,B,C) est très compliqué, ce qui permet de faire une transformation matricielle pour le simplifier. La simplification consiste à réduire l'ordre de système. C'est-à-dire obtenir un modèle caractérisé par des équations différentielles a coefficients constants.

La transformation de PARK permet le passage d'un repère triphasé a un repère biphasé. Elle transforme les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents, pour avoir un modèle mathématique plus simple.

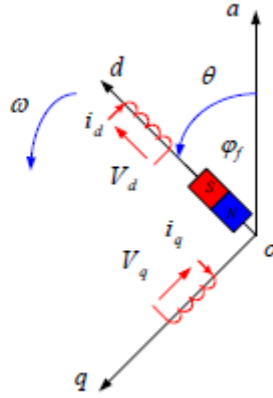


FIGURE 2.2: MSAP dans le repère de PARK

Le produit matricielle de la transformation de PARK est définie par :

$$[X]_{dq0} = P(\psi) \cdot [X]_{abc} \quad (2.4)$$

Avec :

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

Tel que :

$\psi = \theta_s$ (Phase statorique), pour les grandeurs statoriques.

$\psi = \theta_r$ (Phase rotorique), pour les grandeurs rotoriques.

$$[X]_{abc} = P^{-1}(\psi) \cdot [X]_{dq0}$$

Où :

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

2.3.4 Application de la transformation de Park à la MSAP :

En appliquant la transformation de Park a la machine synchrone a aimant permanent, on passe du système triphasé vers un système diphasé, donc on obtient un système d'équation simplifie de la MSAP. se Les équations de tension et de flux sont alors données par les relations suivantes :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - \omega \varphi_q \\ V_q = R_s i_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \omega \varphi_d \end{cases} \quad (2.5)$$

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d i_d + \varphi_f \\ \varphi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2.6)$$

D'après les équations qu'on a vues, si on remplace les équations de flux dans les équations de tension nous obtenons donc :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega (L_d i_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (2.7)$$

- Le couple électromagnétique :Le couple électromagnétique est donné par la relation suivante :

$$C_{em} = \frac{dW_e}{d\theta_{geo}} = p \frac{dW_e}{d\theta} \quad (2.8)$$

avec :

W_e : énergie électromagnétique

θ_{geo} : angle géométrique de rotation du rotor

- La puissance transmise :La puissance transmise est définie par la relation suivante :

$$P(t) = \frac{3}{2} (V_d i_d + V_q i_q) \quad (2.9)$$

On remplace Vd et Vq par leurs expressions, on obtient :

$$P(t) = \frac{3}{2} \left[R_s(i_d^2 + i_q^2) + \left(\frac{d\varphi_d}{dt} i_d + \frac{d\varphi_q}{dt} i_q \right) + \frac{d\theta}{dt} (\varphi_d i_q - \varphi_q i_d) \right] \quad (2.10)$$

D'après cette équation nous avons constaté que cette équation contient trois types de puissances :

- Puissance dissipé en perte Joules dans le stator : $\frac{3}{2} R_s(i_d^2 + i_q^2)$
- Variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements du stator : $\left(\frac{d\varphi_d}{dt} i_d + \frac{d\varphi_q}{dt} i_q \right)$
- La puissance électromagnétique : $(\varphi_d i_q - \varphi_q i_d)$

Donc le couple électromagnétique est donné par la relation suivante :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p (\varphi_d i_q - \varphi_q i_d) \implies C_{em} = \frac{3}{2} p [(L_d - L_q) i_d i_q + i_q \varphi_f] \quad (2.11)$$

Après cette modélisation nous pouvons alors faire la représentation fonctionnelle du modèle de Park de la machine synchrone a aimant permanent. Elle est comme suit :

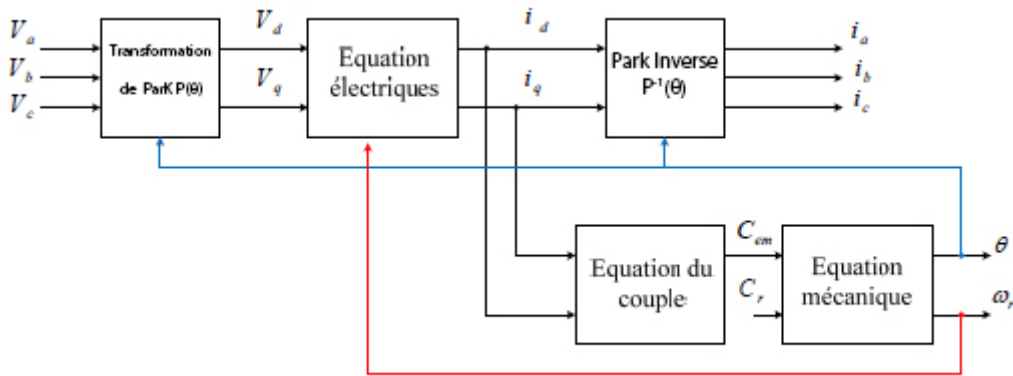


FIGURE 2.3: Schémas fonctionnelle du modèle de Park de la MS

2.4 Modélisation de la machine synchrone MSAP en mode génératrice :

Pour la modélisation de la génératrice synchrone a aimant permanent, les sens des courants I_d et I_q dans le repère d Park seront inversés. Le modèle de la génératrice GSAP est écrit alors

sous la forme :

$$V_d = -R_s i_d - L_d \frac{d}{dt} i_d + \omega L_q i_q \quad (2.12)$$

$$V_q = -R_s i_q - L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega L_d i_d + \omega \Phi_f \quad (2.13)$$

2.4.1 Modélisation de la GSAP à vide :

Dans une génératrice synchrone à aimant permanent à vide les courants statoriques sont nulles :

$$\begin{cases} i_d = 0 \\ i_q = 0 \end{cases} \quad (2.14)$$

Alors que les tensions sont données par les expressions suivantes :

$$\begin{cases} V_d = 0 \\ V_q = \omega \Phi_f \end{cases} \quad (2.15)$$

Dans l'essai à vide le couple de la génératrice synchrone à aimant permanent est nul :

$$C_{em} = 0 \quad (2.16)$$

2.4.2 Modélisation de la GSAP en charge :

Pour modéliser la génératrice synchrone à aimant permanent il faut supposer qu'elle alimente une charge électrique (R_{ch}, L_{ch}). Pour avoir les tensions et les courants résultants de l'application de cette charge sur la génératrice on applique d'une part, les tensions V_d et V_q données par :

$$\begin{cases} V_d = R_{ch} i_d + L_{ch} \frac{d}{dt} i_d - \omega L_{ch} i_q \\ V_q = R_{ch} i_q + L_{ch} \frac{d}{dt} i_q + \omega L_{ch} i_d \end{cases} \quad (2.17)$$

En remplace les expressions de V_d et V_q dans les expressions précédentes on obtient le système :

$$\begin{cases} 0 = -(R_s + R_{ch}) i_d - (L_d + L_{ch}) \frac{d}{dt} i_d + \omega (L_q + L_{ch}) i_q \\ 0 = -(R_s + R_{ch}) i_q - (L_q + L_{ch}) \frac{d}{dt} i_q - \omega (L_d + L_{ch}) i_d + \omega \Phi_f \end{cases} \quad (2.18)$$

En introduisant le modèle d'état dans les équations ci-dessus, elles deviennent :

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d+L_{ch}} [- (R_s + R_{ch}) i_d + \omega (L_q + L_{ch}) i_q] \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q+L_{ch}} [- (R_s + R_{ch}) i_q - \omega (L_q + L_{ch}) i_d + \omega_f] \end{cases} \quad (2.19)$$

2.5 Commande vectorielle de la génératrice GSAP :

Cette commande est connue par la deuxième appellation « commande par orientation du flux FOC ». En 1971, BLASHCKE a proposé une théorie de commande de champ orienté qui permet d'assimiler le comportement des machines à courant alternatif à une machine à courant continu à excitation séparée, ou la force magnétomotrice de l'induit établie un angle de 90° avec l'axe du flux inducteur, et ceci, quelle que soit la vitesse de rotation.

Pour la commande de cette génératrice GSAP, il est obligatoire que l'orientation du flux soit en quadrature avec le courant qui génère le couple. Le but de ce contrôle est d'obtenir le modèle de la machine où le flux et le couple électromagnétique sont découplés de sorte que l'on puisse agir sur le couple sans influencer le flux, puisque le couple dépend uniquement du courant en quadrature.

2.5.1 Principe de la commande vectorielle de la GSAP :

La commande vectorielle en puissance de la génératrice synchrone a aimant permanent GSAP consiste à imposer le fonctionnement de la machine synchrone a similaire à celui de la machine à courant continu a excitation séparée, ou on peut contrôler le couple et le flux séparément. Ce découplage permet d'obtenir une réponse très rapide du couple.

