

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الآلية والالكترونتقي

Département d'Automatique et d'Electrotechnique



Mémoire de Master

En Automatique

Spécialité : Automatique et Informatique industrielle

Présenté par

YAHIA Amine

&

BENALI KHOUDJA Anes Zoubir

ETUDE DE LA COMMANDE DE REGULATION DE TENSION D'UNE MACHINE SYNCHROME

Dirigé par : Mr. BENNILA NOUREDDINE & Mme. BENNEDJMA KAHINA

Année Universitaire 2020-2021

Dédicace

On dédie ce modeste travail, aux êtres les plus chers, et à qui on doit reconnaissance et dévouement et en qui on ne cesserait de remercier à

Savoir :

Nos très chers parents, nos sœurs, nos frères.

A nos amis, à qui Nous souhaiterons adresser l'expression de mon amour le plus profond pour leur écoute, affection, soutien moral et conseils.

A toute nos familles de près ou de loin.

A nos amis qui ont étudié à nos côtés durant ces quatre

Dernières années de spécialité.

A tous mes amis de la promotion Automatique et informatique industriel 2020/2021

Remerciements

Ce travail est le résultat d'un dur labeur et de beaucoup de sacrifices, nos remerciements vont d'abord à **ALLAH**, créateur de l'univers qui nous a doté d'intelligence, et nous a maintenu en santé mentale et physique pour mener à bien cette année d'étude, à qui nous profondément et sincèrement reconnaissons.

Nous tenons à remercier toutes les personnes commençons par nos parents, nos familles par leur sacrifice pour nous fournir les meilleures conditions de travail, ainsi nos amis qui ont contribué au succès de notre travail et qui nous ont aidé lors de la rédaction de ce mémoire.

Nous tenons à remercier l'ensemble du personnel du groupe Ecole Technique de Blida pour nous avoir accueilli au sein de leur entreprise, afin d'y accomplir notre projet de fin d'études.

Nous remercions particulièrement l'encadreur de stage **Mme. BENNEDJMA Kahina**, pour sa disponibilité, ses conseils et pour la confiance qu'il nous a accordée tout au long du projet.

Nous adressons nos vifs remerciements à notre promoteur **Mr. BENNILA Noureddine**, pour nous avoir conseillé et orienté tout le long de ce travail ; nous tenons à lui exprimer notre sincère reconnaissance pour son aide précieuse et sa disponibilité.

Nous remercions également tous **les membres du jury** pour nous avoir honorés par leur présence et pour avoir accepté d'évaluer notre travail.

Et enfin nos remerciements à toutes les personnes qui ont eu la gentillesse et la gratitude de nous aider de près ou de loin dans la réalisation de ce projet.

ملخص

يتكون مشروع نهاية الدراسة هذا من إجراء الدراسة وتنفيذ البرامج للتحكم في تنظيم الجهد لآلة متزامنة تعمل كمولد (مولد التيار المتردد)، أو بدون تحميل (في هذه الحالة نتحدث عن تنظيم الجهد المناسب)، أو عند الحمل (في هذه الحالة يكون تنظيمًا للقدرة التفاعلية) باستخدام عنصر تحكم تقليدي وهو التحكم النسبي المتكامل المشتق (PID). سنقدم أولاً مفاهيم التكنولوجيا وتشغيل الآلات المتزامنة وخاصة المولد. بعد نمذجة المولد سيتم تقديمه بطريقة صريحة. وبالتالي، سيتم تفصيل الخطوات المختلفة لتنظيم جهد المولد والتحقق من صحتها عن طريق المحاكاة في بيئة Simulink / Matlab وتطبيق هذه النتائج لعمل البرمجة على TIA Portal.

الكلمات المفتاحية: المولد المتزامن، نظام الإثارة، النمذجة والخطية، منظم الجهد PID وواجهة برمجة التطبيقات.

Résumé

Le présent projet de fin d'études consiste à effectuer l'étude et l'implémentation du logiciel de la commande de régulation de tension d'une machine synchrone fonctionnant en générateur (alternateur), soit à vide (on parle dans ce cas de la régulation de tension proprement dite), soit en charge (Il s'agit dans ce cas de la régulation de la puissance réactive) en utilisant une commande classique qui est la commande proportionnelle intégrale dérivée (PID). Nous introduirons tout d'abord les notions de la technologie et le fonctionnement des machines synchrones et en particulier l'alternateur. Après la modélisation de l'alternateur sera présenté d'une façon explicite. Ainsi les différentes étapes pour faire la régulation de tension de l'alternateur sera détaillée et validé par simulation sous l'environnement Simulink/Matlab et appliqué ces résultats pour faire la programmation sur TIA Portal.

Mots-clés : Générateur synchrone, système d'excitation, modélisation et linéarisation, régulateur PID de tension et API.

Abstract

The present end-of-study project consists in carrying out the study and the software implementation of the voltage regulation control of a synchronous machine operating as a generator (alternator), or at no load (in this case we speak of regulation voltage proper), or on load (in this case it is reactive power regulation) using a conventional control which is the derivative integral proportional control (PID). We will first introduce the concepts of technology and the operation of synchronous machines and in particular the alternator. After the modeling of the alternator will be presented in an explicit way. Thus the different steps to regulate the voltage of the alternator will be detailed and validated by simulation under the Simulink/ Matlab environment and applied these results to make the programming on Tia Portal.

Keywords: Synchronous generator, excitation system, modeling and linearization, PID voltage regulator and API.

Liste des abréviations

AC	Courant alternatif
API	automate programmable industriel
AVR	Automatic voltage regulator (régulateur automatique de tension)
$\text{Cos}(\varphi)$	Le facteur de puissance
DC	Courant continu
f	Fréquence en Hz
FTa	Fonction de transfert d'alternateur
FTe	Fonction de transfert d'excitation
E	F.e.m. Transitoire de la machine synchrone.
GRAF CET	Graphe Fonctionnel de Commande des Étapes et Transitions
GP	Génératrice principale
GS	Génératrice synchrone
HT	Haute tension
I	Le courant de charge
IA	Le courant d'alternateur
I_{ex}	Le courant d'excitation
i_e	Le courant de champ
IHM	Interface homme machine
IR	Le courant de roue polaire
I_s	Courant de la machine
K_b	Facteur de bobinage
K_d	Le temps dérivatif
K_i	Le temps intégral
K_p	Le gain proportionnel
L	La longueur du conducteur
LD	Inductance propre de l'amortisseur d'axe direct
LQ	Inductance propre de l'amortisseur d'axe quadrature
L_d	Inductance synchrone longitudinale
L_f	Inductance propre de l'inducteur
L_r	Inductance rotorique
L_q	Inductance synchrone transversale
L_0	Inductance homopolaire
MaD	Inductance mutuelle entre l'amortisseur d'axe direct et l'induit
MaQ	Inductance mutuelle entre l'amortisseur d'axe en quadrature et l'induit
Ma_f	Inductance mutuelle entre l'inducteur et l'induit
MfD	Inductance mutuelle entre l'inducteur et l'amortisseur d'axe direct
MT	Moyen tension
MSAP	machines synchrones à aimants permanents
MS	Machine synchrone
N	La vitesse (tour/min)
N_s	Nombre des conducteurs par phase
P	La puissance active (W)
PID	Proportionnel intégral et dérivé
PJS	Pertes joule induit (stator)

P_m	Puissance mécanique
P_u	La puissance utile
PSS	Le stabilisateur de puissance
Q	La puissance réactive (VAR)
THT	Très haut tension
T_m	Le couple mécanique
UA	La tension d'alternateur
UR	Tension rotorique de l'alternateur
V	La tension
V_{abc}	Les tensions des phases statoriques.
V_{eff}	Tension efficace
VS	Tension aux bornes de la machine.
r	résistance d'un enroulement statorique ;
R	La résistance d'un conducteur
Ra	Résistance d'une phase statorique
$RfdQ$	Respectivement, résistances de l'inducteur, de l'amortisseur d'axe d et d'axe Q
Rr	Resistance rotorique
STEP	Station de Transfert d'Energie par Pompage
S	La puissance apparent (VA)
Sc	la section du conducteur
TIA	Totally Integrated Automation
X	réactance synchrone d'un enroulement statorique.
X_d	Réactance transitoire de la machine.
δ	L'angle de déphasage interne
ρ	Résistivité
φ	Flux utile par pole
ϕ_{abc}	Les flux totaux à travers les bobines statorique
Ω	La vitesse (rad/s)

Table des matières

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre 1

Description, Constitutionnelle et fonctionnelle de la machine synchrone

1.1 Introduction	4
1.2 Définition de la machine synchrone.....	4
1.2.1 Symboles électrique	4
1.3 Constitution de la machine synchrone.....	5
1.3.1 Stator.....	5
1.3.2 Rotor.....	5
1.4 Différentes conceptions de la machine synchrone.....	7
1.4.1 Première conception	7
1.4.2 Deuxième conception.....	8
1.5 Classification des machines synchrones	9
1.6 Fonctionnement de la machine synchrone.....	10
1.6.1 Fonctionnement en moteur	11
1.6.2 Fonctionnement en alternateur.....	12
1.7 Couplage des Alternateurs.....	18
1.8 Excitation des alternateurs.....	20
1.8.1 Introduction	20
1.8.2 Éléments d'un système d'excitation	21
1.9 Différents types des centrales électriques.....	25
1.9.1 Centrales thermiques	25
1.9.2 Centrale Hydraulique.....	27
1.9.3 Centrales à énergie renouvelable	29
1.10 Conclusion.....	30

Chapitre 2

Modélisation de La machine synchrone

2.1	Introduction	32
2.2	Structure générale de la machine synchrone	32
2.3	Modélisation de la Machine Synchrone à rotor bobiné.....	33
2.3.1	Modèle linéaire.....	33
2.3.2	Modèle de Park.....	33
2.3.3	Hypothèses simplificatrices.....	34
2.3.4	Equations électriques et magnétiques	35
2.3.5	Transformation de Park.....	37
2.3.6	Equations de Park dans les axes d et q, liées au rotor	38
2.3.7	Equations des flux et courants.....	39
2.3.8	Schéma équivalent de la machine synchrone	40
2.4	Bilan des puissances de la machine synchrone	40
2.4.1	Puissance absorbée	40
2.4.2	Puissance utile	41
2.4.3	Rendement de l'alternateur	41
2.5	Formules du rendement	44
2.6	Caractéristiques d'une machine synchrone.....	44
2.6.1	Caractéristiques en charge	44
2.6.2	Caractéristique à vide.....	47
2.7	Conclusion.....	47

Chapitre 3

REGULATION DE TENSION D'UNE MACHINE SYNCHRONE (ALTERNATEUR)

3.1	Conception d'un système de commande.....	49
3.2	Description des régulations	50
3.2.1	Le Régulateur PID	50
3.3.1	Pourquoi règle-t-on la tension à certaines valeurs de référence ?	54
3.3.2	Les causes des variations possibles de tension :	54
3.4	Système d'excitation a diodes tournantes centrale de ras Djanet	55
3.4.1	Principe d'excitation	55

3.4.2	Principe de réglage	56
3.5	Régulation adaptée	57
3.5.1	Régulateur de tension	57
3.5.2	Régulateur de courant de champ.....	58
3.5.4	Permutation des régulateurs	58
3.6	Mesure des grandeurs rapportées aux régulateurs	59
3.6.1	Mesure du courant d'alternateur IA.....	59
3.6.2	Mesure du courant de champ IF	59
3.6.3	Mesure du courant de roue polaire I _R	60
3.7	Détails du modèle du système	61
3.7.1	Fonction de transfert de l'amplificateur.....	62
3.7.2	Fonction de transfert de l'excitation	62
3.7.3	Fonction de transfert du Générateur.....	62
3.7.4	Fonction de transfert du capteur	62
3.8	Etude de la stabilité de système	62
3.8.1	La fonction de transfert du système	64
3.9	Réponse indicielle du système sans régulation	64
3.10	Etude du système avec régulation	65
3.10.1	Régulation de tension à vide.....	66
3.10.2	Régulation de tension en charge.....	66
3.11	Résultats et discussion	72
3.12	Conclusion	72

CHAPITRE 4

Implémentation logicielle de la commande de régulation

4.1	Introduction	74
4.2	Matériel utilisé	74
4.3	Définition d'un API.....	74
4.3.1	Critères de choix d'un automate.....	75
4.3.2	Description de l'Automate S7-300	75
4.3.3	Avantages de l'automate S7-300	77

4.4	Logiciels de programmation	77
4.4.1	Description du logiciel TIA (Totally Integrated Automation) portal.....	77
4.4.2	STEP 7	77
4.4.4	Synoptique du système réalisé	86
4.4.5	Choix du matériel.....	86
4.5	Conclusion	93
	Conclusion générale	94
	Bibliographie.....	96

Liste des figures

Figure 1. 1 : Symboles électrique d'une machine synchrone .	5
Figure 1. 2 : Constitution de la machine synchrone	5
Figure 1. 3 : Rotors bobinés à pôles lisses	6
Figure 1. 4 : Détails du rotor bobiné à pôles lisses	6
Figure 1. 5 : Rotors bobinés à pôles saillants.	7
Figure 1. 6 : Rotors à aimants	7
Figure 1. 7 : Moteur synchrone à pôle saillant	8
Figure 1. 8 : Coupe transversale à pôle saillant	8
Figure 1. 9 : Rotor d'une machine synchrone à pole lisse	9
Figure 1. 10 : Rotor à pôles saillants constitués d'aimants permanents.	10
Figure 1. 11 : Circuit d'une machine synchrone	11
Figure 1. 12: Phases de redressement .	12
Figure 1. 13 : Principe de la production de courant dans l'alternateur	13
Figure 1. 14 : Circuit d'une machine synchrone	13
Figure 1. 15 : Représentation vectorielle diagramme de Behn-Eschenburg	14
Figure 1. 16 : Diagramme d'une machine à pôles lisses et non saturée	15
Figure 1. 17 : Schéma d'un alternateur synchrone	16
Figure 1. 18 : Courbe de la tension à vide fournit par l'enroulement d'alternateur.	17
Figure 1. 19: Système d'excitation d'un générateur synchrone	20
Figure 1. 20 : Schéma fonctionnel du système d'excitation d'une génératrice synchrone	21
Figure 1. 21 : Système d'excitation de type DC	22
Figure 1. 22 : Excitation de type AC avec redresseur non commandé	23
Figure 1. 23 : Excitation de type AC avec redresseur commandé	23
Figure 1. 24 : Excitation AC de type Brushless	24
Figure 1. 25 : Excitatrice statique par redresseur commandé à source de tension	24
Figure 1. 26: Schéma d'une centrale thermique à flamme	26
Figure 1. 27: Schéma d'une centrale à combustion fossile	26
Figure 1. 28 : Schéma d'une centrale à fission nucléaire	27
Figure 1. 29 : Schéma d'une centrale hydraulique	28
Figure 1. 30 : Schéma d'une centrale hydroélectrique	28
Figure 1. 31 : Schéma d'une centrale éolienne	29
Figure 1. 32 : Schéma d'une usine marémotrice	30
Figure 2. 1 : Représentation d'une machine synchrone bipolaire à aimants permanents.....	32
Figure 2. 2: Machine synchrone triphasé avec amortisseurs.....	34
Figure 2. 3 : Machine synchrone triphasé, amortisseurs assimilés à deux enroulements en court-circuit, à 90° l'un de l'autre.	36
Figure 2. 4 : Interprétation de la transformation de Park pour une machine synchrone.	38

Figure 2. 5 : Circuits équivalents du modèle simplifié de la machine synchrone (a) axe direct, (b) axe quadrature.....	40
Figure 2. 6 : Schéma qui présente toutes les pertes possibles.	44
Figure 2. 7 : Schéma équivalent d'alternateur.....	45
Figure 2. 8 : courbe qui présente la variation de la chute de tension en fonction de la nature du circuit alimenté.	45
Figure 2. 9 : Schéma équivalent d'alternateur.....	46
Figure 2. 10 : Courbe qui présente la tension de rotor en fonction de I_{ex}	47
Figure 3. 1: Système de commande	49
Figure 3. 2: Description bref de la régulation d'alternateur	50
Figure 3. 3 : Schéma synoptique d'un régulateur PID.....	51
Figure 3. 4 : Schéma Bloc du système d'excitation	56
Figure 3. 5 : Diagramme de Behn-Eschenburg	61
Figure 3. 6 : schéma bloc de système d'alternateur.	63
Figure 3. 7 : La réponse de système sans régulation.	64
Figure 3. 8 : Diagramme de principe de régulation de tension de l'alternateur.	65
Figure 3. 9 : Schéma bloc de régulation de tension.....	65
Figure 3. 10 : Réponse indicielle du système avec changement de K_p , K_i et K_d	66
Figure 3. 11 : Réponse indicielle du système pour le 1er cas.	67
Figure 3. 12 : Erreur du système pour le 1er cas.	67
Figure 3. 13 : Réponse du système pour le 2eme cas.....	68
Figure 3. 14 : Erreur du système pour le 2ème cas.....	69
Figure 3. 15 : Réponse du système pour le 3ème cas.....	70
Figure 3. 16 : Erreur du système pour le 3ème cas.....	70
Figure 3. 17 : Réponse du système pour le 4ème cas.....	71
Figure 3. 18 : Erreur de système pour le 4ème cas.....	71
Figure 4. 1 : Organes de commande et de visualisation des CPU	76
Figure 4. 2 : Vue du portal.....	78
Figure 4. 3 : Vue du projet.....	78
Figure 4. 4 : Création d'un projet	79
Figure 4. 5: Configuration matérielle.	80
Figure 4. 6 : Adressage E/S.	81
Figure 4. 7 : Partie de la table des variables.....	82
Figure 4. 8 : Vue des blocs.....	83
Figure 4. 9 : Compilation	84
Figure 4. 10 : Chargement.....	84
Figure 4. 11 : Configuration d'une vue IHM.....	85
Figure 4. 12 : Ajout d'un appareil IHM.....	85
Figure 4. 13 : Fenêtre du travail dans le WinCC.....	86

Figure 4. 14 : Configuration matérielle	87
Figure 4.15 : Boutons poussoirs (marche /arrêt)	87
Figure 4.16 : capteur Cosinus phi mètre	88
Figure 4.17 : Transformateur de courant	91
Figure 4.18 : Interface Homme Machine.....	91
Figure 4.19 : Bobine	92
Figure 4.20 : Vue globale	93
Figure 4.21 : Vue manuel automatique.....	93
Figure 4.21 : Vue valeurs PID.....	94

Liste des tableaux

Tableau 3. 1 : Rôle et domaine d'utilisation et les points faibles des régulateurs PID	53
Tableau 3. 2 : Tableau d'influence	53
Tableau 3. 3 : Caractéristiques du système d'excitation	57
Tableau 3. 4 : Paramètres utilisés pour le système de régulation automatique	63
Tableau 3. 5 : paramètres de régulateur PID avec plusieurs fonctions objectives.....	65

Introduction générale

Introduction générale

Les machines électriques équipent la majeure partie des systèmes d'entraînement industriels à vitesse variable. Les applications vont de la robotique (servomoteurs) jusqu'à l'entraînement des laminoirs en sidérurgie en passant par le domaine des transports. La machine à courant Continu est restée longtemps l'actionneur le plus utilisé pour réaliser ces systèmes. Convenablement compensée, cette machine présente l'avantage d'être simple à commander, le couple étant directement proportionnel au courant d'induit. Néanmoins, elle présente des inconvénients liés à sa structure. La présence du système balais-collecteur nécessite un entretien constant (usure du graphite), limite la vitesse de rotation, interdit son utilisation en atmosphère explosive.

Le développement des semi-conducteurs de puissance a permis de réaliser des onduleurs de tension ou de courant, ouvrant la voie de la vitesse variable aux machines alternatives (Synchrone et asynchrone). Ces machines possèdent de nombreux avantages par rapport à la machine à courant continu. L'absence du collecteur permet d'accroître la fiabilité et permet d'obtenir des machines ayant un coût de fabrication et d'entretien moins important. Les avancées technologiques de la micro-électronique ont permis le développement de commandes très performantes pour les machines alternatives (contrôle vectoriel et contrôle direct en couple). De nombreux constructeurs proposent aujourd'hui des variateurs utilisant ces principes de commande.

Le régulateur de tension de l'alternateur, a pour rôle de maintenir la tension alternateur alimentant un réseau séparé à une valeur constante quels que soient le facteur de puissance et l'intensité du courant débité par le stator, ce qui va assurer la sûreté, la qualité et l'optimisation du système électrique. Tout en permettant aux utilisateurs du réseau de faire fonctionner leurs matériels dans des conditions optimales, il assure aux gestionnaires du réseau une exploitation des réseaux à moindre coût et dans des conditions de sûreté satisfaisante.

Notre travail concerne l'étude de la commande de régulation de tension d'une machine synchrone. L'objectif est à effectuer l'étude et l'implémentation logicielle de la commande de régulation de tension d'une machine synchrone fonctionnant en générateur (alternateur), soit à vide (on parle dans ce cas de la régulation de tension proprement dite), soit en charge (Il s'agit dans ce cas de la régulation de la puissance réactive) Notre étude se décompose en quatre chapitres.

Le premier chapitre consiste à présenter les concepts théoriques et pratiques liées aux fonctionnements et l'utilisation des machines synchrones. L'objectif de cette partie est d'illustrer les parties essentielles d'une machine synchrone (alternateur), son installation et conception dans différentes centrales électriques.