Le principe de la commande vectorielle avec alimentation en tension et commande en courant, permet d'imposer le couple électromagnétique de la machine. Or, quel que soit le but de la commande (régulation de couple, de vitesse ou de position), le contrôle des courants reste cependant nécessaire. Le couple est contrôlé par la composante en quadrature, i_{qref} est donc proportionnel au couple demandé. La commande vectorielle revient alors à contrôler les deux composantes i_d et i_q du courant statorique en imposant les tensions v_d et v_q qui conviennent. Par conséquent, pour imposer les tensions v_d et v_q , il suffira d'imposer les tensions de référence v_{dref} et v_{qref} à l'entrée du convertisseur statique. A l'aide des régulateurs, l'obtention des tensions de

référence permet de maintenir les courants direct et en quadrature au voisinage de leurs valeurs de références $i_{d_{ref}}$ et $i_{q_{ref}}$ [12].

Un bloc de découplage génère les tensions de références V_{d^*} et V_{q^*} . Le système est muni d'une boucle de régulation de tension, qui permet de générer la référence de courant $I_{q_{ref}}$. Par contre, le courant $I_{d_{ref}}$ est nul dans ce cas. Les sorties du bloc de découplage V_{d^*} et V_{q^*} passent par une transformation biphasé vers triphasé ce qui nous donne les trois tensions de référence $V_{a^*}, V_{b^*}, V_{c^*}$ de la commande MLI, et qui doivent être comparés avec porteuse triangulaire alternative pour générer les signaux logiques destinés à attaquer les semi-conducteurs du redresseur .

La figure 2.4 représente la structure générale de la commande vectorielle de la machine synchrone en aimant permanent en mode génératrice[?] :

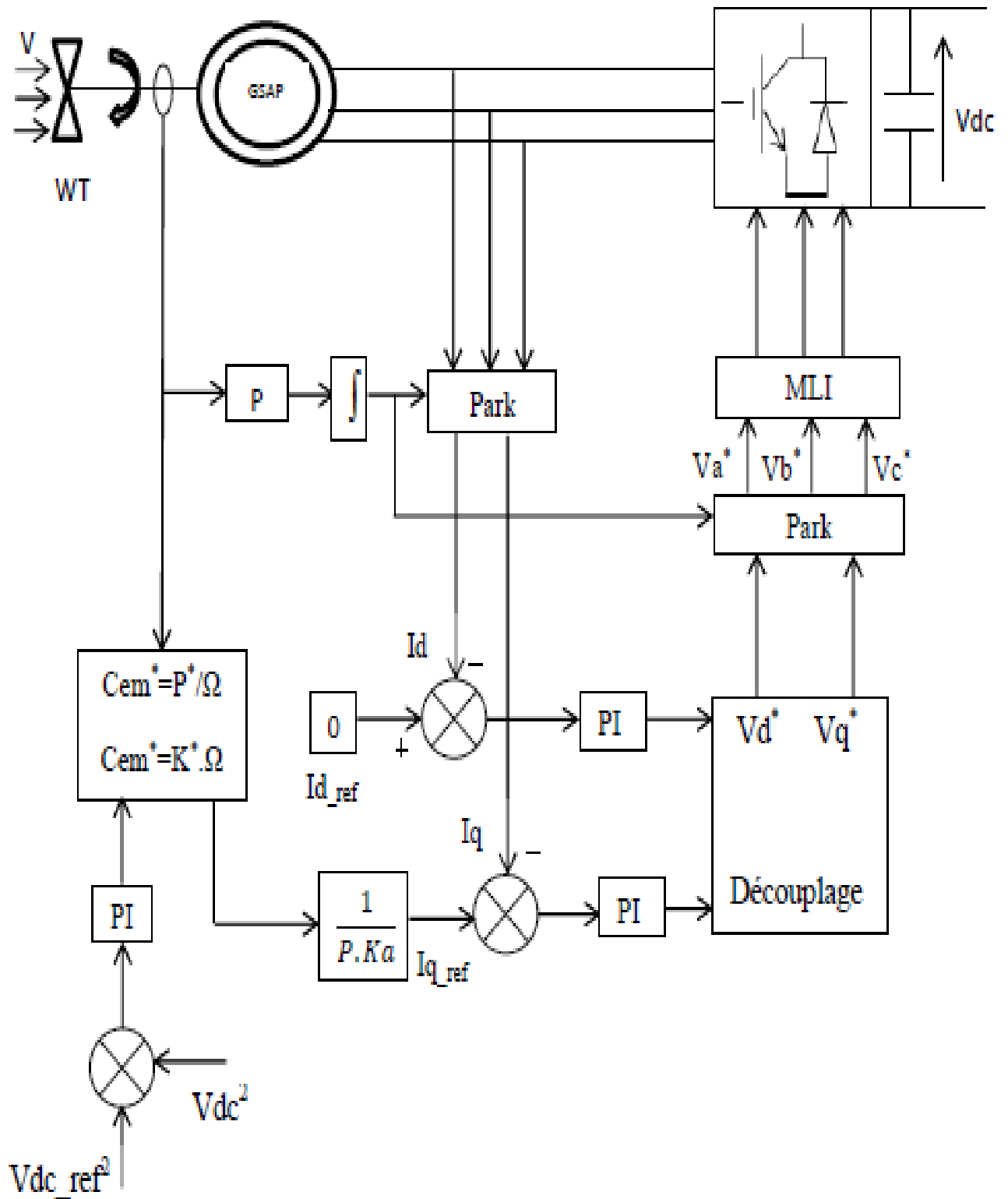


FIGURE 2.4: Structure générale de la commande vectorielle de la GSAP

Le couple est donné par l'expression suivante :

$$C_{em} = P((L_d - L_q)i_d i_q + \Phi_f i_q) \quad (2.20)$$

2.5.2 Avantages et inconvénients de la commande vectorielle [13]

- **Avantage :**

- Maintenance réduite
- Couple maximum à une vitesse nulle
- Régulation indirecte du couple
- Entraînement en boucle fermée
- Performances comparables à celles des entraînements en courant continu
- Le contrôle des grandeurs se fait en amplitude et en phase.

- **Inconvénient**

- Technique coûteuse
- La nécessité d'un capteur de position angulaire
- L'orientation dépend des paramètres de la machine
- Faible robustesse aux variations paramétriques.

2.6 Synthèse des contrôleurs PI du convertisseur de puissance

2.6.1 Régulation de la tension :

Le dimensionnement de régulateur de tension nous oblige de faire le schéma suivant qui met en œuvre les boucles de tension et courant en cascade. Le rendement du MLI est considéré unitaire :

$$P_{dc} = 3.P_g \implies V_{dc} \cdot I_{dc} = 3v_q i_q \quad (2.21)$$

Tel que la puissance du bus continu peut s'écrire sous la forme :

$$P_{dc} = V_{dc} \cdot I_{dc} \quad (2.22)$$

Nous avons aussi :

$$i_{dc} = i_c + i_l \quad (2.23)$$

$$\text{avec } \begin{cases} i_c = C \frac{dv_{dc}}{dt} \\ i_l = \frac{v_{dc}}{R_L} \end{cases}$$

Les équations précédentes nous permettent d'établir le modèle suivant :

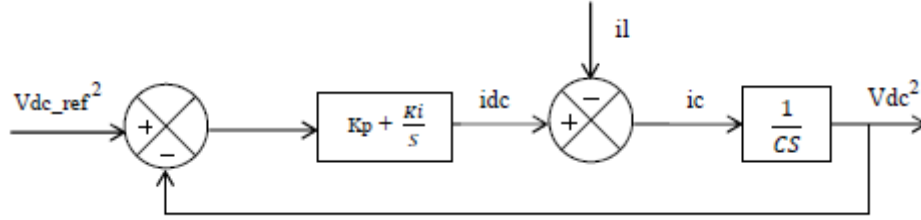


FIGURE 2.5: Boucle de régulation de tension

La fonction de transfert du modèle en boucle ouverte s'écrit sous la forme :

$$H_{Bo}(S) = \left[\left(k_p + \frac{k_i}{S} \right) \left(\frac{1}{C.S} \right) \right] \quad (2.24)$$

D'après la FTBO nous pouvons alors écrire la fonction de transfert du modèle en boucle fermée comme suit :

$$H_{Bf}(s) = \frac{H_{Bo}(s)}{1 + H_{Bo}(s)} = \frac{k_p \cdot S + k_i}{C \cdot S^2 + k_p \cdot S + k_i} \quad (2.25)$$

$$\begin{cases} k_i = \omega_0^2 \cdot C \\ k_p = 2\xi\omega_0 \cdot C \end{cases} \quad (2.26)$$

2.6.2 Régulation du courant :

La machine est définie par la fonction de transfert suivante :

$$H(s) = \frac{1}{R_s + L_s \cdot S} = \frac{1}{R_s} \frac{1}{1 + \tau} \quad (2.27)$$

Avec :

$\tau = \frac{L_s}{R_s}$: La constante de temps électrique.

La boucle de régulation du courant est donnée par le schéma suivant :

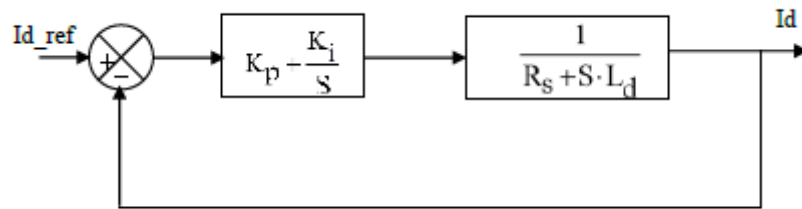


FIGURE 2.6: Boucle de régulation du courant

La fonction de transfert de système en boucle ouverte est donné alors par :

$$H_{Bo}(s) = \left[\left(K_p + \frac{K_i}{S} \right) \left(\frac{1}{R_s + SL_d} \right) \right] \quad (2.28)$$

En utilisant la méthode de compensation du pole dominant en boucle ouverte on obtient :

$$\frac{L_d}{R_s} = \frac{K_p}{K_i} \quad (2.29)$$

La nouvelle fonction de transfert en boucle ouverte devient alors :

$$H_{bf}(s) = \frac{K_i}{S \cdot R_s} \quad (2.30)$$

La fonction de transfert en boucle fermée du système est :

$$H_{Bf}(S) = \frac{1}{\frac{R_s}{K_i} \cdot S + 1} \quad (2.31)$$

Posant :

$$\tau_{Bf} = \frac{R_s}{K_i}$$

Donc c'est un système de premier ordre. Les paramètres de régulateurs ont obtenues comme suit :

$$K_i = \frac{R_s}{\tau_{Bf}}$$

Si on choisit le temps de réponse $t_{rep} = 3\tau_{Bf}$, on a :

$$\begin{cases} K_i = \frac{3.R_s}{t_{rep}} \\ K_p = \frac{3.L_d}{t_{rep}} \end{cases}$$

2.7 Contrôle de la vitesse de rotation

Le contrôle de la vitesse de rotation est assuré par un régulateur PI. Pour modéliser ce système on doit utiliser le principe fondamental de la dynamique qui est représenté par l'équation suivante [14] :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = T_r - T_{em} = T_r - K_m i_{qC} \quad (2.32)$$

Avec :

$$T_r(Q_w, \Omega) = P_T / \Omega$$

T_T : Le couple hydrodynamique

T_{em} : Le couple électromagnétique

$K_m = \frac{3}{2} \frac{p}{2} \varphi_{fs}$: Constante du flux de la génératrice

Donc le couple hydrodynamique est déduit à partir de la figure 2.7 qui représente Caractéristique couple-vitesse de la turbine pour différentes valeurs de débit

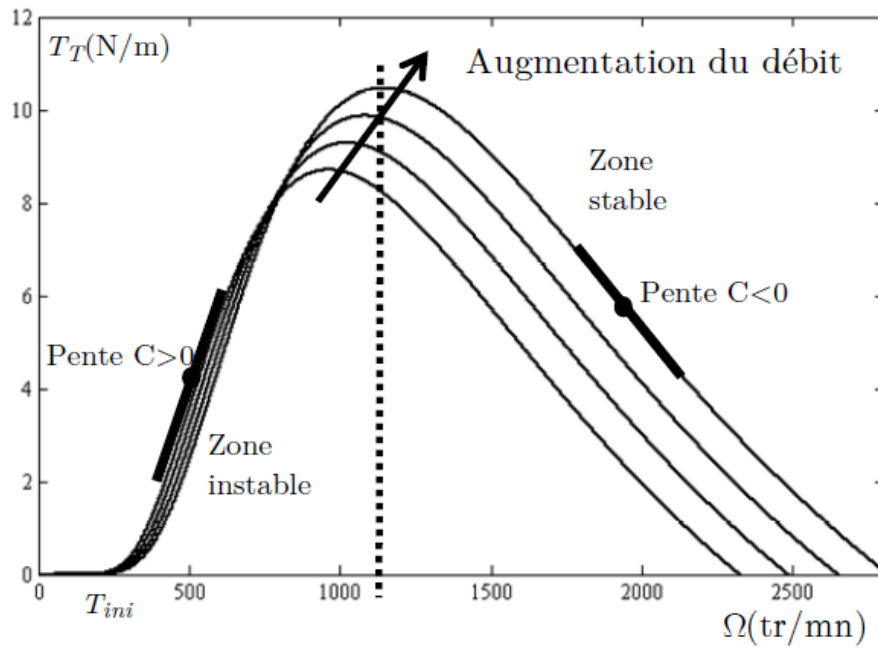


FIGURE 2.7: Caractéristique couple-vitesse de la turbine pour différentes valeurs de débit

Le couple hydrodynamique est donné alors :

$$T_T = C\Omega - T_{ini} \quad (2.33)$$

Avec :

T_{ini} : Le couple a vitesse nulle

C : La pente de la caractéristique

On remarque bien que la valeur de C dépend du débit de l'eau

D'après les équations précédentes on obtient la nouvelle équation de vitesse de rotation qui est la suivante :

$$\Omega = \left(\frac{-1}{J_s - C} \right) T_{em} \quad (2.34)$$

D'après les caractéristiques couple-vitesse de la turbine pour différentes valeurs de débit, on constate que pour le système soit stable il faut que ce Soit négatif

D'après les équations qu'on a vues, la fonction de transfert entre la vitesse de rotation et le courant est donnée par :

$$H(s) = \frac{-K_m}{C} \left(\frac{1}{\frac{J}{C}s + 1} \right) \quad (2.35)$$

Avec :

$$K_m = \frac{3p}{2} \varphi_{fs} \text{ et } C = \frac{\Delta T_T}{\Delta \Omega}$$

Pour annuler l'erreur statique on doit utiliser un correcteur Pi qui est donné par le schéma suivant :

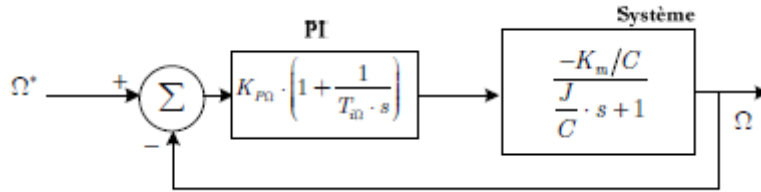


FIGURE 2.8: Schéma pour annuler l'erreur statique

La fonction de transfert de ce système en boucle fermée est donnée par :

$$H_0(s) = \frac{(T_{i\Omega}s + 1)}{\left(\frac{J}{C} T_{i\Omega} \frac{-C}{K_m K_{p\Omega}} \right) s^2 + T_{i\Omega} \left(1 - \frac{C}{K_m K_{p\Omega}} \right) s + 1} \quad (2.36)$$

Après avoir passé à la forme canonique, les paramètres du régulateur sont donnés par :

$$\begin{cases} T_0^2 = \frac{J}{C} T_{i\Omega} \frac{-C}{K_m K_{p\Omega}} \\ 2\xi T_0 = T_{i\Omega} \left(1 - \frac{C}{K_m K_{p\Omega}} \right) \end{cases} \quad (2.37)$$

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté et modéliser les différents composants d'une station de transfert d'énergie par pompage STEP. Nous avons commencé par la modélisation de la pompe turbine, ensuite nous avons passé à la modélisation de la machine synchrone à aimant permanent dans les deux modes moteur et génératrice. Cette dernière est modélisée à vide et en charge. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi. Nous avons constaté que le modèle de la machine synchrone à aimants permanents est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous a permis de simplifier ce modèle. Puis, nous avons opté pour une commande vectorielle avec orientation de flux statorique pour dimensionner la machine à avoir un découplage similaire à une machine à courant continu. Nous avons cité le principe de fonctionnement de la commande avec leurs avantages et inconvénients. Enfin nous avons passé à la synthèse des contrôleurs PI du convertisseur de puissance

Chapitre 3

Simulation et interprétations des résultats

Introduction

Dans le premier chapitre, on a vu le fonctionnement d'une centrale hydroélectrique et leurs équipements, ainsi le choix des équipements électromécaniques selon le site. Ensuite dans le deuxième chapitre on a fait une étude sur les équipements de la centrale avec la modélisation, ainsi une commande vectorielle pour contrôler le couple et la vitesse. En effet, pour extraire le maximum de puissance et la continuité de production d'électricité, donc il faut que la vitesse de rotor de la génératrice doive être constante.

Ce chapitre est consacré à la simulation sous logiciel Matlab/Simulink du fonctionnement d'une centrale hydroélectrique qui est déjà modélisé dans le chapitre précédent, pour évaluer l'efficacité de la commande élaborée à partir des résultats de simulation.

3.1 Introduction sur logiciel de simulation

Simulink est une interface de programmation visuelle conçue pour créer des systèmes de modélisation intuitifs. Simulink offre un moyen de résoudre les équations numériquement en utilisant une interface utilisateur graphique, plutôt que de nécessiter du code.

Les modèles contiennent des blocs, des signaux et des annotations sur un arrière-plan.

Les blocs sont des fonctions mathématiques, ils peuvent avoir un nombre variable d'entrées et de sorties.

Les signaux sont des lignes reliant des blocs, transférant des valeurs entre elles. Les signaux sont des données différents types, par exemple des nombres, des vecteurs ou des matrices. Les signaux peuvent être étiquetés.

Des annotations de texte ou d'images peuvent être ajoutées au modèle et non utilisées dans les calculs.