A travers le deuxième chapitre, Nous avons modélisé l'alternateur selon deux méthodes : Le modèle en abc, découlant des équations différentielles à coefficients périodiques régissant le fonctionnement de la machine et le modèle de la transformation de Park. Nous avons

modélisé l'alternateur selon deux méthodes : Le modèle en abc, découlant des équations différentielles à coefficients périodiques régissant le fonctionnement de la machine et le modèle de la transformation de Park.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation du système à régler ainsi les différentes étapes à suivre pour réaliser notre objectif qui est la régulation de tension alternateur par un correcteur PID classique, ou nous allons discuter les résultats obtenus. Ce mémoire va être clôturé par une conclusion générale.

Le dernier chapitre est consacré à Implémentation de logiciel de la commande de régulation sur logiciel de programmation TIA Portal et utilise la valeur de chapitre précédent pour faire la programmation. Et créé une interface Homme machine.

Chapitre 1

Description, Constitutionnelle et fonctionnelle de la machine synchrone

Chapitre 1 : Description, Constitutionnelle et fonctionnelle de la machine synchrone

1.1 Introduction

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le Rotor et le champ tournant statorique.

1.2 Définition de la machine synchrone

La machine synchrone est un système électrique permettant de convertir de l'énergie mécanique en énergie électrique « génératrice » et inversement « moteur ». Ce type de machine qui fournit l'énergie électrique appelée par le réseau de distribution dans les centrales électriques « on parle d'alternateur » [1]. Les alternateurs peuvent être :

- Polyphasés
- Monophasés

On distingue parmi les alternateurs :

- Les alternateurs Basse Tension (220-380 V) utilisés principalement pour groupes de secours.
- Les alternateurs Haute tension dont les valeurs des tensions sont fonction des puissances, utilisés dans les centrales électriques.

Néanmoins, on la rencontre peu dans les applications domestiques, car elle est plus coûteuse à fabriquer et moins robuste que la machine asynchrone [1].

1.2.1 Symboles électriques

Les symboles électriques utilisés pour représenter une machine synchrone sont représenté sur la (Figure 1.1)

MS : Machine synchrone

— : Courant continue



Figure 1. 1 : Symboles électrique d'une machine synchrone [2]

1.3 Constitution de la machine synchrone

Une machine tournante est constituée de deux parties essentielles :

- Le stator (partie fixe carcasse fixée) ;
- Le rotor qui est la partie mobile tournant à l'intérieur du stator.

L'espace séparant ces deux éléments est appelé entrefer. Il est généralement de l'ordre du millimètre.

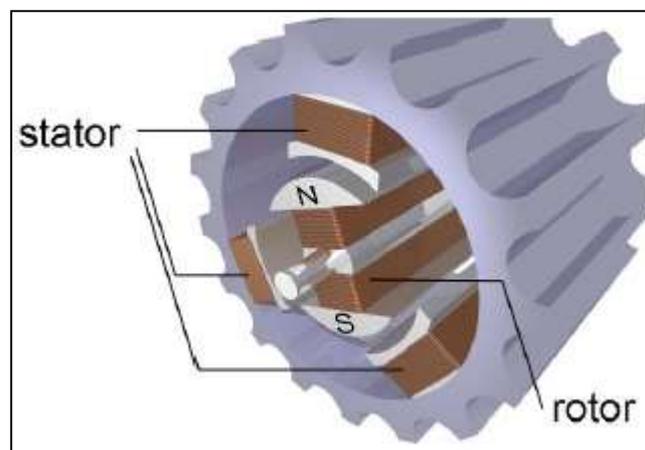


Figure 1. 2 : Constitution de la machine synchrone [18]

1.3.1 Stator

Le stator est habituellement l'induit (siège de la transformation de puissance). Le stator est constitué d'un bobinage triphasé généralement couplé en étoile, découpé en p paire de pôles. Les bobinages sont insérés dans des encoches au sein de culasse en ferrite [3].

Détails du stator :

- ✓ Les bobines sont placées dans des encoches.
- ✓ Ces bobines sont connectées entre elles pour former l'induit.

1.3.2 Rotor

De la même manière, l'inducteur est généralement le rotor. Suivant la technologie utilisée, le champ magnétique est créé par des bobinages ou des aimants permanents.

Lorsque que l'inducteur est bobiné, il est nécessaire de conserver des balais afin de l'alimenter (mais cette fois sans commutation) [3].

Il existe trois grandes familles de rotor, ayant pour rôle de générer le champ d'induction rotorique. Les rotors bobinés à pôles lisses, les rotors bobinés à pôles saillants ainsi que les rotors à aimants :

A) Rotors bobinés à pôles lisses

- ✓ Les pôles lisses sont utilisés pour les grandes vitesses (1500t/min, 3000t/min).
- ✓ Une pièce d'acier forgée est placée sur l'arbre avec des encoches fraisées et des barres de cuivre isolées comme conducteurs [4].
- ✓ Les encoches sont fermées par des cales pour maintenir les conducteurs [4].



Figure 1. 3: Rotors bobinés à pôles lisses [4]

Détail de rotor :

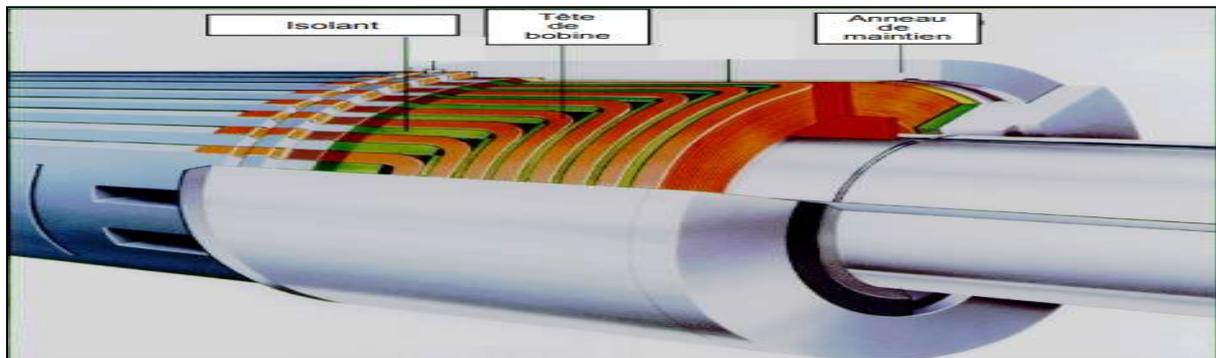


Figure 1. 4: Détails du rotor bobiné à pôles lisses [4]

B) Rotors bobinés à pôles saillants

- ✓ Les pôles sont solidaires de l'arbre.
- ✓ Chaque pôle possède un enroulement à courant continu connecté aux bagues.
- ✓ Une source continue alimente des balais qui frottent sur les bagues.
- ✓ Un ventilateur est monté sur l'arbre pour refroidir l'ensemble stator-rotor [4].

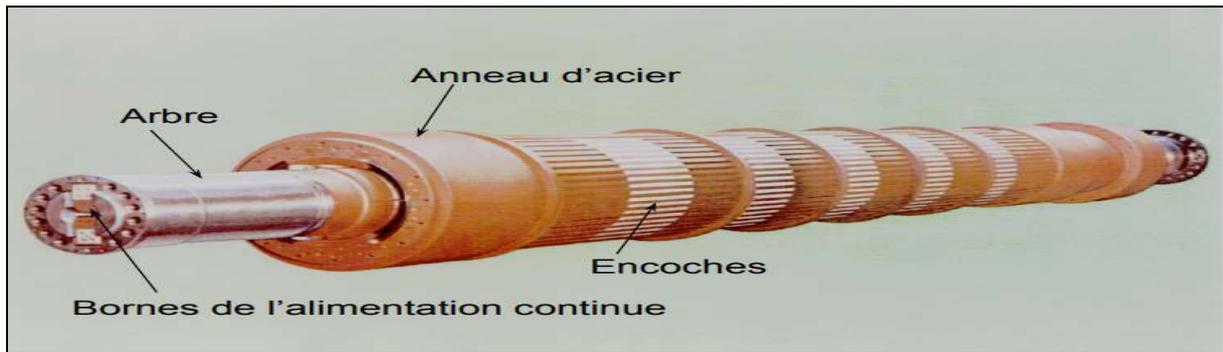


Figure 1. 5 : Rotors bobinés à pôles saillants [4]

C) Rotors à aimants

Ce sont des moteurs qui peuvent accepter des courants de surcharge importants pour démarrer rapidement. Associés à des variateurs de vitesse électronique, ils trouvent leur place dans certaines applications de motorisation d'ascenseurs lorsque l'on cherche une certaine compacité et une accélération rapide (immeuble de grande hauteur par exemple) [17].



Figure 1. 6: Rotors à aimants [19]

1.4 Différentes conceptions de la machine synchrone

Les fréquences de rotation des machines synchrones peuvent être très différentes, des constructeurs ont été amenés à envisager deux types de conceptions :

1.4.1 Première conception

La fréquence de rotation est faible. La machine synchrone est de type à pôles saillants.

La roue polaire d'un diamètre important, et constituer de feuilles de tôles épaisses découpées et assemblées pour faciliter la mise en œuvre. L'ensemble bobines et pôles est rapporté et assemblée « queues-d'aronde » sur la roue polaire. Les bobines raccordent en séries, produisent une succession alternée de pôles nord et sud (figure 1.7) [6].

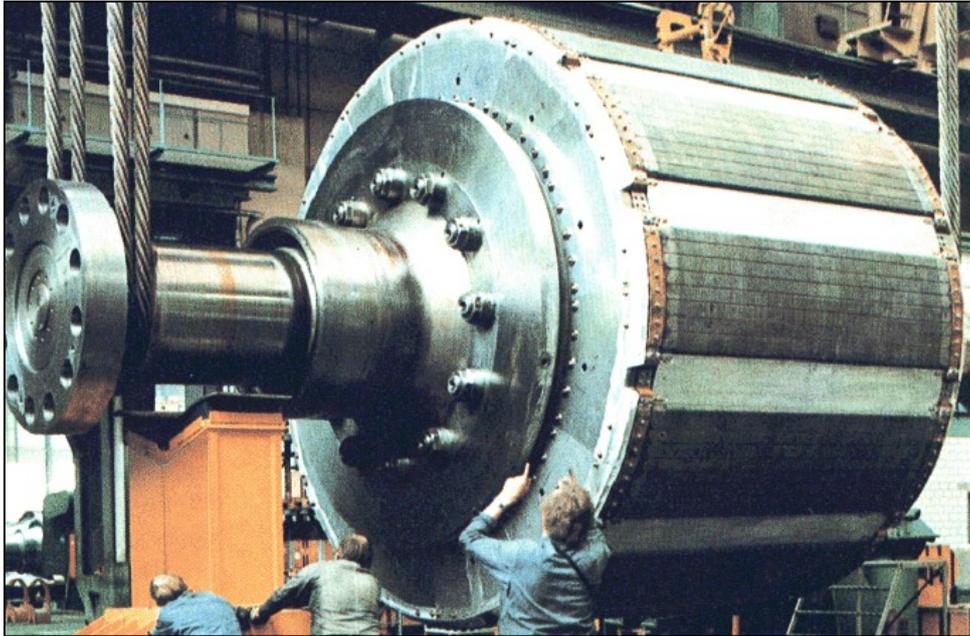


Figure 1. 7: Moteur synchrone à pôle saillant [7]

Les lignes de champs circulent d'un pôle à l'autre à travers le stator (figure 1.8) [1].

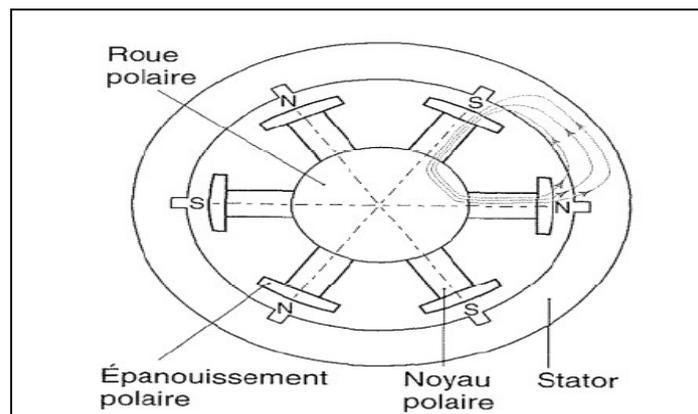


Figure 1. 8: Coupe transversale à pôle saillant [1]

L'ajustement entre le rotor et le stator (entrefer) doit être réalisé avec beaucoup de soin afin de limiter les pertes d'induction.

Ce type de machine équipe la plupart des centrales hydrodynamique, quelques groupes diesel sur les navires, des groupes de secours pour les grands magasins et administrations. Leurs puissances apparentes varient de 1000 kva à 250 Mva environ [1].

1.4.2 Deuxième conception

La fréquence de rotation est élevée. La machine synchrone est appelée « turboalternateur ». Elle est constituée d'un rotor à deux pôles lisses. C'est un cylindre massif où sont usinées les encoches qui reçoivent les conducteurs de l'inducteur son diamètre peut atteindre 1 à 1.5 m, sa longueur de 10 à 17m et son poids jusqu'à 200 t. L'inertie centrifuge mise en jeu est énorme et demande un solide frittage de conducteur de rotor. La fréquence de rotation est de 50 Hz (3000tr/min). Le stator est électriquement identique au précédent, seule sa forme

en diffère (faible diamètre, grande longueur). C'est la machine synchrone qui équipe toutes les centrales thermiques nucléaire et la plupart des centrales thermiques classiques. Grâce à l'amélioration de système de refroidissement des machines, leur puissance peut atteindre 1.5 Gva [1] (figure 1.9) [1].



Figure 1. 9 : Rotor d'une machine synchrone à pôle lisse [10]

1.5 Classification des machines synchrones

Le moteur synchrone est utilisé dans une large gamme de puissance allant de Watt au Méga Watt, dans les applications aussi diverses que le positionnement, la synchronisation, L'entraînement à vitesse constante et l'attraction. A ces nombreux domaines d'emplois, Correspondant autant de technologies différentes, dans les plus répandues peuvent être scindées en deux grandes familles [6] :

- Les moteurs synchrones à inducteur bobiné, à pôles saillant ou pôles lisses ;
- Les moteurs synchrones à aimant permanent, avec ou sans pièces polaires.

Le domaine d'utilisation privilégié des moteurs synchrones à inducteur bobiné pour les fortes puissances. Les machines à pôles lisses comportent deux ou quatre pôles, celles à pôles saillants en comportent au moins quatre. La technologie employer est essentiellement liée à la faisabilité même du rotor et à la vitesse de rotation [8].

Avec l'avènement des matériaux à aimants permanents de haute énergie et les progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, les machines synchrones à aimants permanents(MSAP) ont connu ces dernières années un grand essor. Elles ont été adoptées dans de nombreuses applications de hautes performances telles que la robotique, l'aérospatiale, les outils électriques, la production des sources d'énergie renouvelables, les divers équipements médicaux, les véhicules électriques, etc. Pour toutes ces applications, les MSAP sont parfois préférables aux autres machines traditionnelles, à titre d'illustration, quelques avantages et inconvénients des machines MSAP, sont cités ci-dessus [6] :

Avantages

- ✓ L'absence d'enroulement rotorique annule les pertes Joule au niveau du rotor.

- ✓ L'absence des collecteurs / balais et des bagues / balais simplifie la construction et l'entretien.
- ✓ La densité de flux, relativement élevée dans l'entrefer, assure une très bonne performance dynamique.
- ✓ Couples massique et volumique importants [9].

Inconvénients

- ✓ Cout élevé (à cause des prix des aimants) ;
- ✓ Problème de tenu en température des aimants (250°C pour les samarium-cobalt) ;
- ✓ Risque de démagnétisation irréversible des aimants par réaction d'induit ;
- ✓ Impossibilité de régler l'excitation.

1.6 Fonctionnement de la machine synchrone

Le moteur synchrone se compose, comme le moteur asynchrone, d'un stator et d'un rotor séparés par un entrefer. La seule différence se situe au niveau de la conception du rotor. La figure ci-dessous montre un rotor à pôles saillants constitués d'aimants permanents ou d'électro-aimants alimentés en courant continu [17].

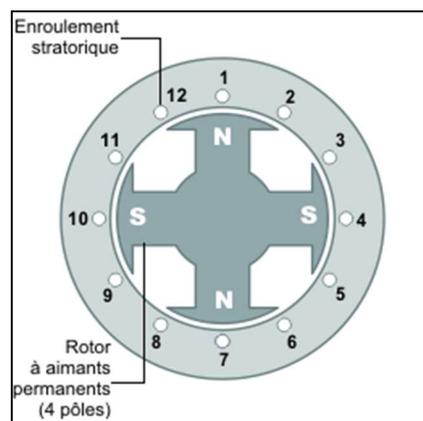


Figure 1. 10 : Rotor à pôles saillants constitués d'aimants permanents

Après le démarrage, le moteur tourne en synchronisme avec le champ tournant. A vide les axes des pôles du champ tournant et du rotor sont confondus. En charge, les axes sont légèrement décalés. La vitesse du moteur synchrone est constante quelle que soit la charge. On notera aussi que :

- ✓ La charge (le système d'ascenseur) ne doit pas dépasser l'effort de démarrage entre le rotor et le champ tournant.
- ✓ Le couple moteur est proportionnel à la tension à ses bornes.
- ✓ La machine synchrone est réversible, elle peut fonctionner aussi bien en moteur qu'en générateur. Fonctionnement en
- ✓ De même, elle peut être de type inductif ou capacitif selon l'excitation [17].

1.6.1 Fonctionnement en moteur

Le moteur synchrone convertit la puissance électrique en puissance mécanique. Pendant longtemps, ce moteur fût relativement peu utilisé en raison de sa difficulté à réguler sa vitesse. Ce problème est maintenant résolu grâce au progrès de l'électronique de puissance et des onduleurs qui lui sont associés. Le stator de la machine est alimenté en triphasé ; il se crée alors un champ magnétique tournant à la fréquence de rotation $n=f/p$, ce qui fait que le rotor de la machine tourne lui aussi à la fréquence de rotation n . Comme pour l'alternateur, on modélise une phase du moteur par les éléments E_{PN} , R , X et V [21].

Les courants alternatifs de fréquence f dans l'induit (stator) créent dans l'entrefer de la machine, un champ magnétique tournant à la vitesse n_s . Le rotor, siège d'un champ magnétique constant, suit le champ tournant à la même vitesse n_s . Le stator est alimenté en triphasé, créant un champ tournant. Les bobinages du rotor sont eux alimentés en courant continu, le rotor est donc aimanté. Le rotor tourne à la même vitesse que $s.\Omega = \Omega$ celle du champ tournant, c'est à dire que dans un moteur synchrone, pour inverser le sens de rotation du rotor, il suffit d'inverser deux phases du bobinage triphasé. Les deux champs (l'un créé par l'aimant en U, l'autre créé par le petit aimant) tournent à la même vitesse. Cependant, le décalage entre ces deux champs tournants varie en fonction de la charge du moteur. Le couple développé par la machine synchrone résulte ainsi directement de l'interaction entre ces deux champs [20].

A) Modèle d'une phase d'un moteur synchrone :

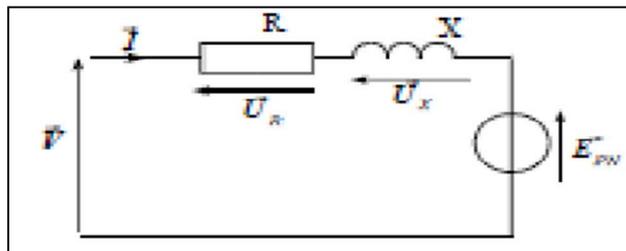


Figure 1. 11 : Circuit d'une machine synchrone [21]

La relation entre les différentes tensions est :

$$\vec{V} = \vec{U}_R + \vec{U}_X + \vec{E}_{PN} \quad (1.1)$$

Avec :

$$\vec{U}_R \begin{cases} U_r = R \cdot I \\ \varphi = (\vec{I}, \vec{U}_R) = 0 \end{cases} \quad (1.2)$$

Et :

$$\vec{U}_X \begin{cases} U_X = X \cdot I = L_\omega \cdot I \\ \varphi = (\vec{I}, \vec{X}_R) = 90^\circ \end{cases} \quad (1.3)$$

B) Rendement d'un moteur synchrone

La puissance fournie est électrique.