Ils peuvent aider les autres à comprendre les décisions de conception du modèle comme l'exemple montre dans la figure 3.1 :

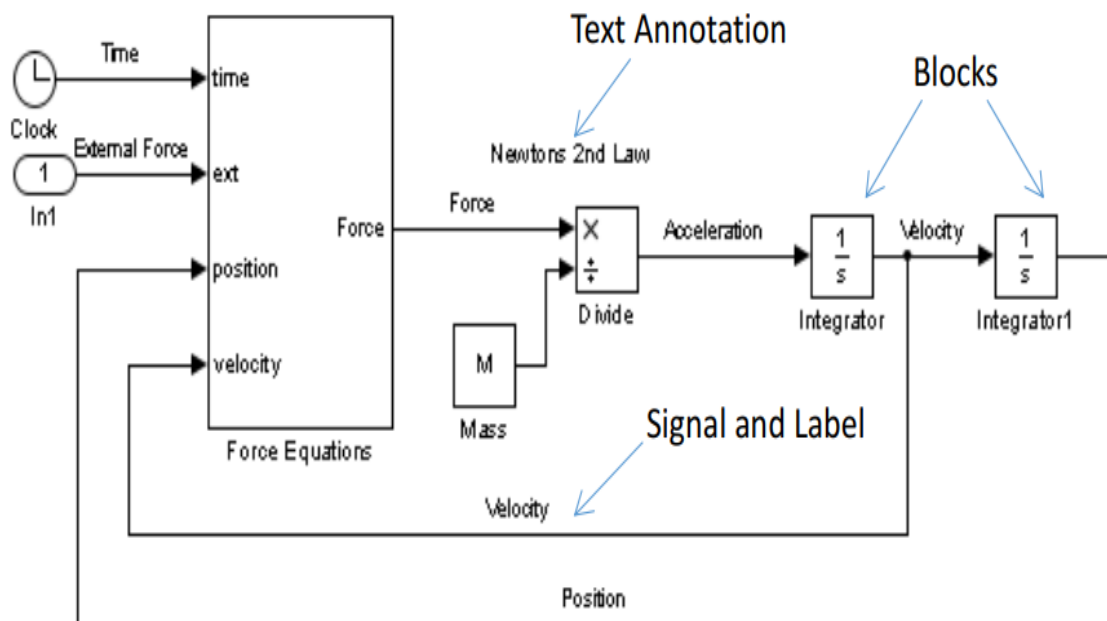


FIGURE 3.1: Exemple simulink

3.1.1 La barre d'outils Simulink

Au-dessus du canevas principal d'un modèle Simulink, se trouve la barre d'outils.

La figure ci-dessous montre la barre d'outils de Simulink et leurs options .

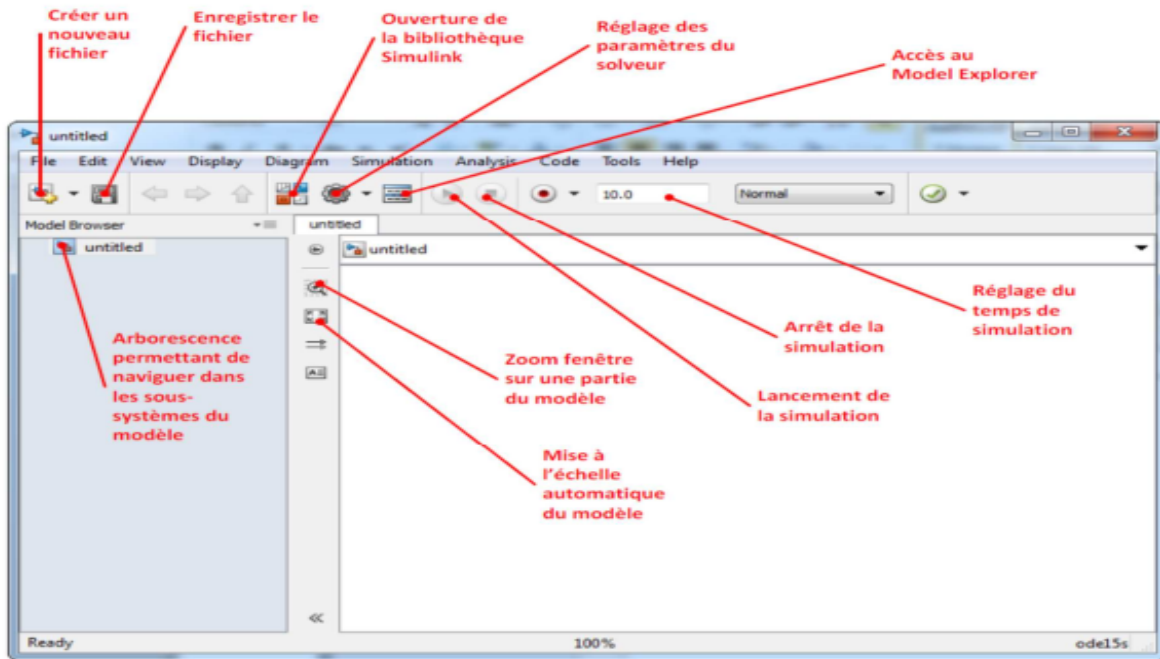


FIGURE 3.2: Barre d'outil de Simulink

3.1.2 Bibliothèque de SIMULINK :

SIMULINK est bâti autour d'une bibliothèque de blocs (librairies) classés par catégories. Les principales librairies sont montrées dans le tableau :

Librairie	Contenu
Sinks	Appareils virtuels de visualisation
Continuous	Systèmes et opérateurs continus
Discrete	Blocs représentant les systèmes discrets
Math	Opérateurs mathématiques
Functions and Tables	Fonction et tables de valeurs
Nonlinear	Systèmes et opérateurs non linéaires
Signals and Systems	Blocs de connexion et sous-systèmes

TABLE 3.1: Les principale librairies dans Simulink

3.2 Résultat de simulation

3.2.1 Résultat de simulation à couple turbine fixe

Nous avons simulé le fonctionnement du dispositif complet sous MATLAB/Simulink. On a fixé la vitesse à une valeur de 7 N.m, et pour vitesse électrique de référence égale à 700 tr/min. en utilisant les paramètres électriques de la machine

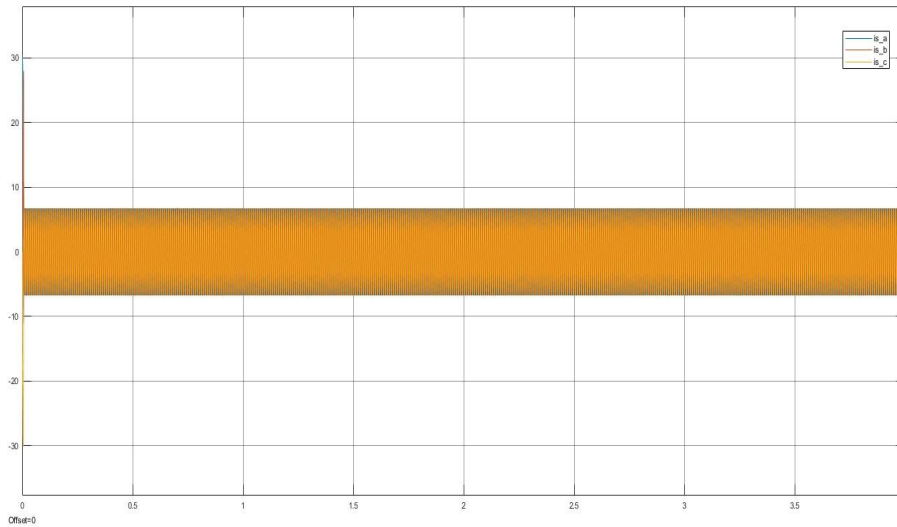


FIGURE 3.3: Les courants statorique i_{abc}

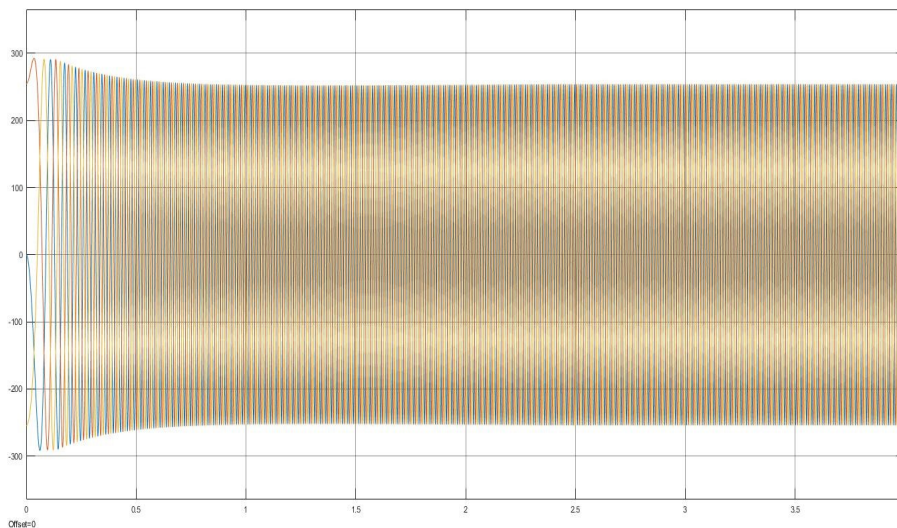


FIGURE 3.4: Les tensions V_{abc}

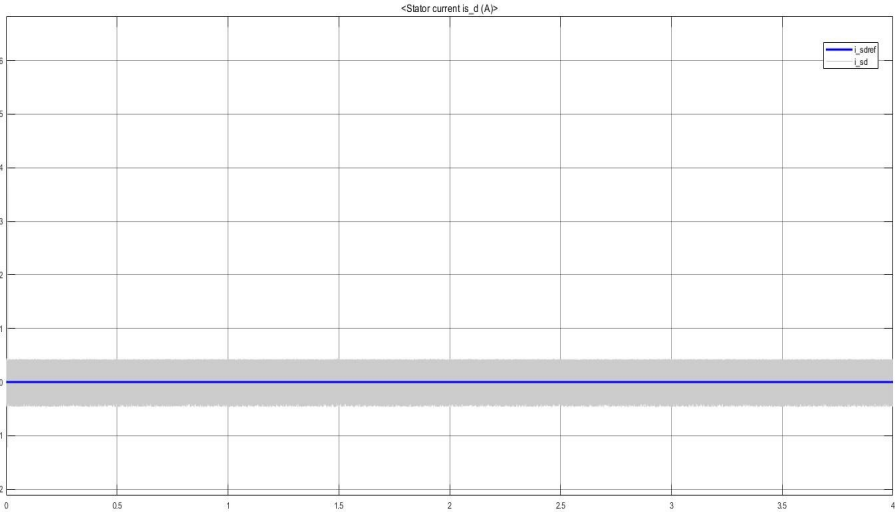


FIGURE 3.5: Les courants i_d et i_{dref}

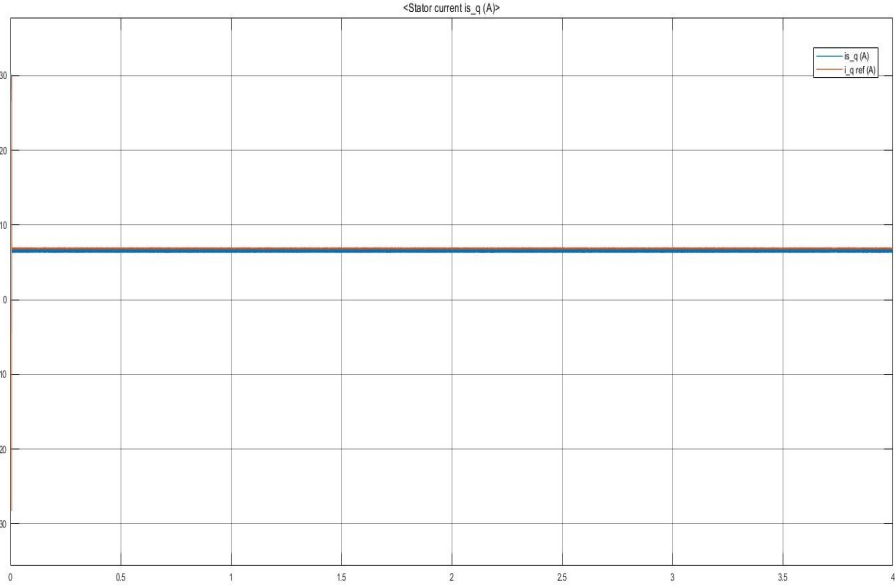


FIGURE 3.6: Les courants i_q et i_{qref}

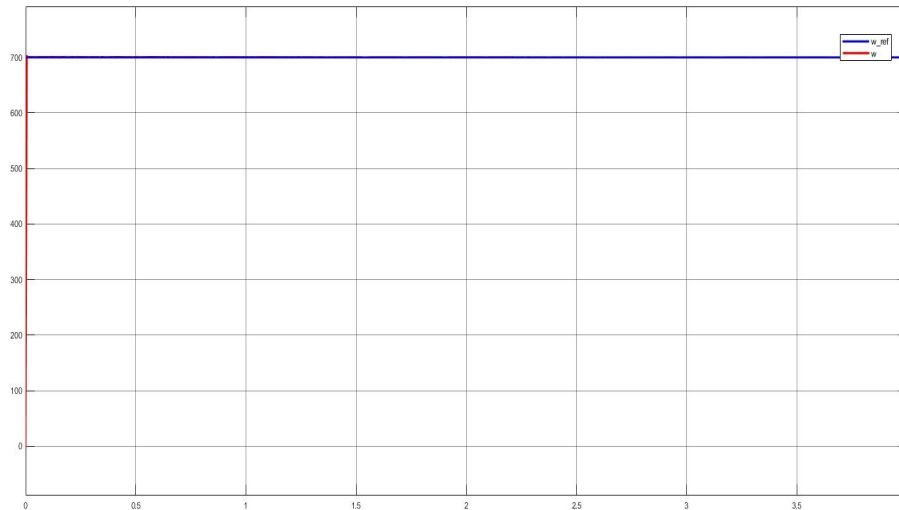
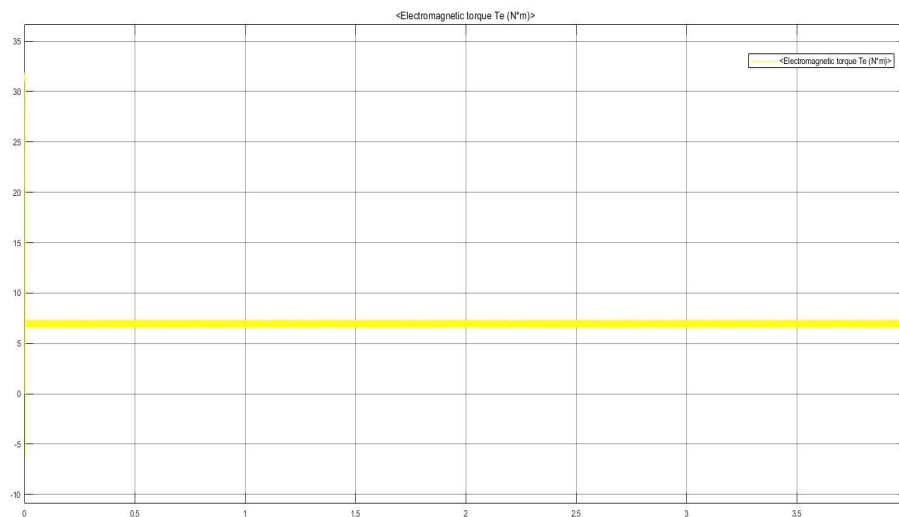
FIGURE 3.7: La vitesse de rotation w et w_{ref} 

FIGURE 3.8: Le couple électromagnétique

Interprétation

Les figures (3.3 et 3.4) représentent l'évolution de la tension et du courant à la sortie de la génératrice pour un couple turbine constant, qui sont des tensions et des courants sinusoïdaux avec des valeurs fixes, car le couple de la turbine est l'image de la vitesse de l'eau. Les figures (3.5 et 3.6) représentent les courants i_d et i_q avec leurs références, on remarque que le courant i_d est maintenu à sa consigne nulle, et le courant i_q suit sa référence. ainsi la vitesse de rotation suit sa référence avec un temps de réponse inférieur à $7 * 10^{-3}s$