Le rendement d'un moteur synchrone est [21]:

$$\eta = \frac{T_U \cdot \Omega}{U \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi} \quad (1.4)$$

1.6.2 Fonctionnement en alternateur

Un alternateur est un générateur triphasé dont le courant est redressé puis filtré pour générer un courant continu. A chaque rotation du rotor trois tensions alternatives déphasées de 120° sont créées. Ces trois tensions sont ensuite couplées via un pont de diodes pour récupérer les alternances positive et négative en tension positive. Le schéma ci-dessous décrit les différentes phases de redressement de ces trois tensions :

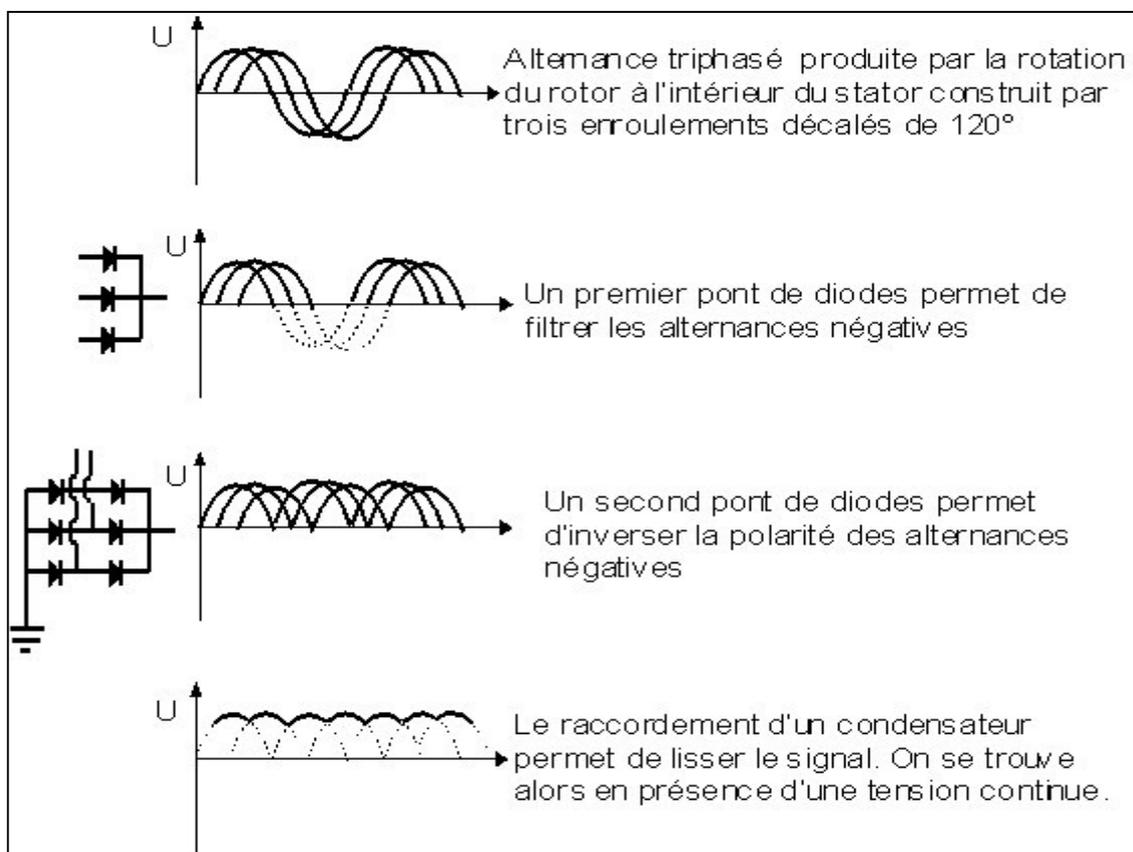


Figure 1. 12: Phases de redressement [22]

La puissance du signal est fonction du courant d'excitation et de la vitesse de rotation du rotor.

Pour fonctionner en alternateur, l'inducteur (rotor) doit être entraîné mécaniquement en rotation. L'enroulement induit (stator) est alors le siège d'une f.e.m induite quasi sinusoïdale [21].

$$e(t) = E \sin(\omega t - \varphi) \quad (1.5)$$

Cette f.e.m est due à :

$$e(t) = -N_s \frac{d\phi_r}{dt} \tag{1.6}$$

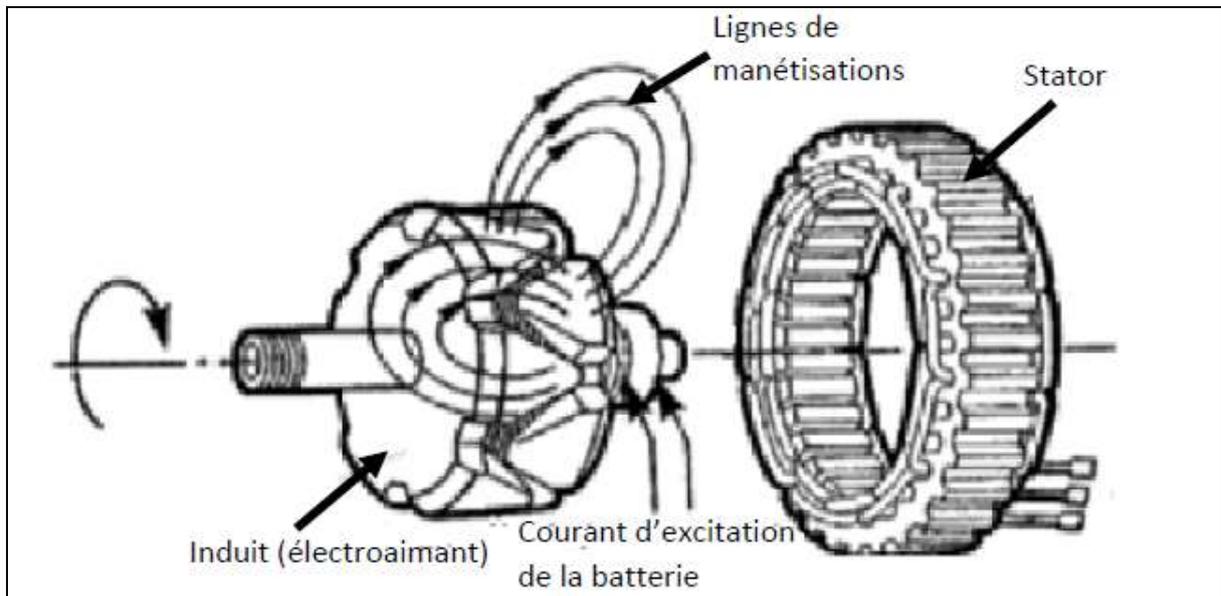


Figure 1. 13 : Principe de la production de courant dans l'alternateur [22]

A) Modèle électrique équivalent

Pour étudier l'alternateur triphasé, on modélise l'une de ses phases par une f.e.m. E_{PN} en série avec une résistance R et une réactance synchrone $X = L\omega$.

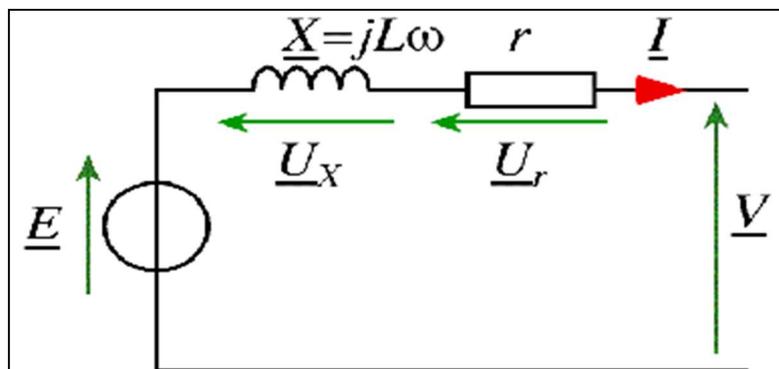


Figure 1. 14 : Circuit d'une machine synchrone [21]

E_{PN} : f.e.m induite à vide ;

I : courant de ligne ;

V : tension entre phase et neutre ;

r : résistance d'un enroulement statorique (couplage Y) ;

$X = L\omega$: réactance *synchrone* d'un enroulement statorique.

• **Remarque**

X est proportionnelle à la vitesse de rotation. Elle tient compte de la réactance réelle de l'enroulement et de la réaction magnétique d'induit.

En pratique $X \gg r$.

B) Représentation vectorielle (diagramme de Behn-Eschenburg)

C'est la représentation vectorielle des grandeurs électriques.

Loi des mailles avec les grandeurs complexes :

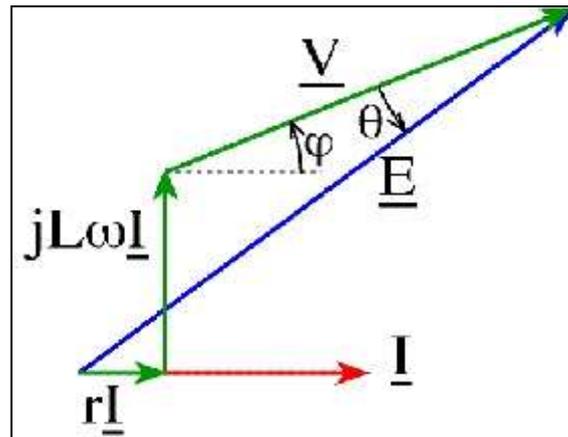


Figure 1.15 : Représentation vectorielle diagramme de Behn-Eschenburg [21]

Il peut être utile de connaître deux angles :

- Le déphasage φ entre le courant et la tension (φ et I) varient en fonction de la consommation.
- Le décalage interne θ entre V et E .

Remarque

Le diagramme ci-dessus est en fait le plus simple pour une machine à pôles lisses et non saturée.

On sait l'équation (1.6).

D'où :

$$\vec{E} \perp \vec{B}_r$$

De même :

$$\vec{B}_s \parallel \vec{I}_s$$

Puisque $B_s = \alpha I_s$.

Ce qui nous permet de faire la représentation suivante :

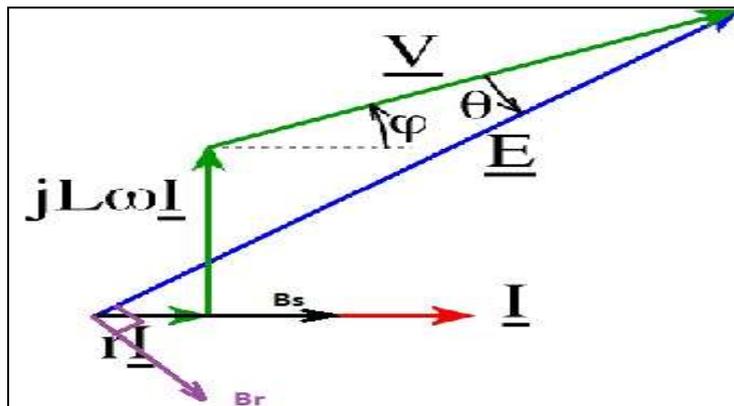


Figure 1. 16 : Diagramme d'une machine à pôles lisses et non saturée [21]

C) Création de forces électromotrices triphasées

La conversion électromécanique s'opère par interaction entre un champ magnétique inducteur et des conducteurs, aux bornes desquels apparaît une force électromotrice induite. En effet, si l'on place une bobine de N spires dans un flux variable, elle est le siège d'une force électromotrice $(t) = - N \cdot d\varphi(t)/dt$. Si le bobinage du stator est triphasé, on obtient trois forces électromotrices induites déphasées l'une par rapport à l'autre d'un angle $2\pi/3$, si le flux magnétique est sinusoïdal, la force électromotrice l'est aussi. Elle a comme valeur efficace [23] [11] :

$$E = K_b \cdot N_c \cdot f \cdot \varphi \quad (1.7)$$

K_b : Facteur de bobinage ;

N_c : Nombre des conducteurs par phase ;

f : Fréquence en Hz ;

φ : Flux utile par pôle.

D) Fonctionnement à vide

En marche à vide, le courant statorique d'un alternateur est nul. La figure I.18 représente le schéma d'un alternateur triphasé. L'arbre de la machine représenté entrants interrompus est accouplé à un moteur qui l'entraîne en rotation avec une vitesse constante n_0 . L'intensité du courant d'excitation I_{ext} alimentant le circuit de rotor depuis une source extérieure à courant continu peut être réglée dans les limites de zéro à une certaine valeur maximale. Cela permet de faire varier le flux magnétique inducteur dans la large limite, c'est-à-dire d'obtenir les valeurs différentes de la F.E.M du stator, parce que cette F.E.M est proportionnelle au flux magnétique du rotor, cherchons la variation de la F.E.M en fonction du courant d'excitation en marche à vide lorsque le circuit du stator est ouvert [23] [24]. On donne aux épanouissements polaires du rotor une forme telle que la répartition du flux magnétique suit la circonférence du stator de la machine soit aussi voisine que possible d'une répartition sinusoïdale [23].

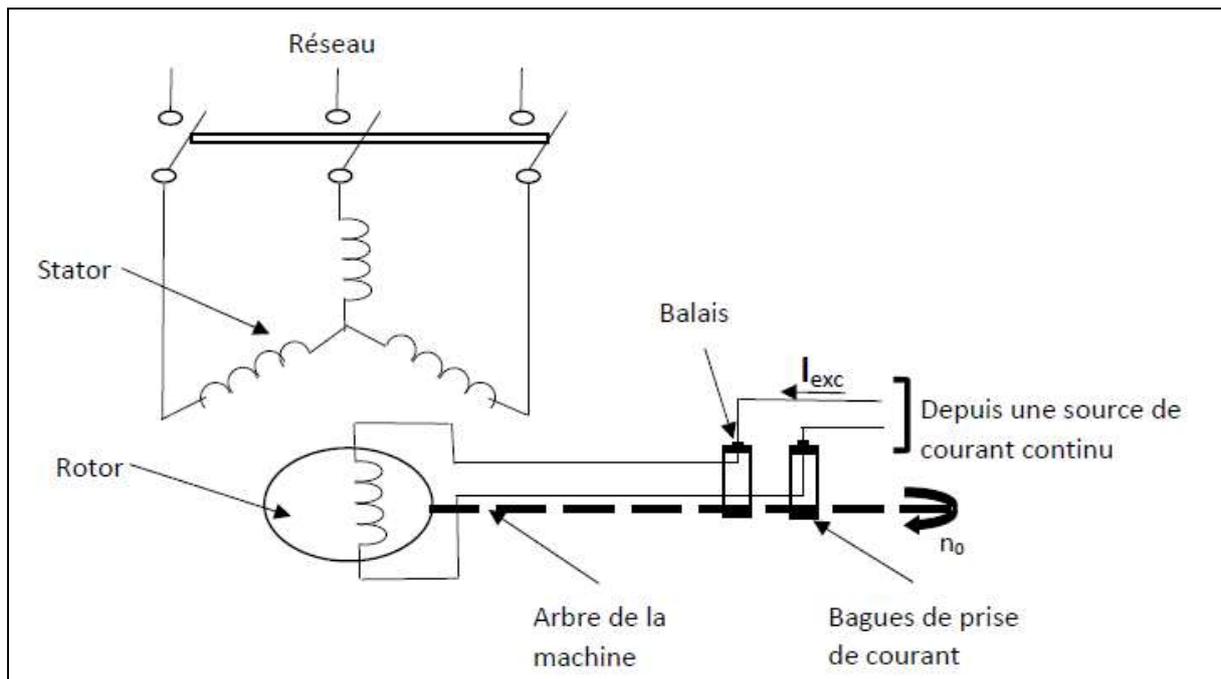


Figure 1. 17: Schéma d'un alternateur synchrone [23]

E) Fonctionnement en charge

Lorsque des courants triphasés équilibrés parcourent l'induit, ils engendrent (théorème de Ferraris) une induction tournante à p paires de pôles, dont la vitesse N_s est égale à celle du rotor [25] [11].

On aura donc simultanément dans une machine synchrone deux inductions tournantes, à la vitesse N_s :

- ✓ L'induction B_R créée par l'inducteur tournant ;
- ✓ L'induction B_s engendrée par le stator. Le décalage angulaire entre ces deux inductions dépend du déphasage entre la F.é.m. induite E et le courant d'induit I dans une phase.

Si E et I sont déphasés de Ψ , le décalage, en angle électrique, de B_R et B_s est $(2\pi + \Psi)$.

En effet, nous avons vu que l'induction B_s était dans l'axe d'une bobine quand le courant y était maximum alors que la f.é.m. était maximale quand l'induction B_R était normale à l'axe.

Si la machine n'est pas saturée, on peut superposer les effets des deux inducteurs et l'étude est particulièrement simple [25] [11].

F) F.e.m efficace par enroulement statorique, à vide

Un enroulement à N conducteurs, soit $N/2$ spires. Soit Φ_0 le flux sous un pôle à travers une spire ($\Leftrightarrow \Phi = N\Phi_0/2$) [21].

L'alternateur fournit par enroulement la tension à vide suivante :

$$E = \omega\phi \rightarrow E_{eff} = \frac{2\pi f N}{\sqrt{2.2}} \phi_0 = 2,22 f N \phi_0 = K_{app} f N \phi_0 \quad (1.8)$$

En pratique le "coefficient de Kapp" K_{app} est propre à chaque type de machine et vaut entre 2,2 et 2,6.

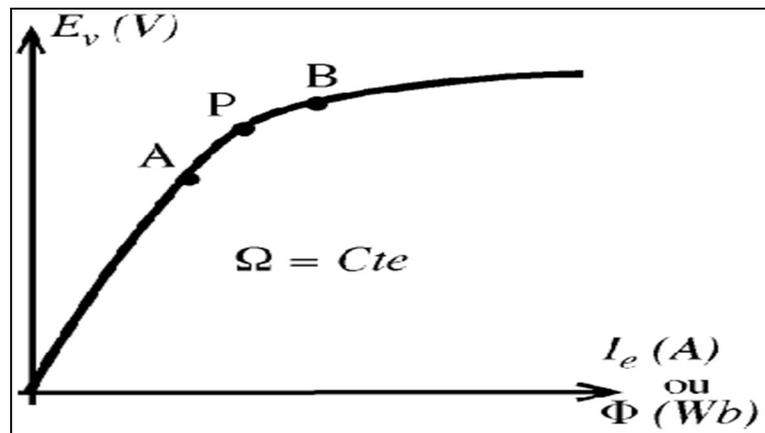


Figure 1. 18 : Courbe de la tension à vide fournit par l'enroulement d'alternateur

G) Fonctionnement dans un réseau électrique

- ✚ Dans un réseau interconnecté plusieurs centaines de générateurs fonctionnent en parallèle.
- ✚ Chaque générateur fonctionne à la même vitesse
- ✚ L'augmentation de la charge est obtenue par accroissement de la puissance d'entrée qui augmente l'angle interne d . La vitesse reste constante.
- ✚ L'angle interne doit être inférieur à 90° . La charge doit être de 20% à 30% inférieure à son maximum ($d = 90^\circ$).
- ✚ La puissance réactive est réglée à partir du courant inducteur qui fait varier la tension induite.
- ✚ Quand la tension induite est :
 - ✓ Plus grande que la tension du réseau, le générateur produit de la puissance réactive (fonctionnement. Capacitif).
 - ✓ Plus faible que la tension du réseau, le générateur consomme de la puissance réactive (fonctionnement. Inductif).
- ✚ Le couple de démarrage d'un alternateur est nul, le rotor doit être entraîné par un dispositif mécanique (turbine,).
- ✚ L'interconnexion d'un alternateur au réseau est appelée synchronisation [4].

H) Synchronisation

- ✚ Les étapes sont :
 - ✓ Vérifier que la séquence des phases des 2 systèmes sont les mêmes.

- ✓ Ajuster la vitesse de la turbine pour que la tension induite du générateur et du réseau soit les mêmes.
- ✓ Ajuster la tension de sortie du générateur en agissant sur le courant inducteur (tolérance de l'ordre de 5% en plus ou en moins).
- ✓ Ajuster l'angle interne pour que les tensions du générateur et du réseau soient en phase.
- 📌 Les tensions entre les bornes du disjoncteur de couplage sont mesurées. Lorsque ces tensions sont faibles et que la différence de fréquence est faible également, il est possible de fermer ce disjoncteur.
- 📌 Dans le passé, des lampes étaient connectées aux bornes du disjoncteur de couplage pour détecter les différences d'amplitudes et de phases.
- 📌 Aujourd'hui, des circuits électroniques remplissent les mêmes fonctions de manière automatique pour assurer le couplage synchrone [4].

1.7 Couplage des Alternateurs

Nous réalisons bien une mise en parallèle. Il va de soi que nous devons respecter les grandeurs existantes du réseau comme la fréquence et la valeur de la tension. Il est illusoire de penser à modifier ces dernières. Pour ajuster la fréquence il nous suffira de jouer sur la vitesse du moteur d'entraînement et pour la tension il nous faudra jouer sur la valeur du courant d'excitation. Coupler un alternateur sur un réseau signifie simplement que l'on couple deux alternateurs ou plus en parallèle. En effet, comme le réseau est lui-même alimenté par un alternateur, dans une centrale, et que nous, nous envisageons également d'alimenter le réseau [11].

📌 Conditions de couplage

Pour coupler un alternateur sur un réseau ou même avec un autre alternateur, il faut vérifier les points suivants :

➤ **Même fréquence**

Nous avons vu dans la théorie de l'alternateur synchrone que la fréquence de la tension fournie par un alternateur synchrone dépendait du nombre de variation de flux en fonction du temps. Cette dernière est fonction de la vitesse du rotor donc de la vitesse du moteur d'entraînement. Nous devons donc régler la vitesse de rotation.

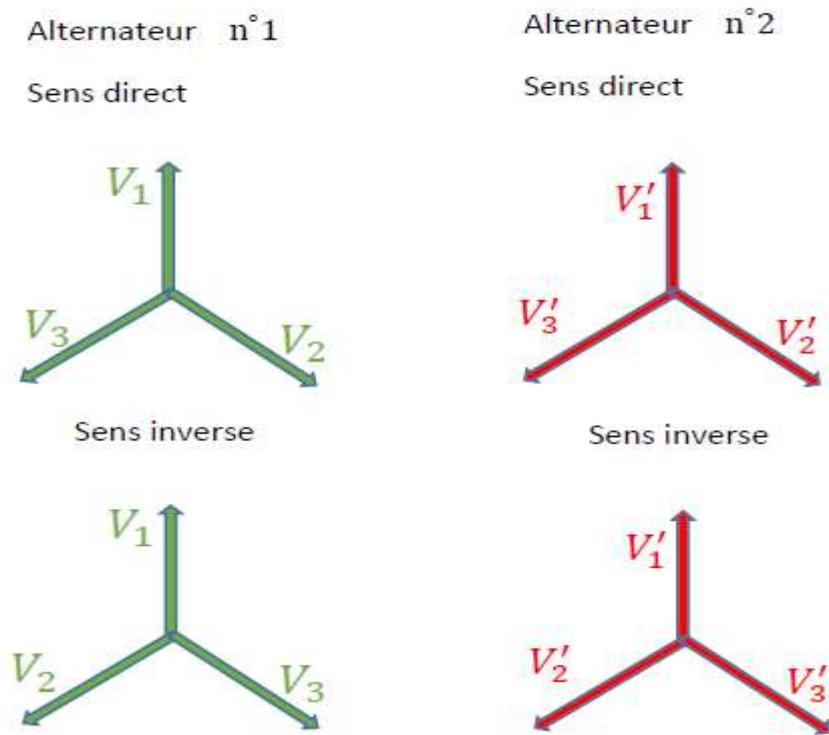
➤ **Même tension**

Nous savons que pour qu'un alternateur synchrone délivre une tension, nous devons impérativement vérifier deux choses, la présence d'un flux d'une part et une variation de ce flux d'autre part. Pour ce dernier point nous en avons parlé ci-dessus. Pour ce qui est de la valeur du flux, nous savons qu'il est fonction du courant d'excitation. Le flux lui va induire les bobinages statoriques qui seront le siège de la

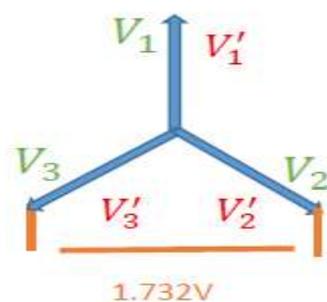
FEM. Comme la tension est aux chutes de tension près égale à la FEM, je peux dire que la tension sera réglée par ce même courant d'excitation.

➤ **Même succession des phases**

Soit les deux alternateurs représentés ci-dessous Il est simple de comprendre que si deux alternateurs possèdent la même fréquence et la même tension, que les vecteurs V_1 et V_1' sont identique et qu'ils tournent à la même vitesse. Le potentiel entre V_1 et V_1' est donc nul. Par contre, en fonction de l'ordre de succession des phases nous pourrions avoir des potentiels différents sur les autres phases. Voyons l'exemple suivant :



Il est simple de comprendre que si deux alternateurs possèdent la même fréquence et la même tension, que les vecteurs V_1 et V_1' sont identique et qu'ils tournent à la même vitesse. Le potentiel entre V_1 et V_1' est donc nul. Par contre, en fonction de l'ordre de succession des phases nous pourrions avoir des potentiels différents sur les autres phases. Voyons l'exemple suivant :



Dans cette configuration, on a remarqué que le potentiel entre V_2 et V_2' est maximum ce qui montre bien que dans de telle condition nous ne pourrions en aucun cas réaliser la mise en parallèle car nous aurons un flash au commutateur. Nous devons donc réaliser la succession des phases de telle sorte qu'en tout moment, V_1 soit sur V_1' , V_2 soit sur V_2' et V_3 soit sur V_3' . Cette mise en phase peut être réalisée soit en inversant le sens de rotation du moteur d'entraînement d'un des alternateurs soit en inversant deux phases sur l'un des alternateurs.

En pratique, la fréquence est vérifiée à l'aide d'un fréquencemètre et la tension à l'aide d'un voltmètre. La succession des phases est vérifiée à l'aide de feux lumineux.

Précisons encore que dans la pratique nous considérerons que le réseau de vecteurs de l'alternateur principal sera fixe et que c'est le réseau de vecteurs de l'alternateur à accoupler qui tourne. Nous pourrions réagir et dire que si les fréquences sont identiques, les réseaux ne devraient pas se mettre en rotation l'un par rapport à l'autre. Il ne faut pas oublier qu'en pratique il nous sera impossible de garantir une fréquence identique, rien que par le fait que la fréquence du réseau peut avoir une légère oscillation et que de plus les appareils de mesure que nous allons utiliser ont eux aussi leur précision [12].

1.8 Excitation des alternateurs

1.8.1 Introduction

Un générateur synchrone (alternateur) est constitué de la génératrice principale (GP) et d'un système d'excitation (voir figure 1.19). Ce dernier est composé de la structure d'excitation nécessaire pour l'alimentation de l'inducteur de la GP et du régulateur de tension. Une source de puissance est toujours nécessaire pour l'alimentation de la structure d'excitation [26].

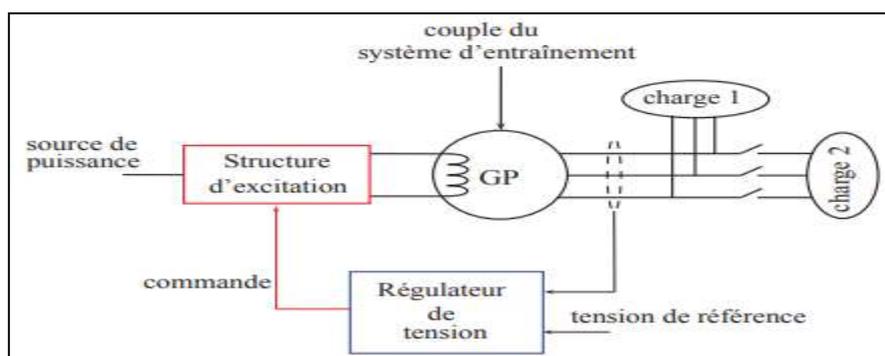


Figure 1. 19 : Système d'excitation d'un générateur synchrone [26]

Pour générer le champ magnétique nécessaire dans les alternateurs on utilise des aimants permanents ou électroaimants. Ces derniers ont besoin d'un courant continu pour générer un champ qui ne varie pas dans le temps. Ce courant peut être fourni par différents systèmes d'excitations. Le rôle du système d'excitation est d'alimenter le rotor de l'alternateur avec un courant continu permettant de magnétiser la machine [12].

1.8.2 Éléments d'un système d'excitation

Le schéma ci-dessous (Figure 1.20) représente les différentes parties et les éléments d'un système d'excitation appliqué pour les génératrices synchrones [26].

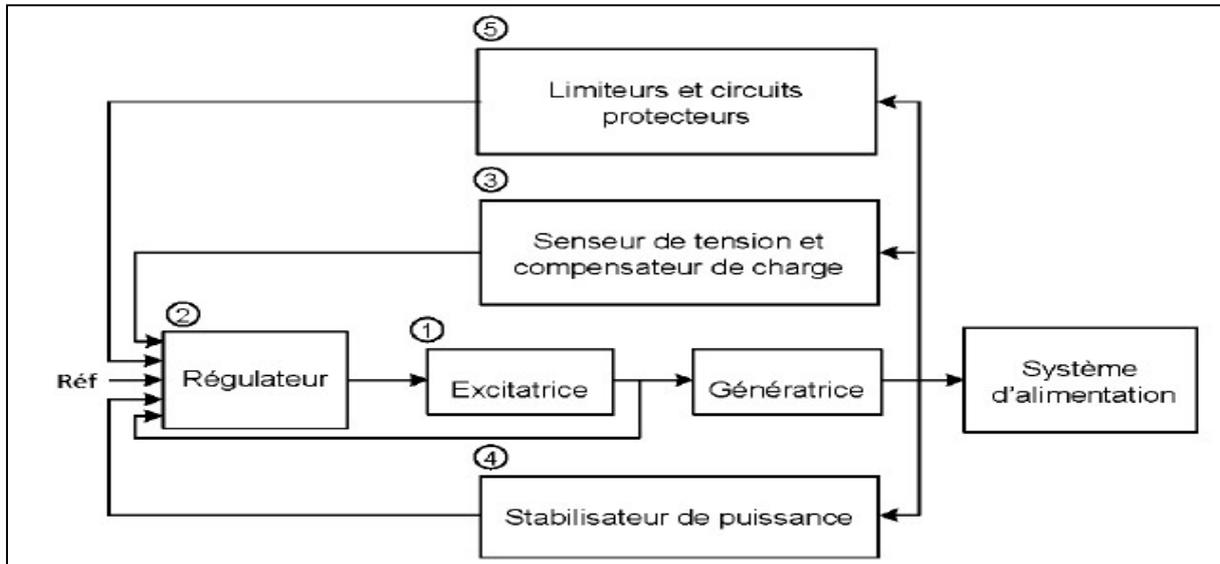


Figure 1. 20 : Schéma fonctionnel du système d'excitation d'une génératrice synchrone [26]

- ✚ • **(1) L'excitatrice** : fournit la puissance aux bobines qui créent le champ au rotor. Typiquement, un générateur d'une puissance de 600MW nécessite une excitatrice d'environ 1MW.
- ✚ • **(2) Le régulateur** : permet de contrôler et stabiliser le signal d'entrée de l'excitatrice.
- ✚ • **(3) Le senseur de tension** : mesure la tension aux bornes de la machine, le filtre et la redresse en une valeur continue. Ensuite, cette mesure est comparée à la référence (tension voulue aux bornes de la machine).
 - *Le compensateur de charge* : est un élément additionnel et facultatif qui permet de conserver une tension constante en un point particulier distant des bornes de la machine.
- ✚ • **(4) Le stabilisateur de puissance (PSS)** : il fournit un signal d'entrée additionnel au régulateur du système d'excitation afin d'amortir les oscillations de puissance à basse fréquence du réseau électrique.
- ✚ • **(5) Les limiteurs et les circuits protecteurs** : sont toute une gamme de moyens qui s'assurent que les limites du circuit d'excitation et du générateur ne sont pas outrepassées. Par exemple, limitation du courant d'excitation, limiteur de surexcitation, limiteur de tension et limiteur de sous-excitation [26].

Dépendamment de la source d'alimentation, les systèmes d'excitation pour les génératrices synchrones se distinguent selon les types essentiels [26].

 - Système d'excitation à courant continu (DC)
 - Système d'excitation à courant alternatif (AC)

➤ Système d'excitation statique.

A) Système d'excitation à courant continu (DC)

Cette catégorie d'excitation utilise une machine à courant continu comme source d'excitation, fournissant le courant au niveau du rotor de la génératrice synchrone à travers des bagues collectrices. La machine à courant continu est entraînée par un moteur de l'arbre de la génératrice et peut soit auto excitée soit excitée séparément [26].

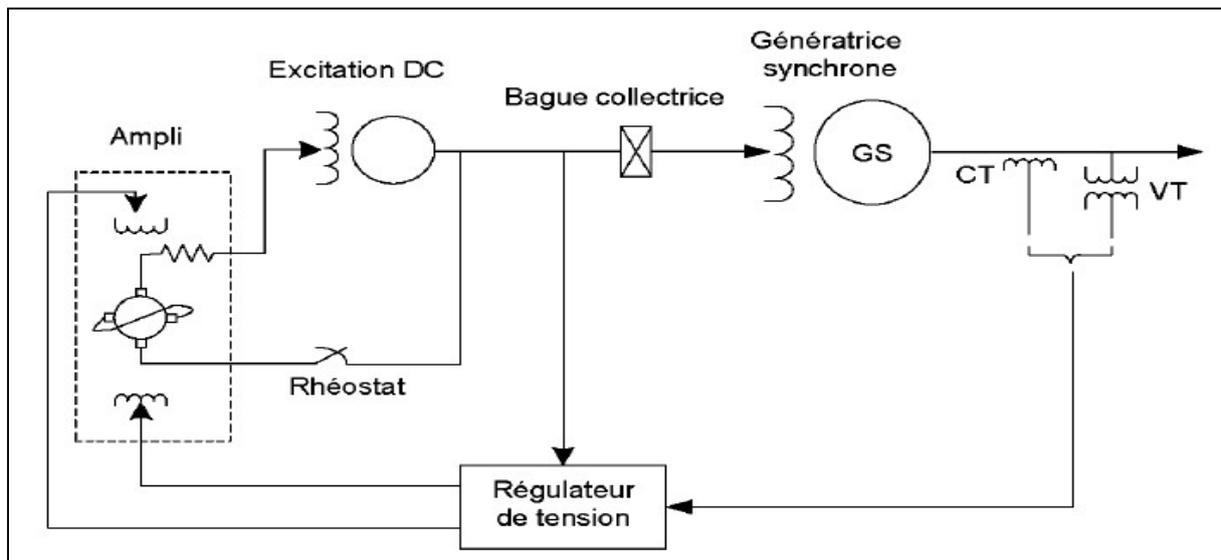


Figure 1. 21 : Système d'excitation de type DC [26]

B) Système d'excitation à courant alternatif (AC)

L'excitatrice à courant alternatif utilise un alternateur associé à un redresseur stationnaire ou tournant pour produire le courant de champ excitant de la machine synchrone le redresseur utilisé peut aussi être soit commandé ou non. Dans le cas d'un redresseur non commandé, le réglage s'effectue sur les enroulements de champ au niveau de l'excitation.

Les Figures 1.22 et 1.23 montrent l'excitatrice de type AC muni d'un redresseur stationnaire non commandé et commandé respectivement [26].

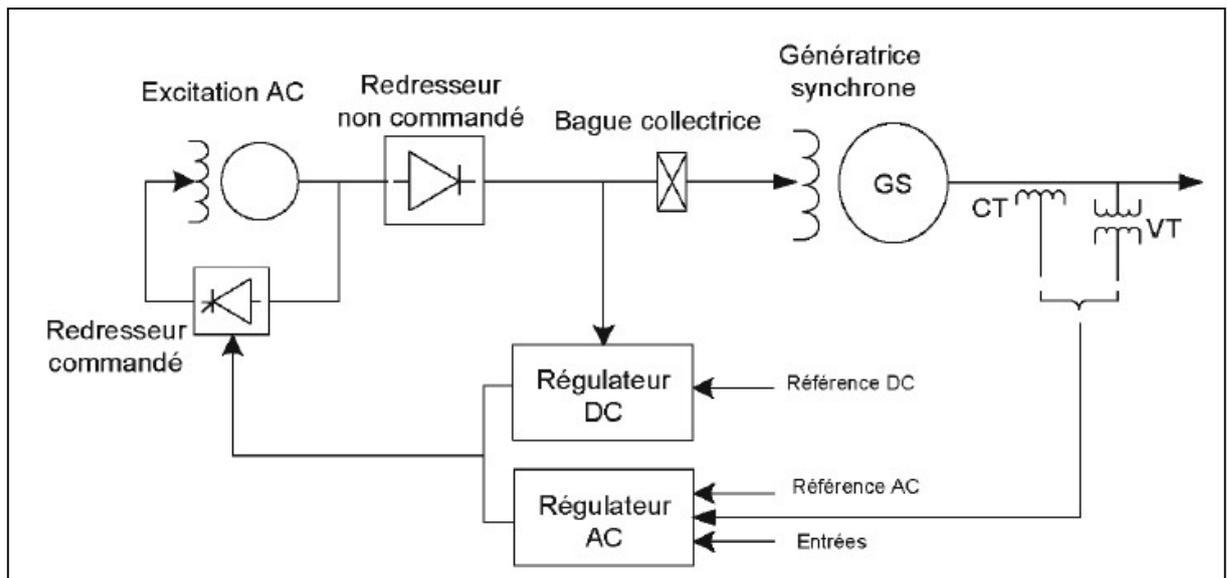


Figure 1. 22 : Excitation de type AC avec redresseur non commandé [26]

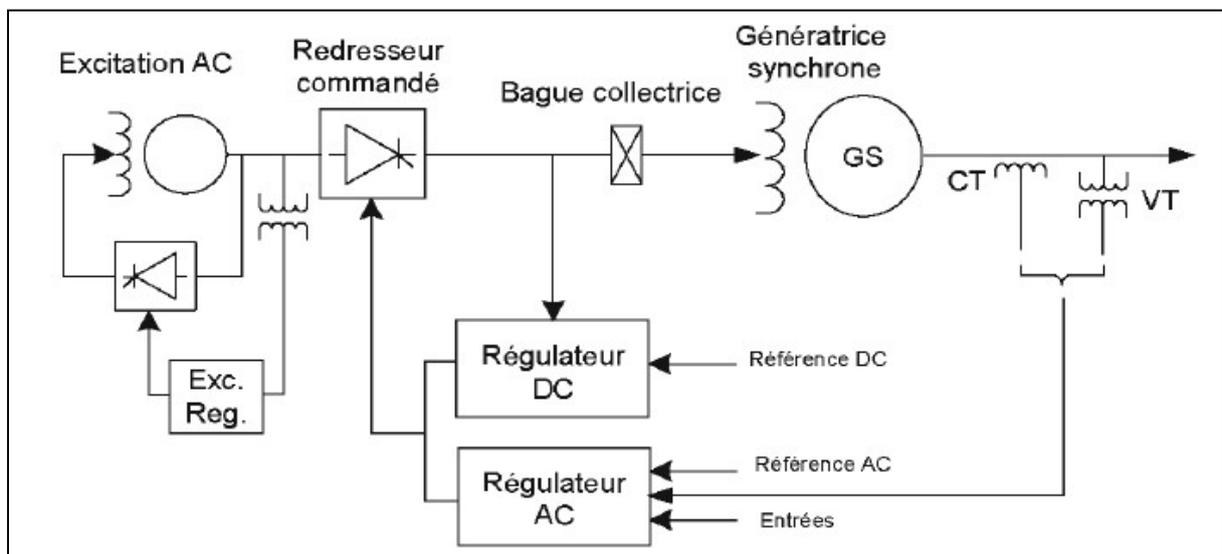


Figure 1. 23 : Excitation de type AC avec redresseur commandé [26]

Dans le cas de l'excitation à courant alternatif avec redresseur tournant, les bagues collectrices sont éliminées et la sortie du redresseur à diodes est directement reliée à la machine synchrone. La Figure 1.24 illustre l'excitation AC de type Brushless où l'on observe la structure tournante composée de l'excitatrice principale AC et du redresseur à diodes, tel que la sortie du redresseur de l'excitatrice pilote active le champ à la structure tournante [26].

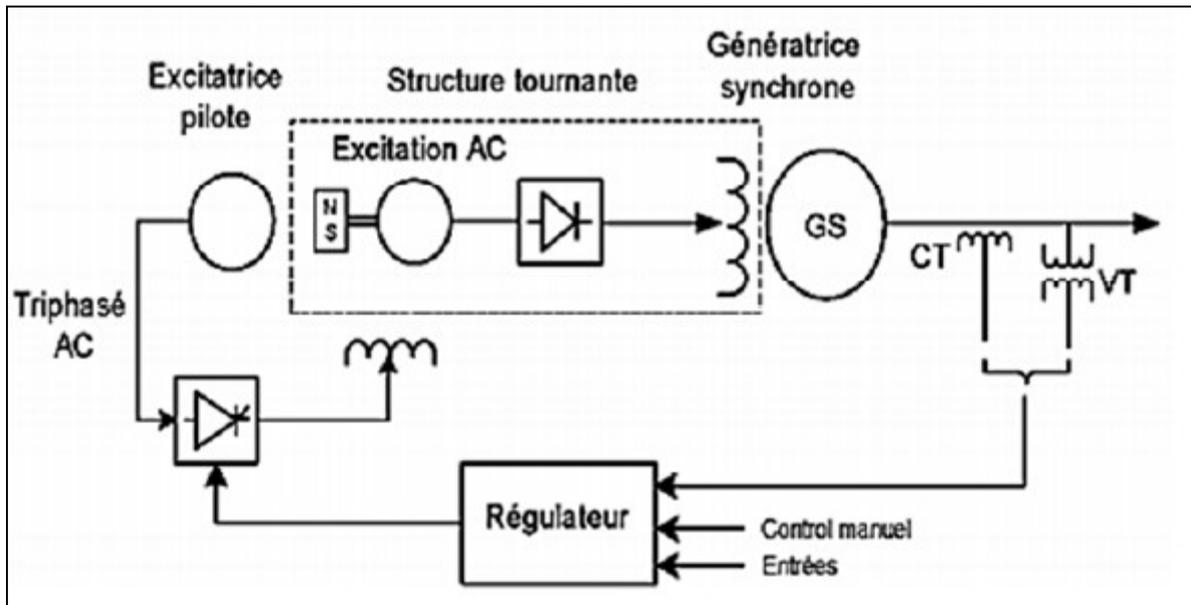


Figure I. 24 : Excitation AC de type Brushles [26]

C) Système d'excitation statique

Dans ce type de système d'excitation, tous les composants sont statiques ou stationnaires. Le redresseur statique fournit le courant d'excitation de la génératrice synchrone à travers des bagues collectrices, et celui-ci est alimenté par la génératrice synchrone à travers un transformateur d'excitation. Cependant il existe trois types d'excitation statique [26] :

- A) Avec redresseur commandé à source de tension ;
- B) Avec redresseur non commandé à source combinée ;
- C) Avec redresseur commandé à source combinée.