3.2.2 Résultat de simulation à un échelon de couple turbine

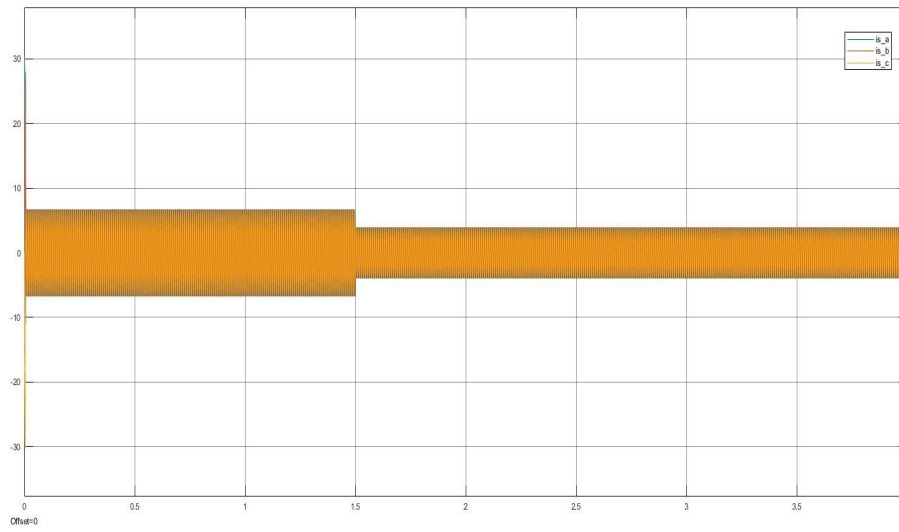


FIGURE 3.9: Les courants statorique i_{abc}

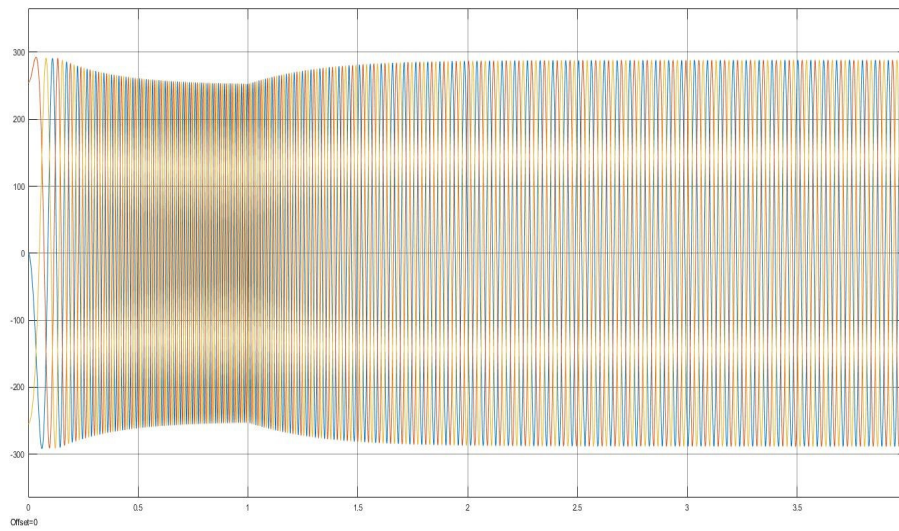


FIGURE 3.10: Les tensions V_{abc}

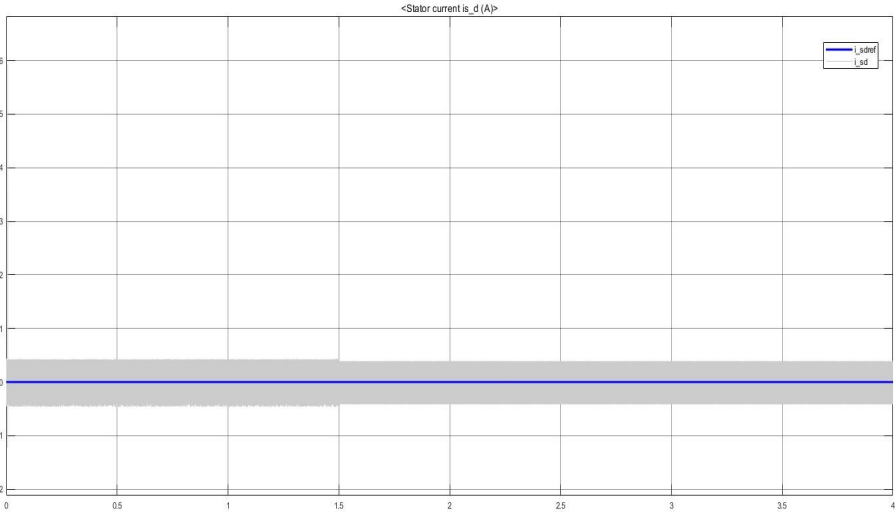


FIGURE 3.11: Les courants i_d et i_{dref}

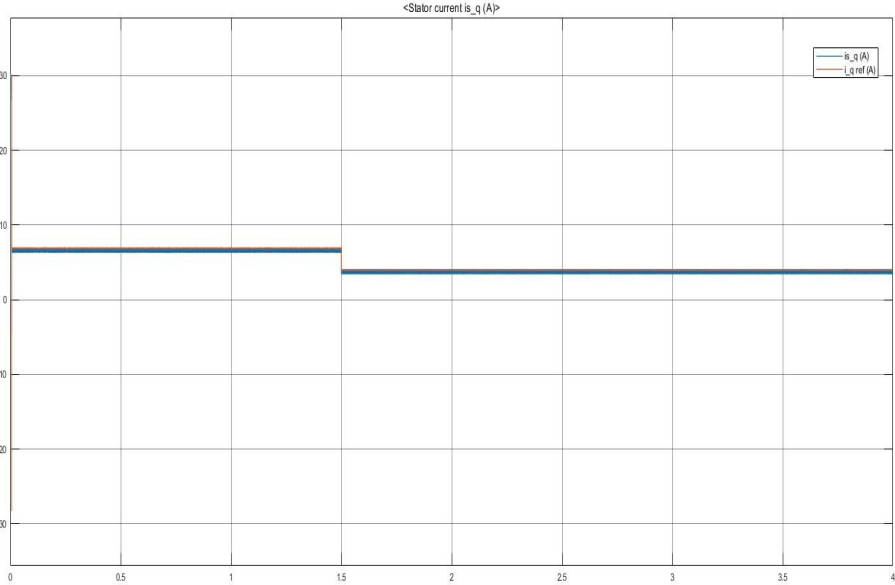
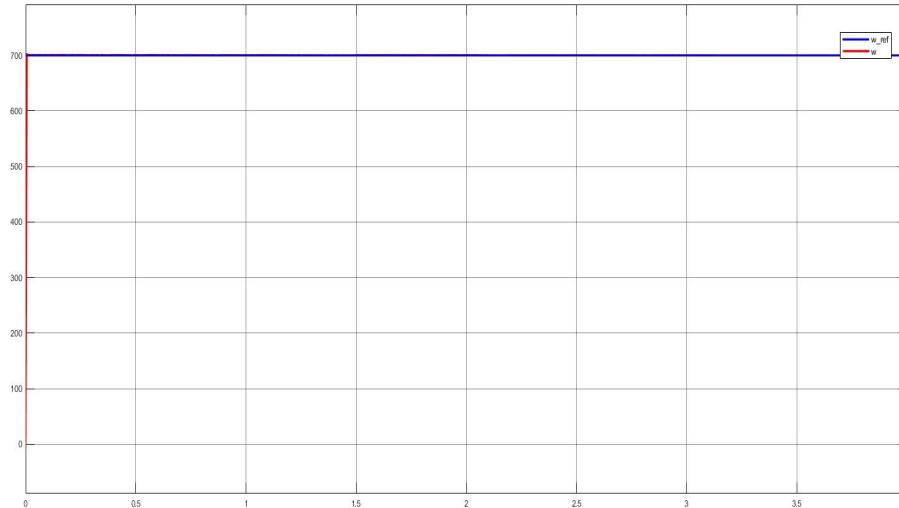


FIGURE 3.12: Les courants i_q et i_{qref}

FIGURE 3.13: La vitesse de rotation w et w_{ref}

Interprétation

Les résultats de simulation obtenus a un échelon de couple turbine, en diminuant le couple turbine de 7N.m a 3 N.m à l'instant 1.5 s.

Les figures (6 et 7) représentent les tensions et les courants qui son sinusoïdaux. On remarque que le courant est proportionnel avec le couple turbine, le courant sera chuté le moment d'application de la perturbation (1.5 s). Ainsi la tension est en relation proportionnelle avec la vitesse mécanique.

Les figures (8 et 9) représentent le découplage des courants i_d et i_q . on remarque que le courant i_d est forcé à la valeur de consigne 0. Et le courant i_q suit sa référence, qui est le responsable du couple électromagnétique.

La figure 10 représente la vitesse de rotation et sa référence. On remarque que la vitesse de rotation suit sa référence avec un temps de réponse inferieur à $7 * 10^{-3}s$

3.3 Test de robustesse :

Pour tester la fiabilité de la commande du système il est important de faire un test de robustesse. En réalité, les paramètres de système sont soumis à des variations grâce à plusieurs phénomènes (échauffement des résistances, saturation des inductances, ...) que nous n'avons pas les pris en compte dans notre étude. Le test de robustesse consiste à varier les paramètres

de la génératrice synchrone à aimant permanent (la résistance et l'inductance). Ensuite, on fait varier la vitesse de référence à un instant (échelon). Les figures (3.14, 3.15 et 3.16) représentent les résultats de simulation de test de robustesse en changeant les paramètres de la machine : (résistance de stator augmente de 100% (échauffement), inductance diminuée de 30% (saturation)) :