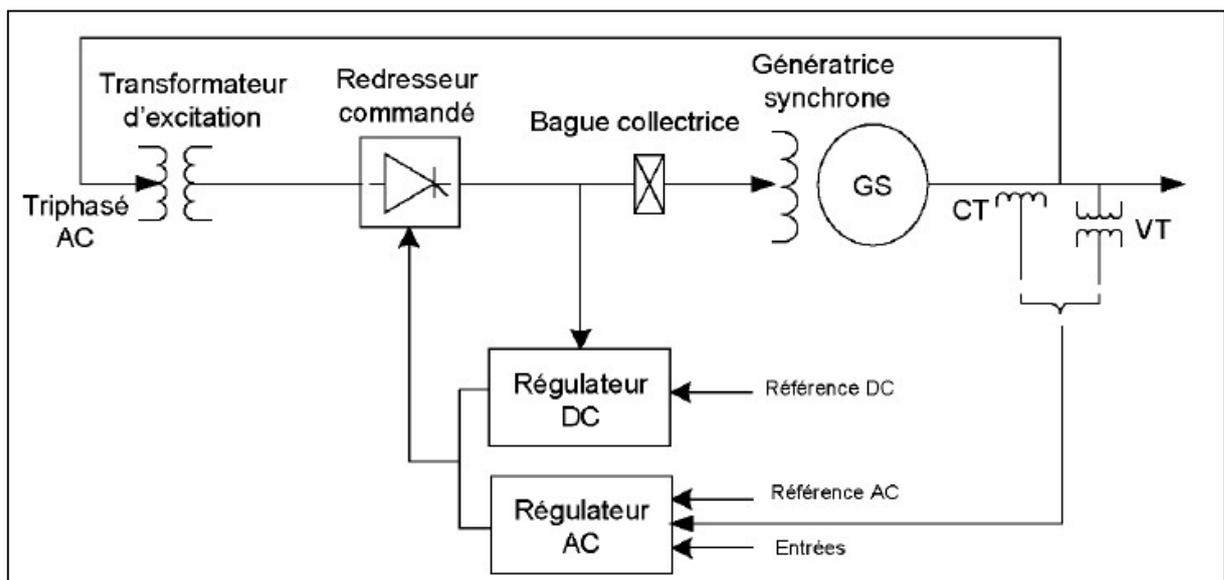


Figure I. 25 : Excitatrice statique par redresseur commandé à source de tension [26]

L'excitatrice statique par redresseur commandé à source de tension (Figure 1.25) est la plus utilisée des trois, voici énumérés quelques-unes de ses caractéristiques :

- ✓ Pas de partie tournante à part la machine.
- ✓ Utilisation d'un générateur de tension aux bornes, d'un autotransformateur d'excitation et d'un pont de thyristor pour le redressement de la tension AC d'entrée.
- ✓ Possibilité d'utilisation de plusieurs types de correcteurs et régulateurs (PI, PID, Flous, ... etc.).
- ✓ Moins coûteuse et facile à entretenir.
- ✓ Plus adaptée pour les petites centrales hydroélectriques [26].

1.9 Différents types des centrales électriques

L'électricité peut être produite par de nombreux types d'installations, On peut distinguer quatre types de centrales de production d'électricité : thermiques, hydroélectriques, nucléaires et éolienne. La centrale électrique est un bâtiment industriel qui produit de l'électricité. Cependant, en fonction du type de centrale, l'électricité n'est pas générée de la même manière. Les centrales électriques transforment différentes sources d'énergie naturellement énergie électrique C'est principalement grâce à elle que les consommateurs, les particuliers et les entreprises, peuvent bénéficier d'un réseau électrique [13].

Le type de turbine définit alors le type de la centrale électrique :

- Une turbine à vapeur, dans une centrale thermique (à combustible fossile ou nucléaire)
- Une turbine à combustion (communément, mais improprement appelée turbine à gaz), dans une centrale thermique ;
- Une turbine hydraulique, dans une centrale hydroélectrique ou un central marémoteur.
- Une éolienne est aussi une sorte de turbine. Ainsi en trouve des différents types des turbo-alternateurs [13].

1.9.1 Centrales thermiques

Les centrales à flamme comprennent :

- Les centrales conventionnelles dans lesquelles un combustible fossile (charbon, fioul, gaz naturel...) ou autre (biomasse) est brûlé dans une chaudière pour produire la vapeur surchauffée alimentant la turbine :
- Les centrales à turbine à combustion, à simple cycle, brûlant généralement du gaz, parfois du fioul (léger ou lourd réchauffé) ;
- Les centrales à cycle combiné, brûlant les mêmes combustibles que dans un simple cycle, mais avec un bien meilleur rendement grâce à l'adjonction d'une chaudière de récupération et d'une turbine à vapeur.
- Les centrales à moteur Diesel ou moteur à gaz [12].

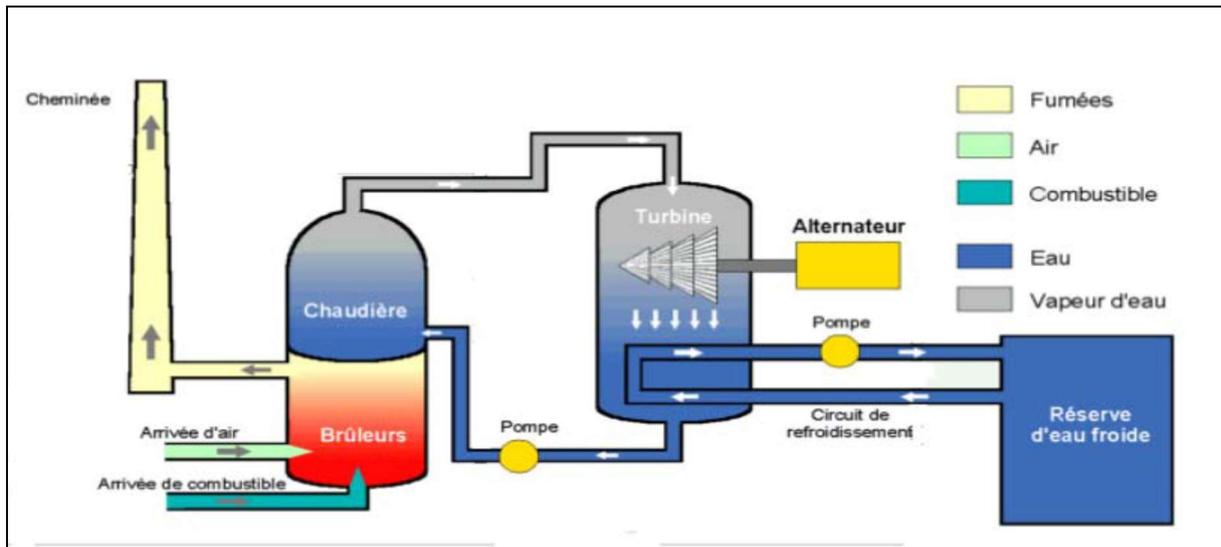


Figure I. 26 : Schéma d'une centrale thermique à flamme [14]

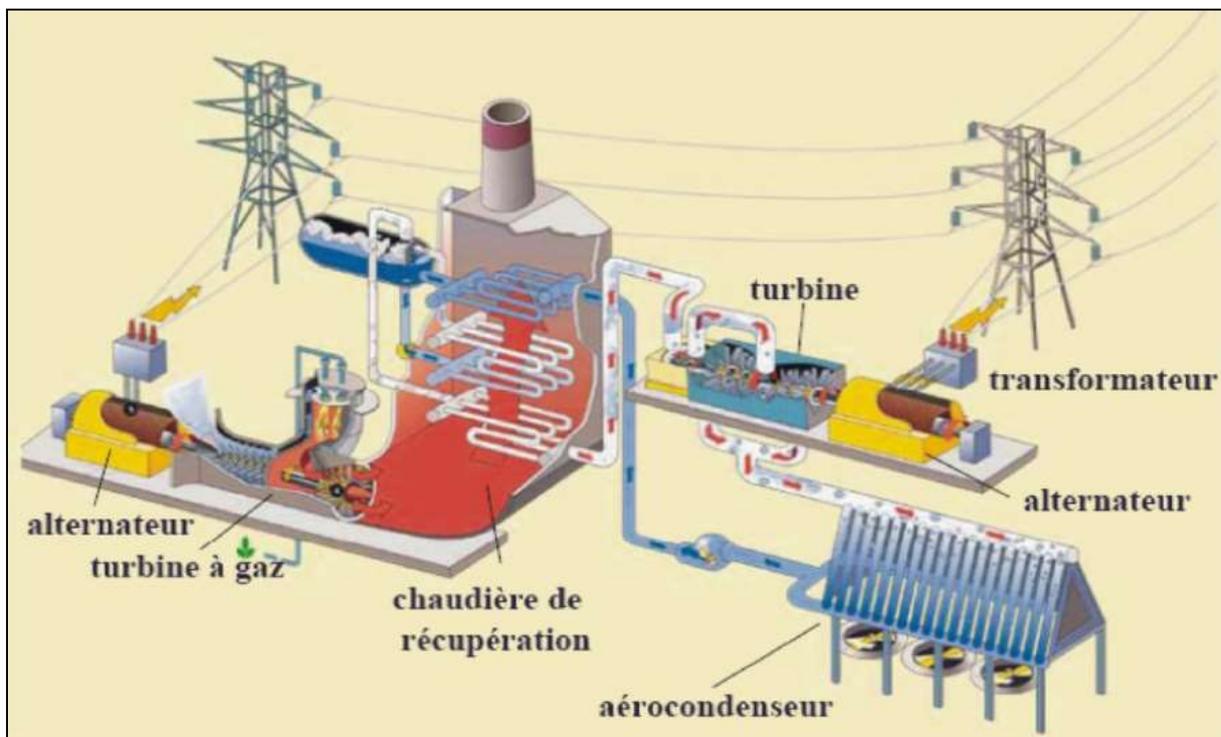


Figure 1. 27 : Schéma d'une centrale à combustion fossile [27]

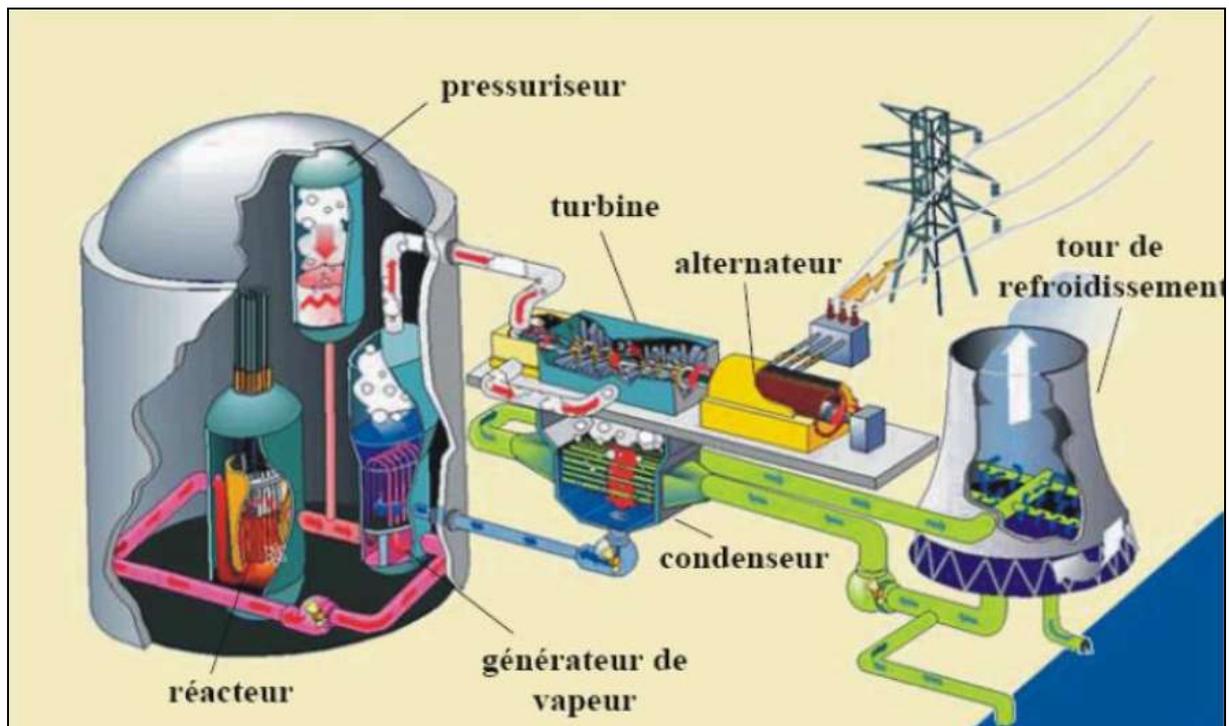


Figure 1. 28 : Schéma d'une centrale à fission nucléaire [27]

1.9.2 Centrale Hydraulique

Les centrales hydroélectriques gravitaires fonctionnent à partir d'eaux dont le mouvement est entraîné par la gravité (chutes d'eau, cours d'eau). Ce sont les centrales hydroélectriques les plus nombreuses. Un barrage peut être construit pour maximiser la production d'électricité en créant une importante retenue d'eau en amont de la turbine. Plus le volume d'eau retenu est important et plus la hauteur de la chute est importante, et plus le barrage est susceptible de produire d'électricité [15].

Les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) sont des centrales hydroélectriques particulières, permettant une forme intéressante de stockage de l'énergie. Lorsque la demande d'électricité est faible et que les prix de l'électricité sont bas, les stations de transfert d'énergie par pompage sont consommatrices d'électricité. Pour pomper l'eau d'un bassin inférieur vers un bassin supérieur. En période de pic de consommation d'électricité, lorsque les prix de l'électricité sont élevés, la station de transfert d'énergie par pompage produit de l'électricité hydroélectrique en lâchant l'eau du bassin supérieur vers le bassin inférieur [16].

Enfin, les centrales hydroélectriques peuvent prendre la forme moins conventionnelle des usines marémotrices, capables de transformer en électricité les mouvements d'eaux liés aux marées (centrales marémotrices au sens strict), aux courants marins (hydroliennes) ou aux vagues (en surface) [13].

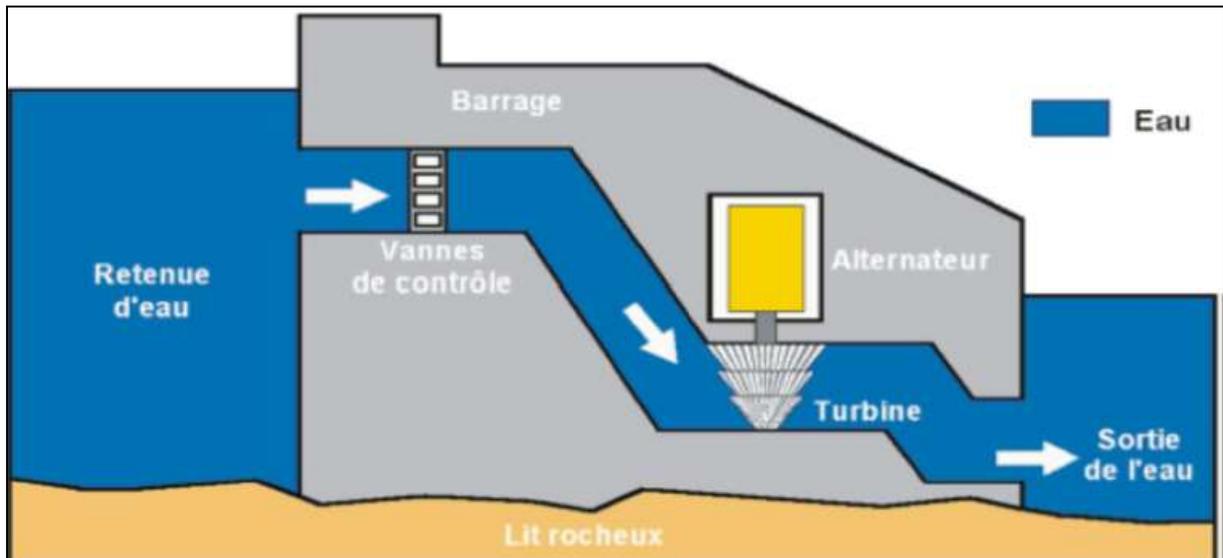


Figure I. 29 : Schéma d'une centrale hydraulique [27]

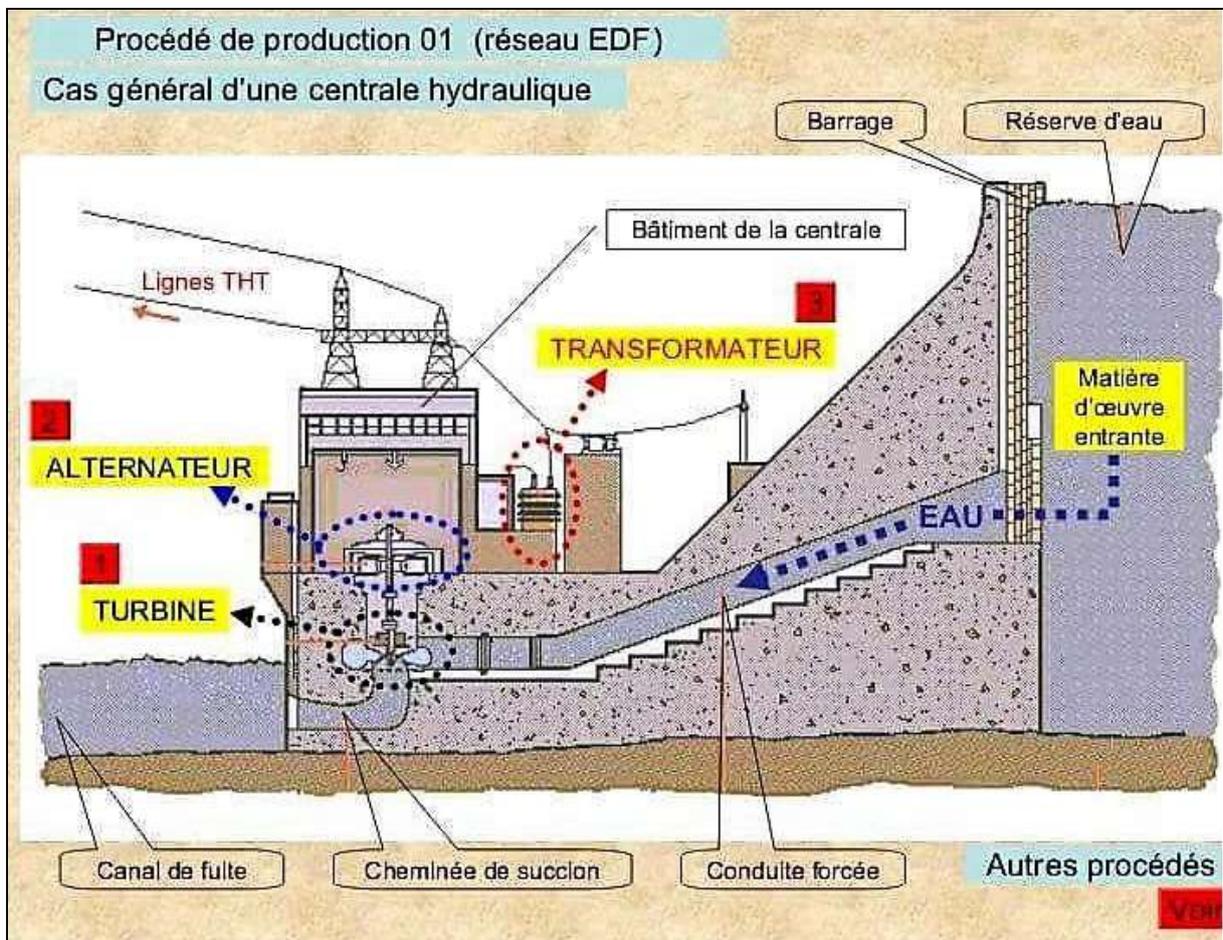


Figure 1. 30 : Schéma d'une centrale hydroélectrique [14]

1.9.3 Centrales à énergie renouvelable

Cette énergie provient de la nature de façon pseudo-aléatoire, tels que :

- 🏠 Le vent
- 🏠 Le soleil

 Les vagues de la mer

C'est une énergie inépuisable.

- Les centrales à énergie renouvelable
- La conversion de l'énergie due au vent est assurée par les éoliens.
- La conversion de l'énergie due au soleil est assurée par les plaques solaires photovoltaïques.
- La conversion de l'énergie des vagues, énergie marémotrice, en électricité est assurée par plusieurs inventions basées sur le mouvement dû au déplacement des vagues [27].

A) Eoliens

Une centrale éolienne est une centrale de production d'électricité grâce à l'énergie du vent. Le nom éolien vient du nom du dieu grec des vents, Eole. Une éolienne se compose d'un mat au sommet duquel est monté une hélice composée de pales qui actionnent une turbine en tournant. Un groupe d'éoliennes peut être appelé ferme éolienne ou centrale éolienne. L'éolien est une énergie propre comme le solaire, la géothermie, l'énergie marémotrice, l'énergie hydraulique ou la biomasse [11].

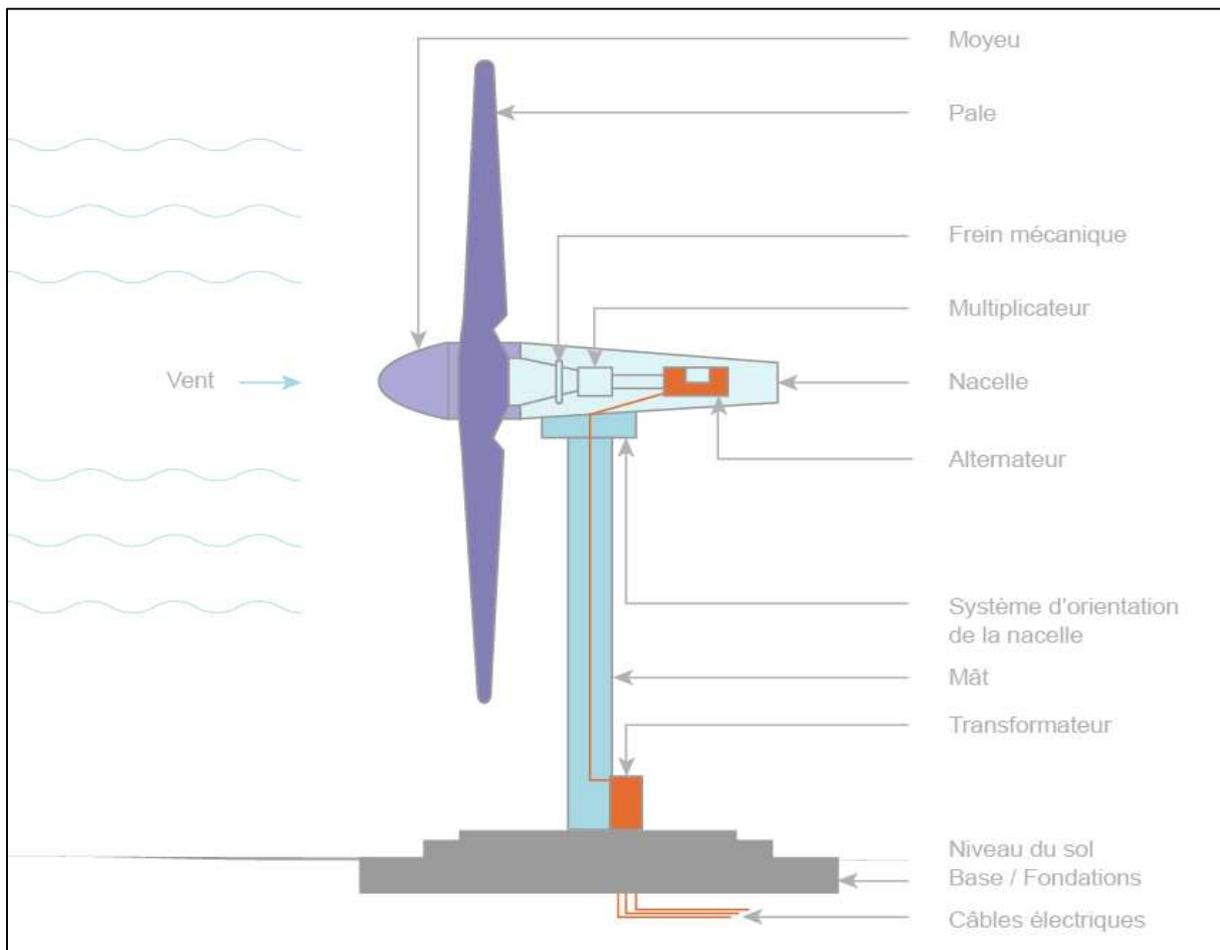


Figure 1. 31 : Schéma d'une centrale éolienne [28]

B) Générateurs marémoteurs

L'énergie marémotrice consiste à exploiter l'énergie issue des marées dans des zones littorales de fort marnage (différence de hauteur d'eau entre la marée haute et la marée basse se succédant). Le phénomène de marée est induit par l'effet gravitationnel sur l'océan de deux astres à proximité de notre planète : la Lune et le Soleil. Contrairement aux hydroliennes qui captent l'énergie cinétique des courants de marée, le principe d'une centrale marémotrice s'appuie sur une énergie potentielle : cette source d'énergie utilise le marnage pour produire de l'électricité en exploitant la différence de hauteur entre deux bassins séparés par un barrage. La centrale de la Rance en Bretagne a été la première grande centrale marémotrice dans le monde et longtemps la plus puissante avec une capacité installée de 240 MW [10].

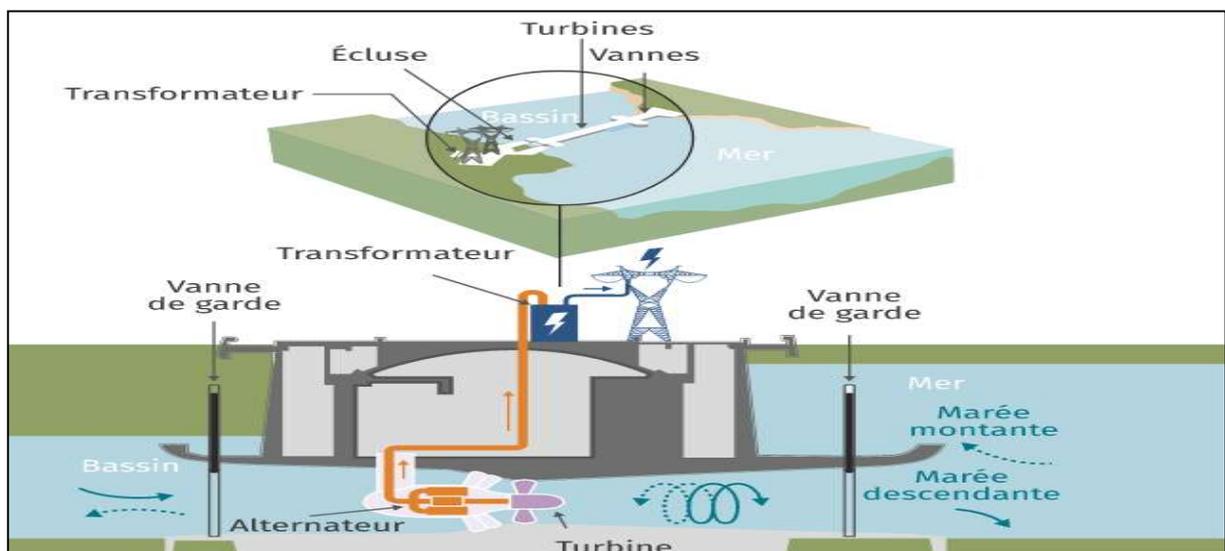


Figure I. 32 : Schéma d'une usine marémotrice [11]

1.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la description, Constitutionnelle et fonctionnelle de la machine synchrone. La machine synchrone (alternateur) est l'élément principal dans l'opération de production de l'énergie électrique qu'on utilise quotidiennement dans notre vie.

Nous avons traité en détail la constitution de la machine synchrone, son fonctionnement à vide et en charge, son excitation ainsi son couplage sur le réseau. Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation de la machine synchrone.

Chapitre 2

Modélisation de la machine synchrone

Chapitre 2 Modélisation de La machine synchrone

2.1 Introduction

La modélisation de la machine synchrone est la conception d'un modèle qui permet de décrire son fonctionnement statique et dynamique. Parmi les objectifs de la modélisation, on peut citer la compréhension, l'identification, la simulation, le diagnostic, la commande et la conception d'un prototype. L'objectif choisi et les hypothèses simplificatrices prises en compte ont une influence directe sur le choix de la méthode de modélisation, la complexité et la précision du modèle.

Nous avons modélisé l'alternateur selon deux méthodes : Le modèle en abc, découlant des équations différentielles à coefficients périodiques régissant le fonctionnement de la machine et le modèle de la transformation de Park.

Nous allons présenter dans ce chapitre un modèle de Park (transformation de Park) appliqué sur la machine synchrone pour simplifier la description mathématique.

2.2 Structure générale de la machine synchrone

La machine que nous allons étudier par la mise en équations correspond à la structure représentée par la figure 2.1. C'est une machine synchrone triphasée, équilibrée dont le rotor est muni d'un système d'aimants permanents, assurant une répartition d'induction sinusoïdale dans l'entrefer. Ce rotor ne comporte ni amortisseurs, ni pièces polaires. L'absence de pièces polaires donne à la machine la structure d'une machine à pôles lisses. Le stator comporte trois axes a, b, c identiques et décalés entre eux d'un angle électrique de $2\pi/3$ [1].

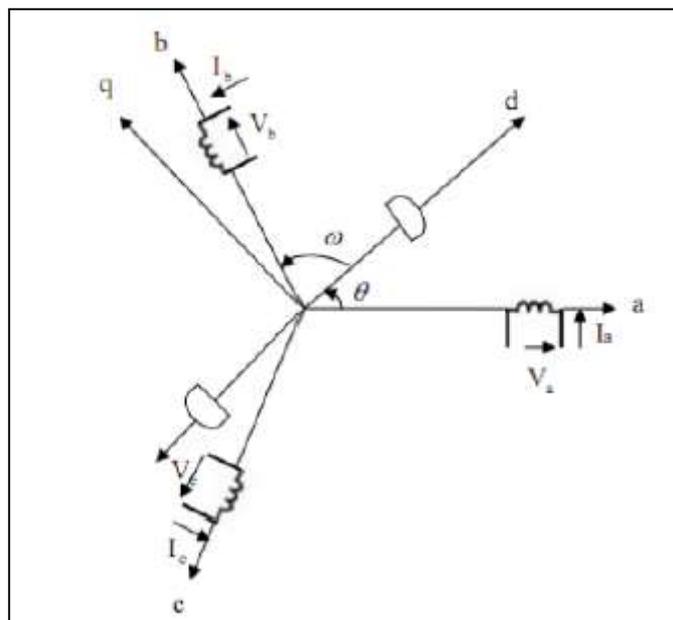


Figure 2. 1 : Représentation d'une machine synchrone bipolaire à aimants permanents

2.3 Modélisation de la Machine Synchrone à rotor bobiné

2.3.1 Modèle linéaire

Les équations différentielles, qui régissent le fonctionnement d'une machine synchrone triphasée, sont caractérisées par des coefficients qui dépendent du temps, d'où la difficulté de leurs résolutions. Pour la machine synchrone, la seule transformation qui peut éliminer le problème de dépendance du temps dans la matrice inductance, est celle représentée par le référentiel tournant avec le rotor. Le modèle traditionnel de la décomposition vectorielle spatiale et temporelle tant des champs magnétiques que des courants dans les machines synchrones (machines électriques en général) est extrêmement utilisée. Ce modèle (connu sous le nom de modèle de Park) permet de simuler de façon simple, le comportement en régime transitoire ou permanent de ces machines [32] [20].

Les détails de l'élaboration du modèle de Park ont été traités dans de nombreux ouvrages d'électrotechnique. Aussi nous nous limiterons à en donner les approximations essentielles. Le modèle de Park est de caractère linéaire, cependant, en pratique la saturation des machines peut affecter de manière importante leur comportement et il est nécessaire de composer avec cette réalité. Dans le modèle de Park la représentation des effets des amortisseurs est réalisée par un nombre réduit de circuits stationnaires à constantes localisées sur des court-circuit et placés dans les deux axes direct et quadrature du modèle. Cette représentation des effets des amortisseurs reste un problème délicat qui peut, dans certaines conditions, être responsable de différences notables entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus par simulation [20] [32].

2.3.2 Modèle de Park

L'étude des machines électriques à partir de la transformée de Park a déjà été longuement traitée dans plusieurs ouvrages et publications spécialisées. Ce modèle permet, par un changement de référentiel, de passer du système statorique au système rotorique avec élimination au passage de certaines variables. Le changement de référentiel permet de passer à une machine bipolaire équivalente, dont l'étude est certainement plus facile. Ensuite par une transformation inverse on peut revenir au modèle triphasé afin d'obtenir les grandeurs caractéristiques « naturelles » de la machine. Le modèle de base consiste à considérer une machine synchrone à pôles saillants ayant une paire de pôles au rotor et un enroulement statorique triphasé. L'enroulement inducteur se trouve sur le rotor de la machine selon l'axe de la saillance, appelé axe direct ou axe longitudinal de la machine (ou encore axe polaire). La présence de grille ou de cage d'amortisseurs au rotor, ou encore l'éventuel effet d'amortisseur du fer, sont modélisés par deux circuits amortisseurs équivalents ; l'un sur l'axe polaire et l'autre sur l'axe inter polaire. [32]

Le stator à induit triphasé fixe, séparé de l'entrefer par une surface cylindrique, est muni d'un enroulement triphasé a, b, c, qui correspond à un enroulement classique à champ

tournant. La position de l'inducteur est donnée par l'angle que fait Od avec chaque axe Oa , Ob et Oc (Figure 2.2), ce qui est exprimé par la relation suivante [20] :

$$\theta_a = \theta, \theta_b = -\frac{2\pi}{3}, \theta_c = -\frac{2\pi}{3}, \theta_r = \frac{d\theta}{dt}$$

Où ω_r et la vitesse de rotation de l'inducteur.

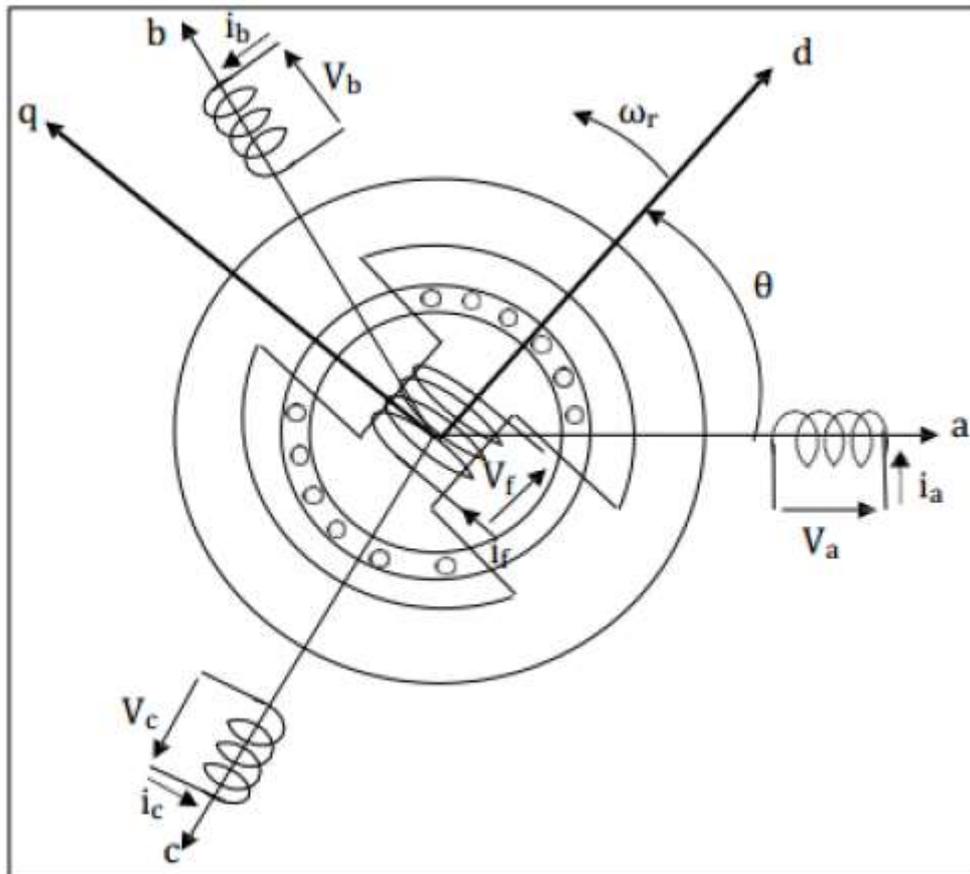


Figure 2. 2 : Machine synchrone triphasé avec amortisseurs

2.3.3 Hypothèses simplificatrices

Le modèle retenu repose sur les hypothèses simplificatrices suivantes [32] [20] :

- La perméabilité de la machine est constante, ceci suppose que le circuit magnétique est parfaitement linéaire ; la saturation magnétique est négligée. Cette hypothèse permet d'assumer que les inductances sont constantes. Les flux sont donc des applications linéaires simples des courants.
- La densité de courant dans les sections des conducteurs élémentaires est considérée comme uniforme, absence d'effet pelliculaire.
- La distribution de la force magnétomotrice est sinusoïdale, cette hypothèse peut s'exprimer de la façon suivante : on ne considère que le premier harmonique

d'espace de la distribution des forces magnétomotrices (f.m.m) créée par chaque phase de l'induit.

- La température de fonctionnement est constante, on néglige la variation des résistances des enroulements on fonction de la température. On prendra les valeurs correspondantes au fonctionnement sous charge nominale, après stabilisation de la température des enroulements.
- Les amortisseurs sont représentés par deux enroulements, en court-circuit sur eux-mêmes.

2.3.4 Equations électriques et magnétiques

Les six enroulements de la figure 2.3 sont décrits par les équations suivantes (convention récepteur électrique) [32] [20].

$$\text{induit (stator)} \begin{cases} V_a = R_a i_a + \frac{d\phi_a}{dt} \\ V_b = R_a i_b + \frac{d\phi_b}{dt} \\ V_c = R_a i_c + \frac{d\phi_c}{dt} \end{cases} \quad (2.1)$$

$$\text{induit (rotor)} \begin{cases} V_f = R_f i_f + \frac{d\phi_f}{dt} \\ 0 = R_D i_D + \frac{d\phi_D}{dt} \\ 0 = R_Q i_Q + \frac{d\phi_Q}{dt} \end{cases} \quad (2.2)$$

Avec :

R_a : Résistance d'une phase statorique.

R_{fdq} : Respectivement, résistances de l'inducteur, de l'amortisseur d'axe d et d'axe Q .

Φ_{abc} : Les flux totaux à travers les bobines statorique.

V_{abc} : Les tentions des phases statoriques.

Les tensions appliquées aux circuits D et Q sont nulles puisqu'ils sont en court-circuit.

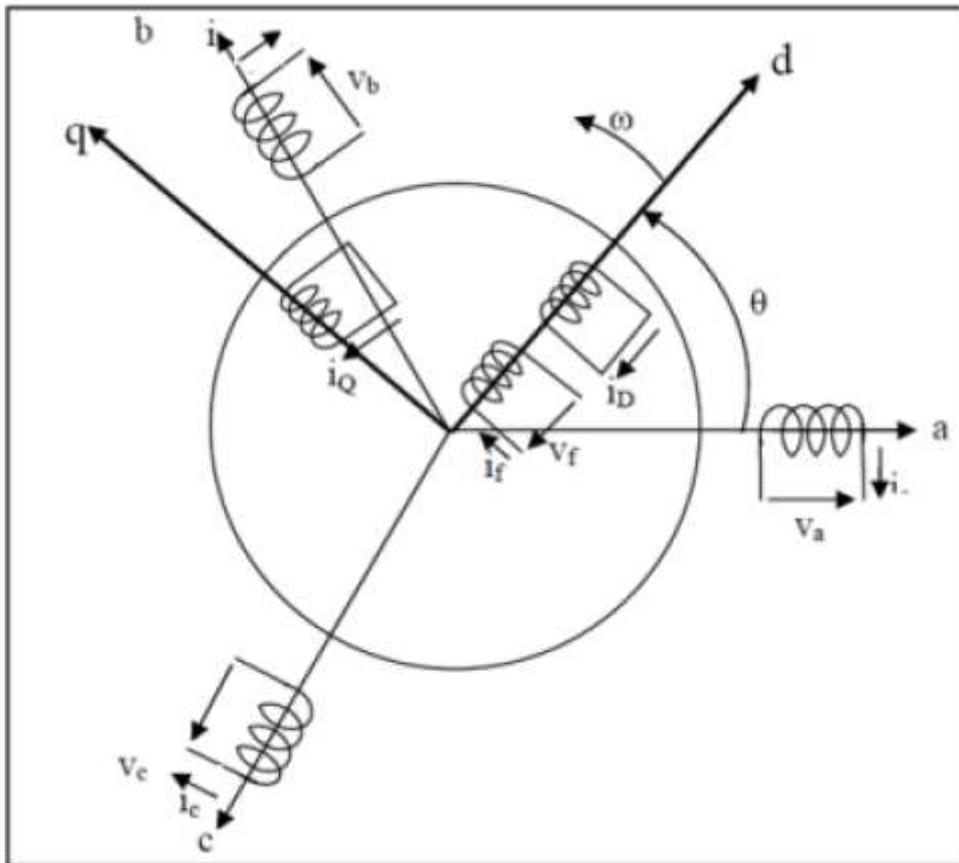


Figure 2. 3 : Machine synchrone triphasé, amortisseurs assimilés à deux enroulements en court-circuit, à 90° l’un de l’autre

Les flux sont liés aux courants par les relations suivantes, exprimées sous forme matricielle.

$$\begin{pmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \\ \phi_f \\ \phi_D \\ \phi_Q \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} & M_{af} & M_{aD} & M_{aQ} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} & M_{bf} & M_{bD} & M_{bQ} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c & M_{cf} & M_{cD} & M_{cQ} \\ M_{af} & M_{bf} & M_{cf} & L_f & M_{fD} & M_{fQ} \\ M_{aD} & M_{bD} & M_{cD} & M_{fD} & L_D & M_{DQ} \\ M_{aQ} & M_{bQ} & M_{cQ} & M_{fQ} & M_{Qd} & M_Q \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix} \tag{2.3}$$

Avec :

$L_a=L_b=L_c=$ Constante, sont les inductances propres statorique ;

$M_{ab}=M_{ba}=$ Constante, sont les mutuelles entre phases statorique ;

En ce qui concerne le rotor, les inductances propres rotoriques sont constantes (L_D, L_F, l_Q).

L’inductance mutuelle relative aux enroulements rotoriques de l’axe direct est $M_{fD} = cte$.