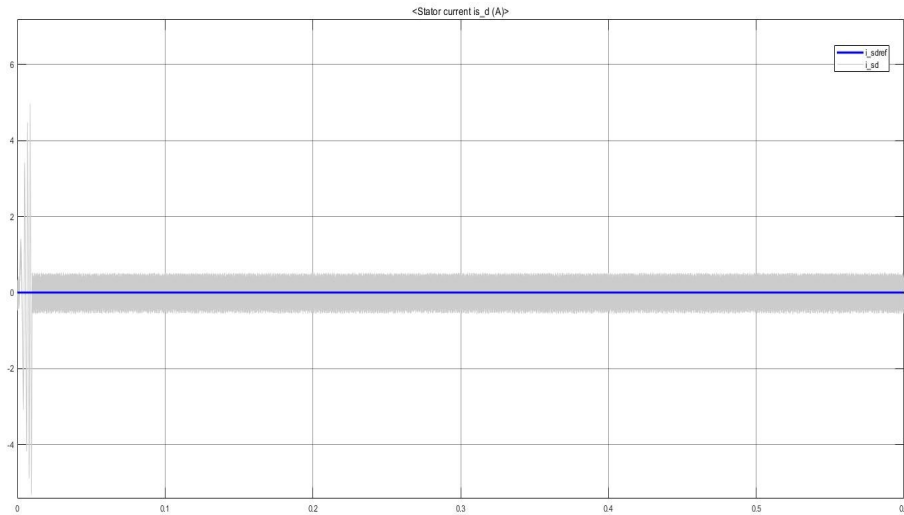
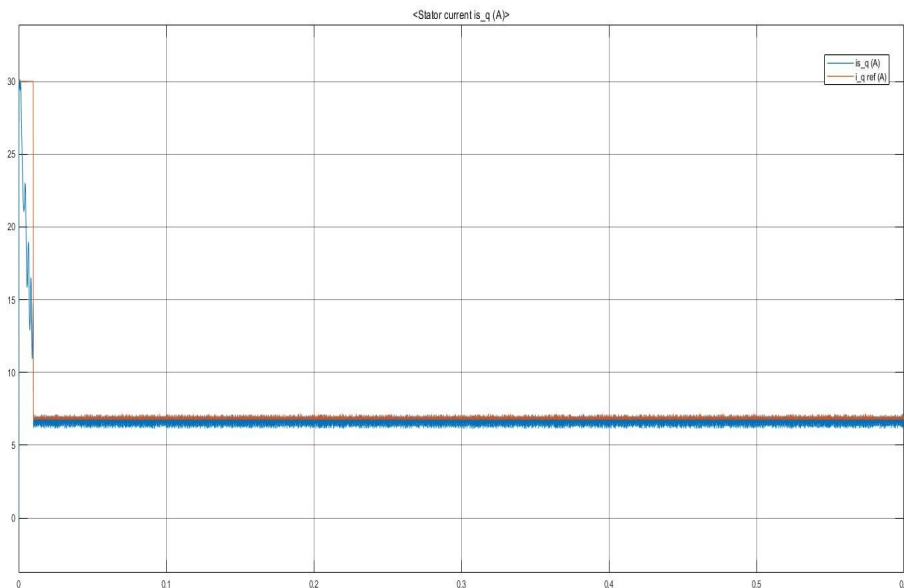
FIGURE 3.14: Les courants i_d et i_{dref} FIGURE 3.15: Les courants i_q et i_{qref}

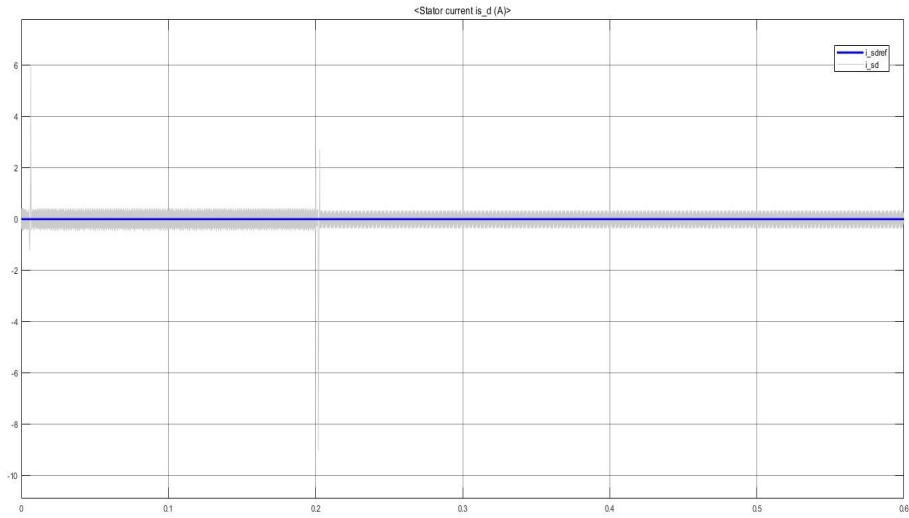
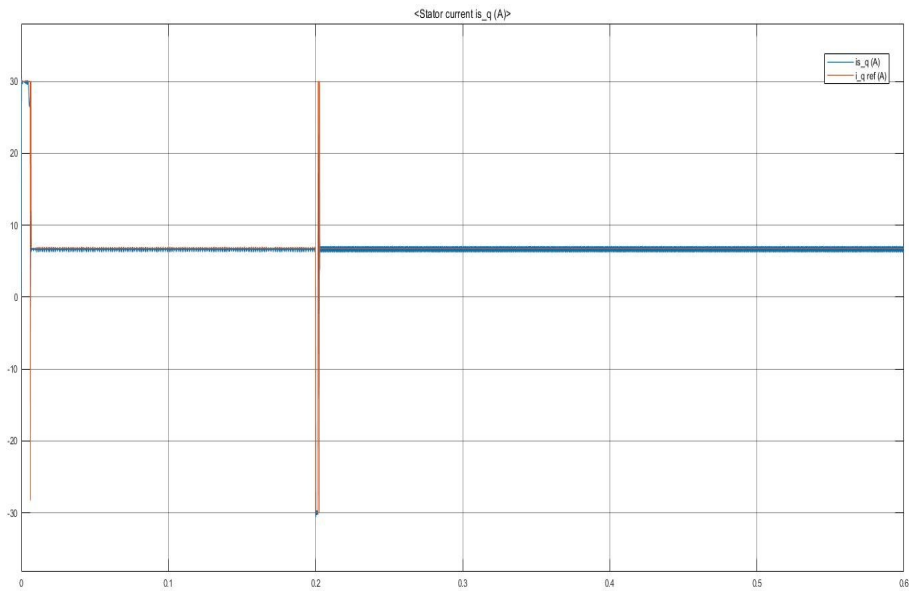
FIGURE 3.16: La vitesse de rotation w et w_{ref} **Interprétation :**

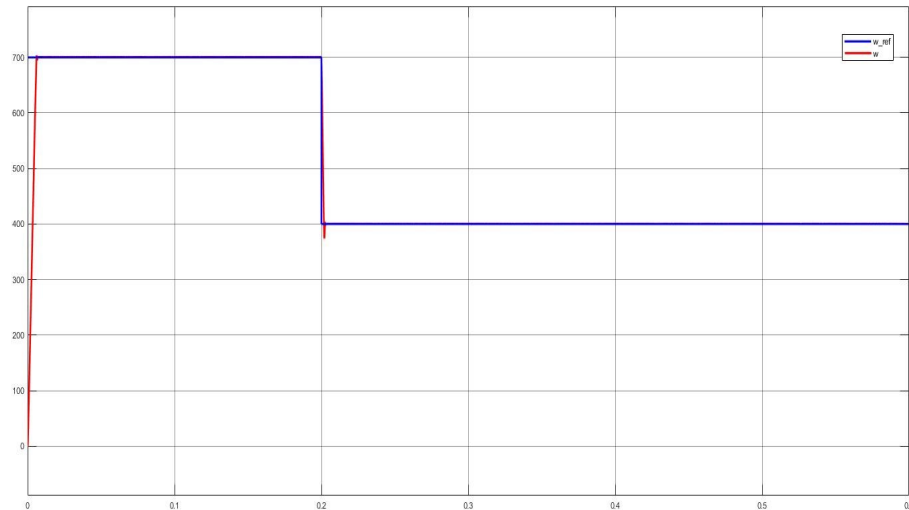
La robustesse de la commande consiste à changer les paramètres de la machine la résistance statique et l'inductance. La résistance est augmentée de 100%, et l'inductance est diminuée de 30%.

Les figures (3.14 et 3.15) représentent les courants i_d et i_q , on remarque que ces derniers ne suivent pas leurs références exactement. Ainsi la figure 13 représente l'évolution de la vitesse de rotation, on remarque la vitesse suit sa référence mais avec un temps de réponse égale à 0.02s.

D'après ces résultats on constate que les performances dynamique et statique de la commande vectorielle sont un peu dégradées avec le changement des paramètres de la machine.

Les figures (3.17, 3.18, et 3.19) représentent les résultats de simulation de test de robustesse avec un échelon de vitesse de référence :

FIGURE 3.17: Les courants i_d et i_{dref} FIGURE 3.18: Les courants i_q et i_{qref}

FIGURE 3.19: La vitesse de rotation w et w_{ref}

Interprétation

Cette fois nous avons changé la vitesse de référence à un échelon, commence par 700 tr/min, et a l'instant 0.2s la vitesse sera 400 tr/min

Les figure (14 et 15) représentent les courant i_d et i_q , on remarque que le courant suit sa référence, mais à l'instant 0.2s où la vitesse change sa valeur, on remarque des perturbations ensuite revient à la valeur de référence.

La figure 16 représente l'évolution de la vitesse de rotation avec sa référence, on remarque que la vitesse de rotation suit sa référence avec un temps de réponse inférieur a 7.10^{-3} s.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons simulé le fonctionnement de la centrale hydroélectrique sous le logiciel MATLAB/Simulink. Nous avons utilisé la machine synchrone à aimant permanent, ainsi sa commande pour contrôler la vitesse et le couple séparément.