Puisque les axes d et Q sont en quadrature, $M_{QD} = M_{DQ} = M_{fQ} = 0$ Les inductances mutuelles entre enroulements statoriques et rotoriques sont fonction de l’angle électrique θ .

Dans la matrice, un certain nombre de coefficients sont fonction de l'angle θ , ce qui complique considérablement l'étude des régimes transitoires. Pour remédier à ce problème, on opère sur l'ensemble des grandeurs (tensions, courants, flux) un changement de base qui simplifie notablement les relations. Ce changement de variables, appelé « transformation de Park », est suggéré par les symétries du circuit magnétique par rapport aux axes d et q [32].

2.3.5 Transformation de Park

La transformation de Park implique la transformation des enroulements des phases a,b, c, de la machine originelle en des enroulements équivalents du point de vue électrique et magnétique disposés selon les axes d et q. Cette transformation a pour effet de rendre, les inductances mutuelles du modèle de la machine, indépendantes de la rotation. Dans la transformation de Park on définit une matrice unique de transformation pour les courants, les tensions et les flux, à savoir [32] [20] :

$$[T] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

On a ainsi :

$$[i_{dq0}] = [T][i_{abc}] \quad (2.5)$$

$$[V_{dq0}] = [T][V_{abc}] \quad (2.6)$$

$$[\phi_{dq0}] = [T][\phi_{abc}] \quad (2.7)$$

Le coefficient $\sqrt{\frac{2}{3}}$ correspond à un changement naturel de bases dans des repères orthonormés. Changement qui, lorsqu'il est appliqué au vecteur courant et au vecteur de tension, conserve la valeur de la puissance (le produit scalaire est indépendant de la base choisie)

Ce type de changement de base présente également l'avantage d'obtenir une matrice de transformation inverse qui est transposée de la matrice de transformation directe. Avec la transformation de Park, la représentation schématique de la figure 2.4 devient [16] [20] :

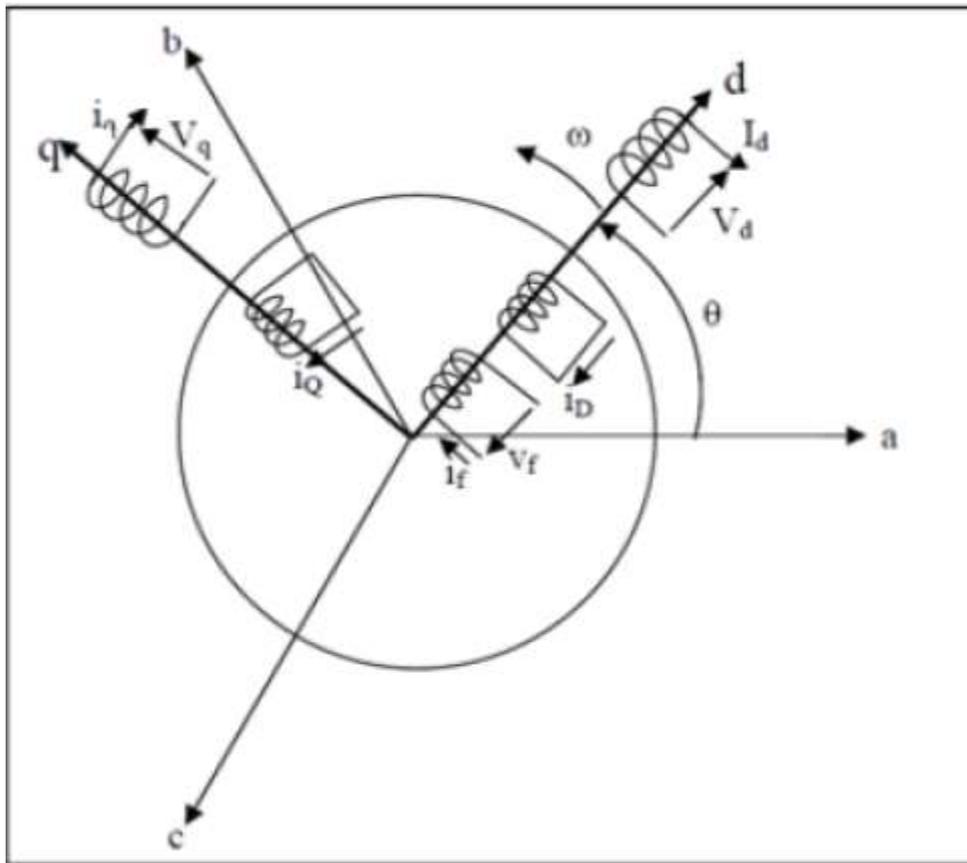


Figure 2. 4 : Interprétation de la transformation de Park pour une machine synchrone

2.3.6 Equations de Park dans les axes d et q, liées au rotor

Nous appliquons les changements de variables définis par la matrice T (équation 2.5) aux équations (2.8 et 2.9), alors :

$$V_{dq0} = [T][R_a]i_{abc} + [T] \frac{d\phi_{abc}}{dt} \tag{2.8}$$

En utilisant les transformations inverses on aura :

$$V_{dq} = [R_a][T]^{-1}i_{dq} + [T][T]^{-1} \frac{d\phi_{dq0}}{dt} + [T] \frac{d[T]^{-1}}{dt} \tag{2.9}$$

$$[T][T]^{-1} = 1 \tag{2.10}$$

On trouve :

$$[T] \frac{d[T]^{-1}}{dt} = \frac{d\theta}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{2.11}$$

En développant l'équation (2.11) on aura :

$$Rotor \begin{cases} V_f = R_f i_f + \frac{d\phi_f}{dt} \\ 0 = R_D i_D + \frac{d\phi_D}{dt} \\ 0 = R_Q i_Q + \frac{d\phi_Q}{dt} \end{cases} \quad (2.12)$$

Ces équations sont appelées les équations de Park : les équations de tensions pour d, q et 0 (la composante homopolaire), l'inducteur f, et les deux amortisseurs D et Q.

2.3.7 Equations des flux et courants

En appliquant la transformation de Park aux équations (2.7), la matrice d'inductances obtenue en reliant le vecteur des flux au vecteur des courants. Pour cela, les matrices $[T]$ et $[T]^{-1}$ sont complétées à l'ordre 6 par adjonction de trois lignes et colonnes correspondant à la transformation identique puisque les courants, flux et tensions d'indices f, D et Q ne sont pas affectés par la transformation de Park. Après calculs, on obtient [32] [20] :

$$\begin{pmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \\ \phi_f \\ \phi_d \\ \phi_q \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 & M_{af} & M_{ad} & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & 0 & M_{aq} \\ 0 & 0 & L_0 & 0 & 0 & 0 \\ M_{af} & 0 & 0 & L_f & M_{fD} & 0 \\ M_{aD} & 0 & 0 & M_{fD} & L_D & 0 \\ 0 & M_{aq} & 0 & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

Avec :

L_d : Inductance synchrone longitudinale

L_q : Inductance synchrone transversale

L_0 : Inductance homopolaire

L_f : Inductance propre de l'inducteur

L_D : Inductance propre de l'amortisseur d'axe direct

L_Q : Inductance propre de l'amortisseur d'axe quadrature

M_{fD} : Inductance mutuelle entre l'inducteur et l'amortisseur d'axe direct

M_{af} : Inductance mutuelle entre l'inducteur et l'induit

M_{aD} : Inductance mutuelle entre l'amortisseur d'axe direct et l'induit

M_{aq} : Inductance mutuelle entre l'amortisseur d'axe en quadrature et l'induit

L'inductance synchrone L_d est composée de l'inductance propre cyclique statorique (L_{std}) et l'inductance de fuite globale (l_{st})

$$L_d = L_{std} + l_{st}$$

De la même façon, l'inductance synchrone transversale est composée de l'inductance propre cyclique rotorique (L_{stq}) et l'inductance de fuite globale (l_{st})

$$L_q = L_{stq} + l_{st}$$

Si la machine est à entrefer constant, alors : $L_d = L_q$

2.3.8 Schéma équivalent de la machine synchrone

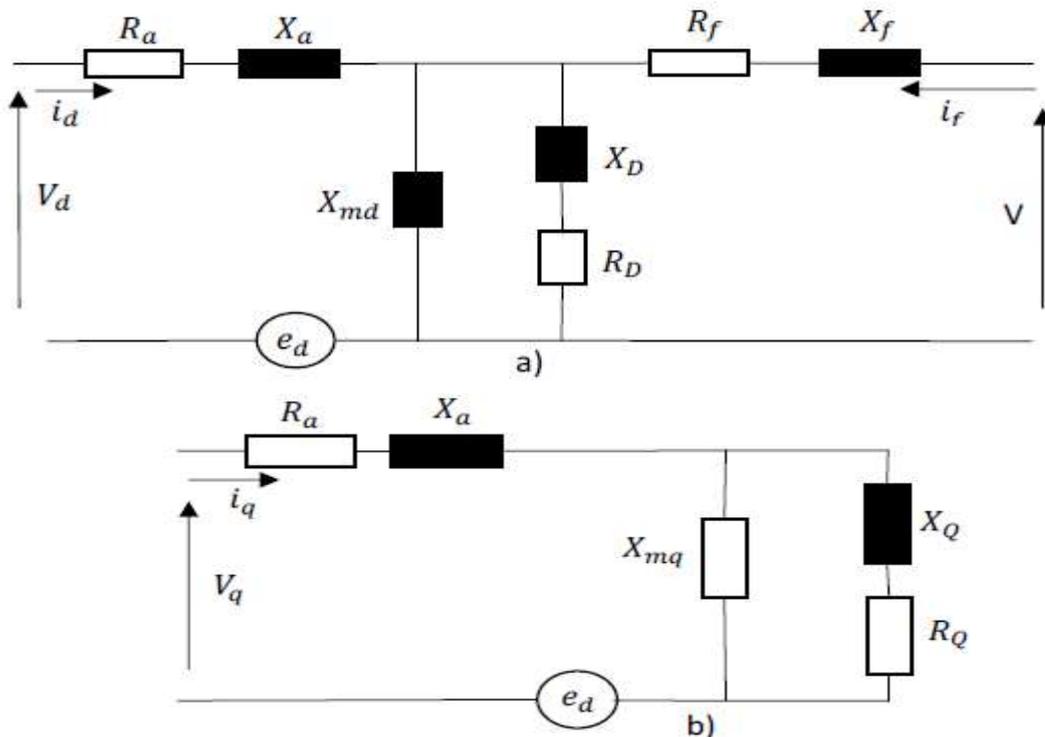


Figure 2. 5 : Circuits équivalents du modèle simplifié de la machine synchrone (a) axe direct, (b) axe quadrature

2.4 Bilan des puissances de la machine synchrone

On considère le cas de la machine fonctionnant en alternateur. Il consomme une puissance absorbe et donne une puissance utile.

2.4.1 Puissance absorbée

Dans un alternateur, la puissance absorbée P_a est une puissance mécanique. Elle correspond au couple de la turbine ou du moteur entraînant l'arbre de l'alternateur appliqué par l'arbre de transmission sur le rotor T_a multiplié par la vitesse angulaire de rotation. Elle s'écrit :

$$P_a = T_a \Omega_s = 2\pi n_s T_a \tag{2.14}$$

Avec :

- Ω_s : Pulsation de rotation en rad/s

- n_s : Vitesse en tr/s
- T_a : Couple utile sur l'arbre en N.m

Si l'alternateur est à excitation indépendante, il faut encore tenir compte de l'énergie électrique absorbée par l'excitation (rotor). Cette puissance électrique doit être fournie au rotor de la machine synchrone de façon à fournir l'excitation et à créer le champ d'induction. Toute cette puissance est intégralement transformée en pertes par effet Joule :

$$P_e = U_e I_e \quad (2.15)$$

Donc :

$$P_a = p_a + P_e = T_a \Omega_s + U_e I_e$$

2.4.2 Puissance utile

La puissance utile d'un alternateur synchrone est la puissance électrique fournie à la charge par le stator à ses bornes :

$$P_u = \sqrt{3} U I \cos \phi \quad (2.16)$$

Avec :

- U : Tension efficace entre phases
- I : Intensité efficace du courant en ligne
- $\cos \phi$: facteur de puissance de la charge

2.4.3 Rendement de l'alternateur

A) Les différentes pertes de l'alternateur

Les pertes dans toute machine électrique se traduisent toujours par un échauffement qui doit être limité si on ne veut pas détruire les matériaux constituant les différentes parties de la machine [1] [10] [15].

Les différentes pertes d'un alternateur sont :

- ✓ Les pertes par effet Joule dans l'induit et dans l'inducteur,
- ✓ Les pertes par courant de Foucault,
- ✓ Les pertes par hystérésis,
- ✓ Les pertes par ventilation de l'alternateur,
- ✓ Les pertes par frottement de l'arbre de l'alternateur dans ses paliers,
- ✓ Les pertes supplémentaires.

B) Pertes par effet joule

Tout courant passant dans un fil conducteur provoque l'échauffement du conducteur. Les courants passant dans l'enroulement du stator et dans l'enroulement du rotor produiront donc un échauffement des conducteurs.

La quantité de chaleur dégagée est proportionnelle au carré de l'intensité (I) du courant qui circule dans le conducteur, à la résistance électrique (R) du conducteur au temps (t) de passage du courant dans le conducteur [1] [10] [15] :

La résistance d'un conducteur est proportionnelle à :

- Un coefficient ρ qui est une caractéristique du conducteur, ce coefficient croit quand la température du conducteur augmente.
- La longueur L du conducteur.
- L'inverse de la section S du conducteur. Ce qui peut s'écrire :

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (2.17)$$

Energie transformée en chaleur :

$$R I^2 t \quad (2.18)$$

La puissance P correspondant à cette perte qui est égale à :

$$P = R I^2 \quad (2.19)$$

C) Pertes joule inducteur

L'inducteur est alimenté en courant continu ; la puissance perdue par effet joule dans le circuit d'excitation est [1] [10] [15] :

$$P_e = R_e I_e^2 = U_e^2 / R_e \quad (2.20)$$

D) Pertes joule induit

On pourrait faire un calcul analogue pour calculer les pertes par effet Joule dans chaque phase du stator en connaissant la résistance d'une phase et l'intensité du courant circulant dans chaque phase. Pour une phase de résistance r on aura [1] [10] [15] :

$$P_{JS} = r i^2 \quad (2.21)$$

Pour l'ensemble des trois phases :

$$P_{JS} = 3ri^2 \quad (2.22)$$

Il faut remarquer que les pertes par effet Joule sont proportionnelles au carré du courant. Si, par exemple, le courant double dans les phases du stator les pertes par effet Joule dans le stator seront multipliées par 4. De même, si le courant d'excitation de l'alternateur double, les pertes par effet Joule dans le rotor seront multipliées par 4 [1] [10] [15].

E) Pertes par courants de Foucault

Les tôles du circuit magnétique du stator sont balayées par le champ tournant. Des forces Electromotrices sont engendrées à l'intérieur même des tôles ; ces forces électromotrices font circuler des courants dans les tôles, ces courants sont appelés "courants de Foucault". Les courants de Foucault produisent un échauffement des tôles par effet Joule.

F) Pertes par hystérésis

Les tôles du circuit magnétique sont parcourues par un champ variable qui fait varier l'aimantation des tôles. Cette variation de l'aimantation provoque un échauffement supplémentaire des tôles [1].

G) Pertes par ventilation de l'alternateur

Pour évacuer la chaleur produite par les pertes de l'alternateur on fait circuler un fluide gazeux (air ou hydrogène) dans les canaux de ventilation du rotor et du stator. Le fluide est produit au moyen de deux ventilateurs calés sur l'arbre du rotor des extrémités. Une certaine puissance est nécessaire pour vaincre toutes les forces de frottement du fluide sur les parties métalliques et les enroulements qu'il rencontre sur. On voit donc que l'énergie dépensée pour faire tourner les ventilateurs se transforme en chaleur [1].

H) Pertes par frottement de l'arbre de l'alternateur dans ses Paliers

La quantité de chaleur correspondant à ces pertes est évacuée par l'huile qui sert au graissage. L'huile s'échauffe au passage dans les paliers, elle est refroidie dans un réfrigérant avant d'être envoyée à nouveau dans les paliers [1].

1) Pertes supplémentaires

Ces pertes correspondent aux courants produits par les forces électromotrices qui résultent d'une répartition inégale du champ magnétique particulièrement dans la profondeur des encoches du stator. Ces courants produisent un échauffement par effet Joule. Elles ne sont pas mesurables [1].

2.5 Formules du rendement

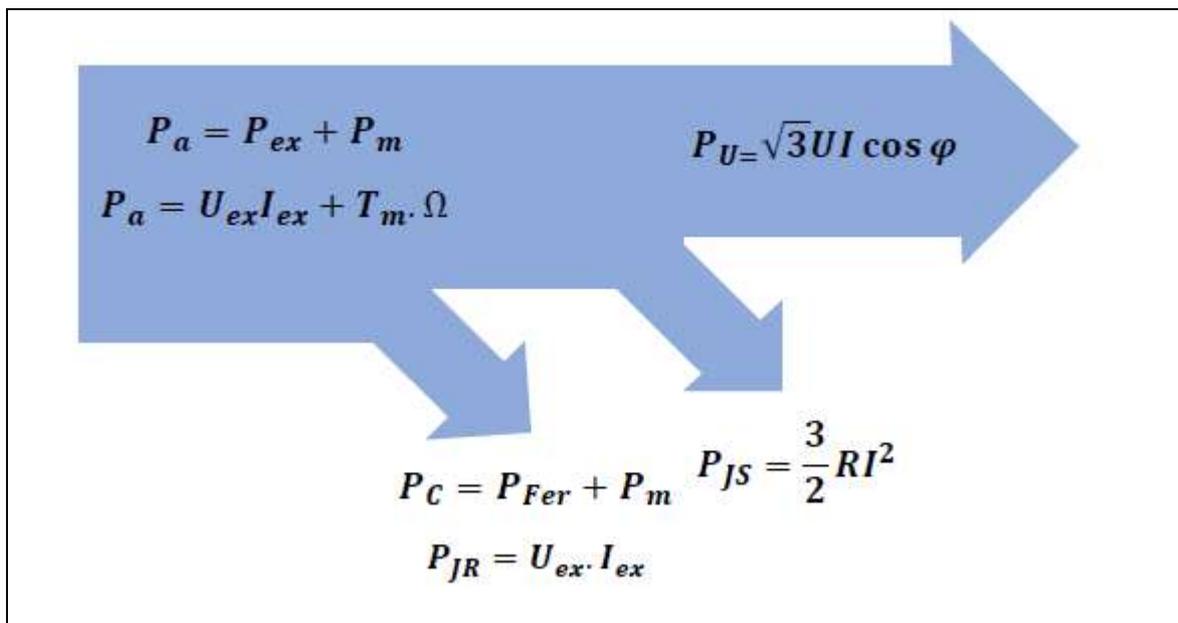


Figure 2. 6 : schéma qui présente toutes les pertes possibles

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos(\varphi)}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos(\varphi) + U_{ex} \cdot I_{ex} + \frac{3}{2} \cdot r \cdot I^2 + P_C} \quad (2.23)$$

2.6 Caractéristiques d'une machine synchrone

2.6.1 Caractéristiques en charge

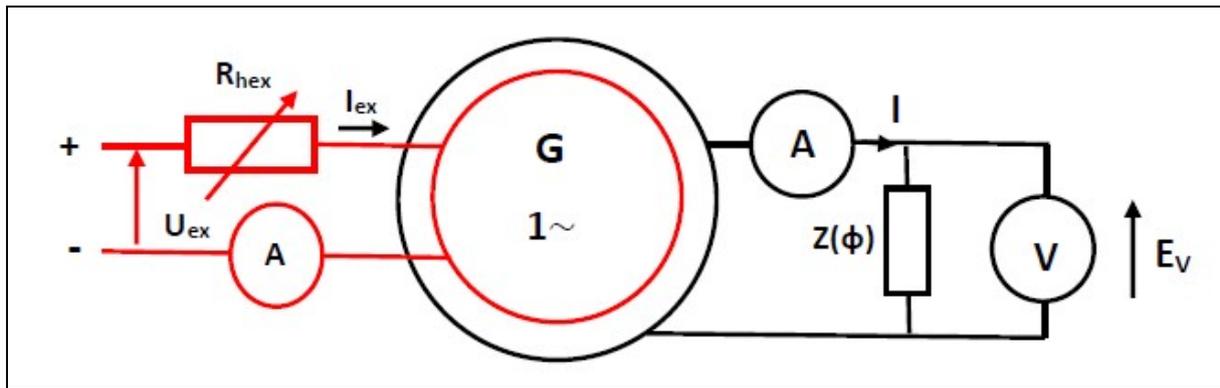


Figure 2. 7 : Schéma équivalent d'alternateur

Lorsque l'alternateur fonctionne, il y'a une chute de tension interne due à la résistance et à la réactance synchrone ; cette chute de tension est d'autant plus importante que le circuit est inductif ; il peut y avoir une surtension aux bornes des récepteurs lorsque le circuit est trop capacitif (en cas de surcompensation par exemple).

Les courbes ci-dessous ont été tracées pour la même vitesse de rotation et pour un courant d'excitation constant afin de mettre en évidence la variation de la chute de tension en fonction de la nature du circuit alimenté.