En premier temps nous avons simulé avec un couple constant ensuite avec échelon de couple, les résultats obtenus montrent le bon fonctionnement de la commande utilisée dans les conditions normales. Ensuite, nous avons fait le test de robustesse pour tester la fiabilité de la commande, lors du changement des paramètres de la machine, nous avons remarqué la dégradation de la machine.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, notre travail était consacré pour présenter l'une des techniques de production d'énergie électrique. L'énergie hydroélectrique est la technique la plus ancienne mais avec le développement de la technologie elle est donc qualifiée de la plus noble, parce qu'elle est propre et utilise des sources primaires renouvelables. C'est la troisième source d'électricité après le charbon et le gaz, et la première en énergie renouvelable.

La deuxième fonctionnalité de cette technique a donné une très grande importance aux centrales hydrauliques. Ces dernières ne servent pas à produire de l'électricité mais elles stockent de l'énergie électrique aussi grâce à la réversibilité d'utilisation de la source de production STEP.

L'objectif de notre mémoire était de simuler par le logiciel MATLAB/SIMULINK le fonctionnement de la centrale hydraulique (station de transfert d'énergie par pompage), en appliquant la commande vectorielle à la machine synchrone à aimant permanent qui est notre génératrice pour commander le système.

Le premier chapitre de notre mémoire est dédié à la présentation des centrales hydroélectriques et les différents composants qui constituent ces centrales tel que nous avons basé sur les deux organes principales dans la centrale (turbine, alternateur). Ensuite nous avons parlé sur les centrales réversibles STEP, avec leur rôle dans le stockage de l'énergie électrique.

Dans le deuxième chapitre, nous avons modélisé les différents composants de la centrale hydroélectrique (turbine pompe, machine synchrone à aimant permanent dans les deux modes de fonctionnement, ...). Nous avons vu la difficulté de résoudre le système dans le repère triphasé ce qui nous permet de passer au repère diphasé par une transformation de Park. Ensuite nous avons passé à la commande vectorielle par orientation de flux qui sert à ramener la machine synchrone à aimant permanent à une machine à courant continu à excitation séparée pour découpler le couple et le flux et les commander séparément.

Dans le troisième chapitre, nous avons fait la simulation du système global avec le logiciel MATLAB/SIMULINK, dont les résultats obtenus montrent la fiabilité et le bon fonctionnement du système, ainsi la fiabilité de la commande qu'on a fait.

Quelques perspectives :

- Faire une réalisation du projet pour tester les résultats obtenus
- Sensibiliser les responsables à l'importance de cette source de production d'électricité, et faire des projets en ALGERIE
- Remplacer la commande vectorielle par une commande très fiable

Annexe

Paramètres	Valeur
R_s	2.875 Ω
L_d	0.00153H
L_q	0.00153
φ_f	0.175wb
J	0.002
p	2
C_f	0.0027 N.m

TABLE 3.2: Les paramètres de la machine

Paramètres	Valeur
K_p	12
K_i	8.1

TABLE 3.3: Les paramètres du correcteur de commande

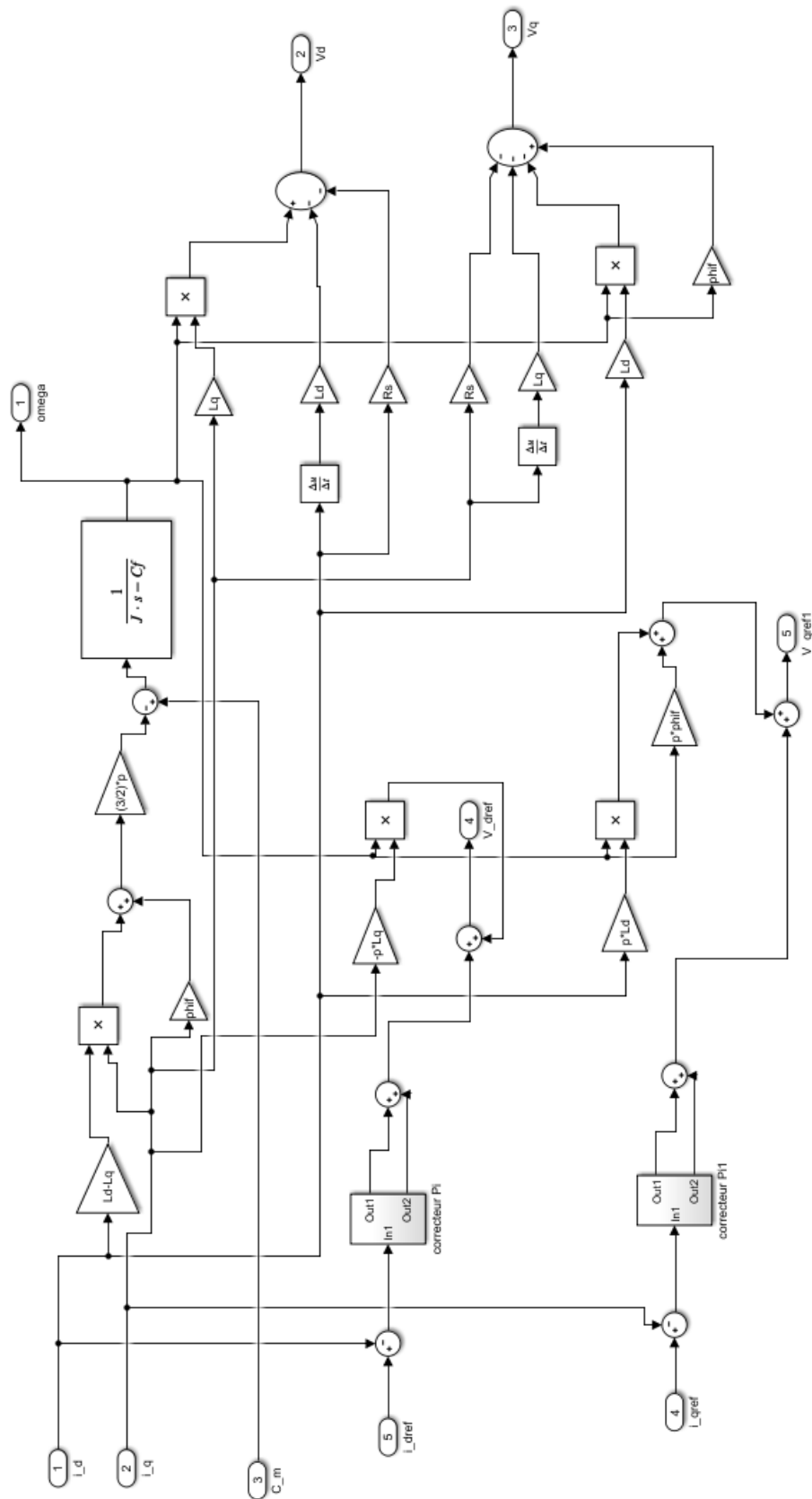


FIGURE 3.20: La machine asynchrone à aimant permanent MSAP

Bibliographie

- [1] Les barrages au fil de l'eau <https://www.rivieres.info/patri/barrages-fil-eau.htm>
- [2] thèse le marche de l'hydroélectricité dans le monde JUNIUS Adrien DESS Economie et Politique de l'énergie, soutenue le 30/10/2004
- [3] (le reference de la figure)
- [4] <http://www.bflhydro.com/products-turbine.php>
- [5] Wikimedia Commons. (August 25, 2015). Ossberger Turbine [Online]. Available :

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8e/Ossberger_turbine_runner.jpg
- [6] Le site officiel de MecaFlux Heliciel
- [7] Projet Fin D'étude Electrification par couplage de l'éolien et de l'hydraulique
- [8] Etude et contrôle des aérogénérateurs basés sur les machines asynchrone à rotor bobiné", Mémoire de magister de l'université de Bejaia, Algérie, Octobre 2011
- [9] ifpen d'apres divers source Les différentes technologies de stockage en fonction de leur puissance et de temps de décharge
- [10] JUSTE TSOTIE W AMBA, modélisation et implémentation numérique du simulateur analogique de la centrale Hydro-Québec. Décembre, 2013
- [11] Mme HamechaSamira,EpBourekache « etude et commande d'une eolienne a base d'une machine synchrone à aimant permanent » Mémoire de magister en électrotechnique université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou 2013
- [12] commande floue de la machine synchrone à aimant permanant (MSAP) utilisée dans un système éolien » ; mémoire de Magister ; université Ferhat Abbas de Sétif ; 2012.
- [13] Contrôle de la machine asynchrone : Commande scalaire , Commande vectorielle, Commande directe du couple» ; université de Djilali Liabes de Sidi Bel Abess ; 2004.

-
- [14] Lakhdar Belhadji Optimisation du contrôle commande d'un système hydraulique réversible à vitesse variable. Autre. Université de Grenoble, 2013.
- [15] article laboratoire d'électrotechnique, 'LEC', faculté des sciences de l'ingénieur ; université Mentouri de Constantine ; reçu le 14 Janvier 2010 – accepté le 2010