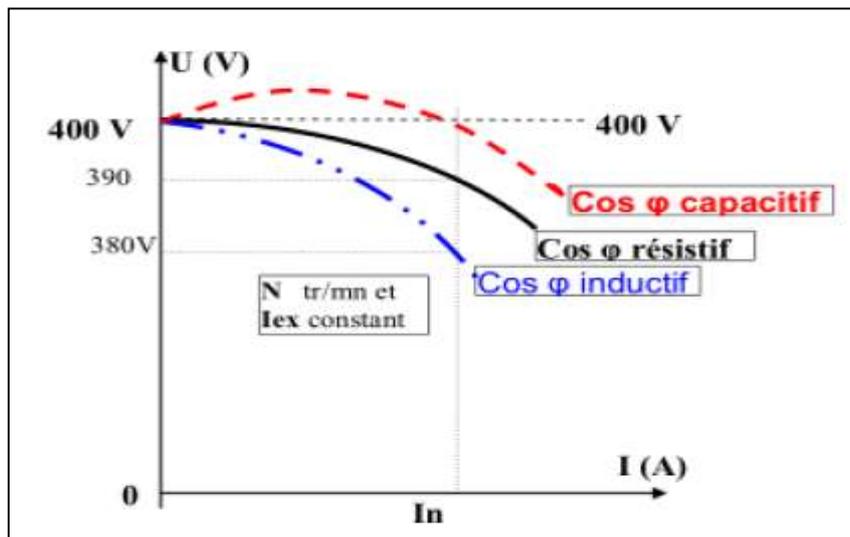


Figure 2. 8 : courbe qui présente la variation de la chute de tension en fonction de la nature du circuit alimenté

NB : En pratique le régulateur de tension agit sur le courant d'excitation pour maintenir la tension à peu près constante

A) Caractéristique externe

Est la caractéristique en charge de l'alternateur, réalisée à l'aide d'une charge d'impédance variable mais de $\cos(\varphi)$ constant. On obtient donc la courbe $v(i)$ [11]:

- vitesse de rotation $n_s = \text{cste}$
- A courant d'excitation d'intensité $i_{ex} = \text{cste}$
- Avec une charge dont $\cos(\varphi) = \text{cste}$

La courbe C1 = charge purement résistive

La courbe C2 = charge résistive et inductive

- La chute de tension est d'autant plus grande que la charge est inductive.

La courbe C3 = charge résistive et capacitive

- La chute de tension est d'autant plus petite que la charge est capacitive

Même si $\cos(\varphi)$ peuvent être choisis arbitrairement, la fréquence de rotation est imposée puisqu'elle conditionne la fréquence f des grandeurs électriques.

2.6.2 Caractéristique à vide

L'alternateur fonctionnant à vide (sans charge), on fait varier le courant d'excitation et la f.e.m correspondante.

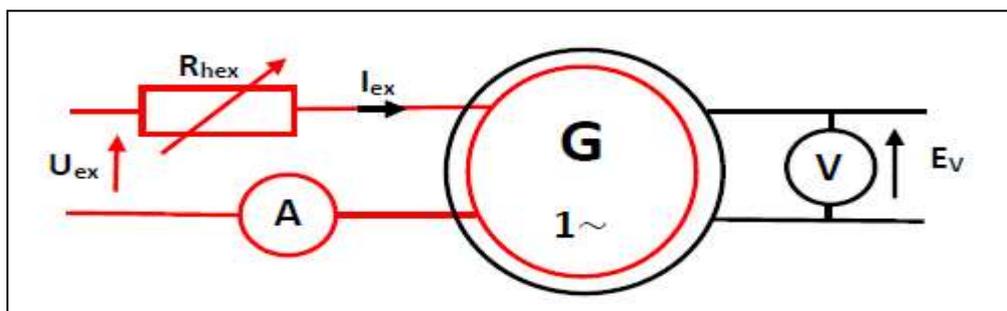


Figure 2. 9 : Schéma équivalent d'alternateur

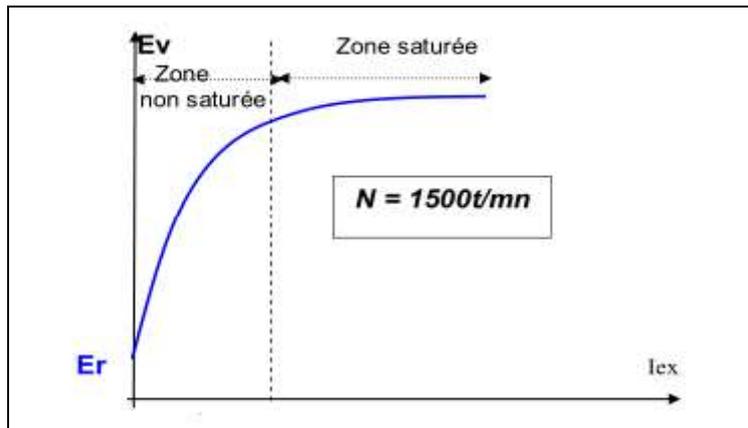


Figure 2. 10 : Courbe qui présente la tension de rotor en fonction de I_{ex} .

E_r : tension de rotor ; elle sert à l'amorçage de l'alternateur (voir excitation) La caractéristique est considérée comme une droite dans la partie non saturée ; autrement dit la f.e.m. est proportionnelle au courant d'excitation :

$$E_v = E_r + kI_{ex} \quad (2.24)$$

L'alternateur fonctionne normalement dans la zone non saturée [1]

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé un modèle simplifié de la machine synchrone par sa modélisation mathématique, avec l'emploi de la transformation de Park, pour passer d'une machine synchrone réelle triphasée à rotor tournant à une machine fictive biphasée équivalente à rotor fixe par rapport au stator.

Ensuite, nous avons présenté, le bilan des puissances et les caractéristiques de cette machine. Le chapitre suivant sera dédié à la régulation de tension d'alternateur de puissance ainsi qui sera validé par simulation sous l'environnement Matlab/Simulink, en utilisant un modèle linéaire de l'alternateur obtenu par l'identification et cité dans plusieurs sources bibliographiques.

Chapitre 3

REGULATION DE TENSION D'UNE MACHINE SYNCHRONE (ALTERNATEUR)

Chapitre 3 REGULATION DE TENSION D'UNE MACHINE SYNCHROME (ALTERNATEUR)

Un système asservi se représente par une chaîne d'action de transmittance G et une chaîne de réaction de transmittance H . Cette dernière réalise une réaction négative. Il y a ainsi une véritable séparation des rôles essentiels du système : la chaîne d'action fournit la puissance tandis que la chaîne de réaction effectue le contrôle et donne les ordres à la chaîne d'action [34].

L'objectif de notre travail est la régulation de tension de sortie V_{eff} par un régulateur proportionnel intégral dérivé (PID) en contrôlant le courant d'excitation i_f de l'alternateur

3.1 Conception d'un système de commande

La commande d'un processus consiste à déterminer la commande appropriée, de manière à assurer aux variables à contrôler (sorties) un comportement défini. L'action de la commande est une action susceptible de changer l'état du système à commander. Ces commandes sont délivrées par un organe de commande ; le processus et son organe de commande constituent le système de commande (figure 3.1)

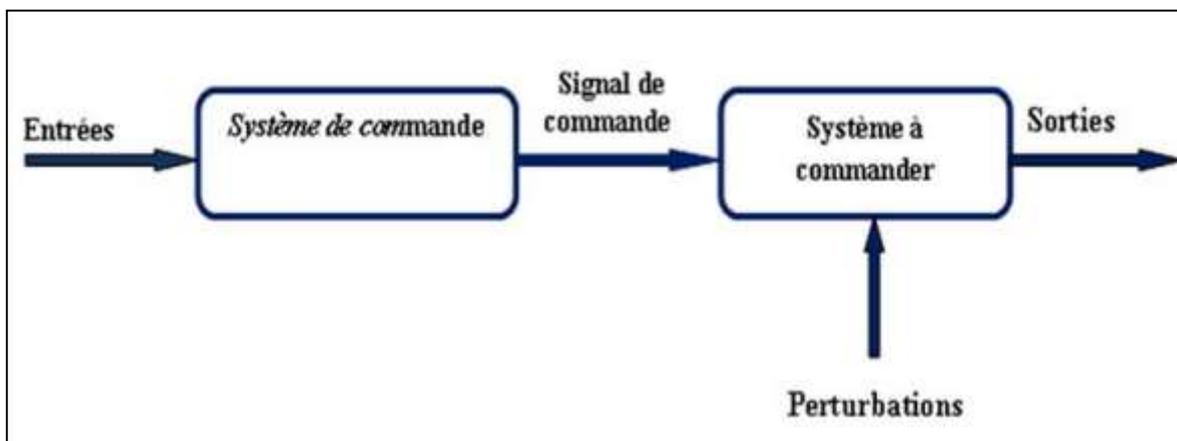


Figure 3. 1 : Système de commande [35]

Le système de commande comprend un élément nécessaire qui est le régulateur qui effectue le calcul de la commande à appliquer au processus à partir de la consigne et de l'état du processus. Lorsqu'il y a un retour d'information de la grandeur observée sur le régulateur, on parle d'un asservissement du système ou d'une régulation du système. a. Asservissement : La consigne, traduisant l'objectif désiré du procédé, n'est pas constante et les grandeurs perturbatrices n'existent pas ou sont très peu influentes sur la grandeur à régler. b. Régulation : La consigne, traduisant l'objectif désiré du procédé, est constante et les grandeurs perturbatrices influencent fortement sur la grandeur à régler [35].

3.2 Description des régulations

Les paramètres principaux pour la sûreté du système de puissance sont : La tension, La vitesse de la turbine, La fréquence et Le courant d'excitation. La régulation pendant des perturbations est faite selon ces paramètres [36].

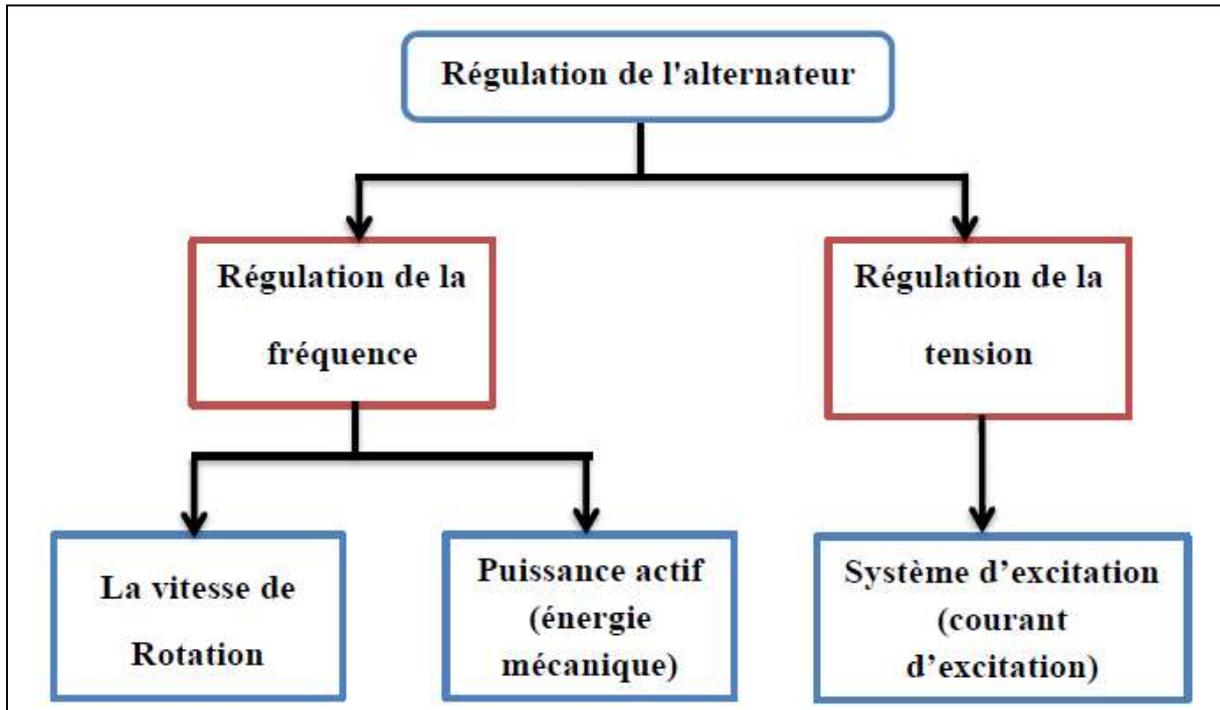


Figure 3. 2 : Description bref de la régulation d'alternateur [36]

3.2.1 Régulateur PID

Le régulateur standard le plus utilisé dans l'industrie est le régulateur PID (proportionnel intégral dérivé), un régulateur PID est un régulateur qui dispose de trois actions P, I et D. Son intérêt est de réunir les avantages des trois correcteurs de base. Grâce au terme P, la rapidité augmente et grâce à l'action I, la précision augmente (l'annulation de l'erreur statique) tout en autorisant grâce à l'action D des performances de rapidité supérieures [37].

Les contrôleurs PID sont couramment utilisés pour améliorer les performances des systèmes AVR. En utilisant un contrôleur proportionnel, le temps de montée d'une réponse peut être réduit, mais l'état stationnaire de l'erreur ne peut pas être éliminé à zéro. Un contrôleur intégré peut améliorer la performance en régime permanent, mais il peut affecter sérieusement la réponse transitoire. Un contrôleur dérivé améliore la performance transitoire en réduisant le dépassement, améliorant ainsi la marge de stabilité pour le système [38].

3.2.1.1 Loi de commande du régulateur PID

Le régulateur Proportionnel intégral dérivé est donné comme suit :

$$u(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{K_i} \int e(t)dt + k_d \frac{de}{dt}) \quad (3.1)$$

3.2.1.2 Fonction de transfert du régulateur PID

La fonction de transfert du correcteur PID est donnée comme suit :

$$G_C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_p \frac{1+k_i s+k_d k_i s^2}{s k_i} \quad (3.2)$$

3.2.1.3 Actions PID

En pratique, à une catégorie donnée de systèmes à asservir correspond un type de correcteur adopté. Pour effectuer un choix judicieux, il faut connaître les effets des différentes actions : proportionnelle, intégrale et dérivée [39].

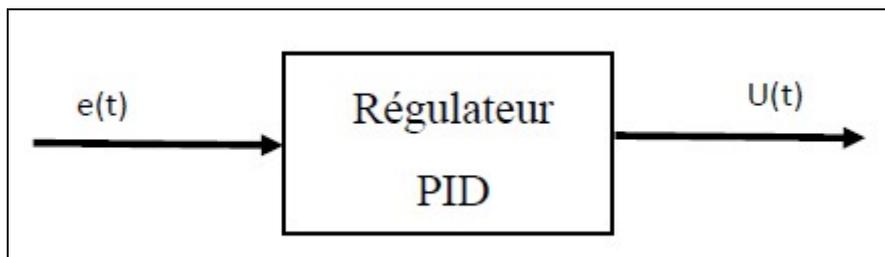


Figure 3. 3 : Schéma synoptique d'un régulateur PID

Un régulateur PID est obtenu par l'association de ces trois actions et il remplit essentiellement les trois fonctions suivantes [39] :

- Il fournit un signal de commande en tenant compte de l'évolution du signal de sortie par rapport à la consigne.
- Il élimine l'erreur statique grâce au terme intégrateur.
- Il anticipe les variations de la sortie grâce au terme dérivateur.

Un régulateur PID est la somme de trois termes :

- ✓ Le terme proportionnel

$$p = k_p e(t) \quad (3.3)$$

- ✓ Le terme intégral

$$I = k_p \frac{1}{k_i} \int_0^t e(t)dt \quad (3.4)$$

✓ Le terme dérivatif

$$D = k_p k_d \frac{de(t)}{dt} \tag{3.5}$$

Les paramètres du régulateur PID sont le gain proportionnel K_p , le temps intégral K_i et le temps dérivatif K_d , les temps étant exprimés en secondes.

Un tableau qui résume les avantages et les limitations des actions de base des régulateurs PID :

Action	Rôle et domaine d'utilisation	Points faibles
P	<p>L'action Proportionnelle corrige de manière instantanée, donc rapide, tout écart de la grandeur à régler, elle permet de vaincre les grandes inerties du système.</p> <p>Afin de diminuer l'écart de réglage et rendre le système plus rapide, on augmente le gain (on diminue la bande proportionnelle) mais, on est limité par la stabilité du système. Le régulateur P est utilisé lorsqu'on désire régler un paramètre dont la précision n'est pas importante, exemple : régler le niveau dans un bac de stockage.</p>	<p>Ne permet pas d'annuler une erreur statique mais permet de la réduire</p>
I	<p>L'action intégrale complète l'action proportionnelle. Elle permet d'éliminer l'erreur résiduelle en régime permanent. Afin de rendre le système plus dynamique (diminuer le temps de réponse), on diminue l'action intégrale mais, ceci provoque l'augmentation du déphasage ce qui provoque l'instabilité en état fermé.</p> <p>L'action intégrale est utilisée lorsqu'on désire avoir en régime permanent, une précision parfaite, en outre, elle permet de filtrer la variable à régler d'où l'utilité pour le réglage des variables bruitées telles que la pression.</p>	<p>Action lente Ralentit le système (effet déstabilisant)</p>

D	<p>L'action Dérivée, en compensant les inerties dues au temps mort, accélère la réponse du système et améliore la stabilité de la boucle, en permettant notamment un amortissement rapide des oscillations dues à l'apparition d'une perturbation ou à une variation subite de la consigne.</p> <p>Dans la pratique, l'action dérivée est appliquée aux variations de la grandeur à régler seule et non de l'écart mesure-consigne afin d'éviter les à-coups dus à une variation subite de la consigne.</p> <p>L'action D est utilisée dans l'industrie pour le réglage des variables lentes telles que la température, elle n'est pas recommandée pour le réglage d'une variable bruitée ou trop dynamique (la pression). En dérivant un bruit, son amplitude risque de devenir plus importante que celle du signal utile.</p>	<p>Sensibilité aux bruits Forte sollicitation de l'organe de commande</p>
---	---	---

Tableau 3. 1 : Rôle et domaine d'utilisation et les points faibles des régulateurs PID [35]

Augmentation de	Stabilité	Précision	Rapidité
<i>Kp</i>	Diminue	Augmente	Augmente
<i>Ki</i>	Diminue	Augmente	Diminue
<i>Kd</i>	Augmente	Diminue	Augmente

Tableau 3. 2 : Tableau d'influence

3.3 Régulateurs de tension

Le système d'excitation est un système auxiliaire qui alimente les enroulements d'excitation de la machine synchrone afin que cette dernière puisse fournir le niveau de puissance demandé. En régime permanent, ce système fournit une tension et un courant continu mais il doit être capable également de faire varier rapidement la tension d'excitation en cas de perturbation sur le réseau. Les systèmes d'excitation sont équipés de contrôleurs, appelés habituellement régulateurs de tension (AVR : Automatic Voltage Regulator) [40].

Ces derniers sont très importants pour l'équilibre de la puissance réactive qui sera fournie ou absorbée selon les besoins des charges. En outre ces contrôleurs représentent un moyen très important pour assurer la stabilité transitoire du système de puissance [40].

Le régulateur de tension agit sur le courant d'excitation de l'alternateur pour régler le flux magnétique dans la machine et "ramener" la tension de sortie de la machine aux valeurs souhaitées. Une caractéristique très importante d'un régulateur de tension est sa capacité à faire varier rapidement la tension d'excitation [40].

3.3.1 Pourquoi règle-t-on la tension à certaines valeurs de référence ?

- ✓ Pour minimiser les pertes sur les lignes de transport
- ✓ S'éloigner des limites d'instabilité
- ✓ Respecter les tensions livrées à la clientèle pour le bon fonctionnement de leurs équipements
- ✓ Éviter de soumettre le matériel à des tensions trop hautes (tenue diélectrique évitant le vieillissement prématuré)
- ✓ Éviter de soumettre le matériel à des tensions très basses pouvant franchir le seuil conduisant à l'effondrement [41].

3.3.2 Les causes des variations possibles de tension

- ✓ Perte de ligne électrique (la variation de l'impédance entraîne la variation de tension)
- ✓ Perte de groupe (variation de P et Q)
- ✓ Fluctuation de la consommation en période de forte consommation de la puissance réactive par les utilisateurs
- ✓ À puissance active consommée constante, toute chute de tension se traduit par une variation de l'énergie réactive [41].

3.3.3 Moyens de réglages de la tension

- Batterie de condensateurs à installer sur les jeux de barres des postes THT /HT et HT/MT ou chez les clients industriels : permettent la compensation des pertes et des consommations réactives
- Régleurs de transformateur de puissance
- Groupes de production Le réglage de la tension se fait par zone, à chaque zone sont affectés des groupes réglant, un point pilote (représentatif de la valeur de la tension et une plage de tension de consigne $U_c \text{ min} - U_c \text{ max}$. Dans ce qui suit, nous allons étudier le système d'excitation d'alternateur des groupes de RAS- DJINET pour la régulation de tension de la zone du réseau à laquelle ils sont raccordés [41].

3.4 Système d'excitation à diodes tournantes centrale de ras Djanet

L'excitatrice du système d'excitation à diode tournante est un alternateur inversé dont le circuit d'excitation, alimenté par l'alternateur pilote, est placé sur le stator. L'alternateur pilote est monté à l'extrémité de l'arbre de l'excitatrice, du côté opposé à l'attaque de l'alternateur principal. L'inducteur de l'alternateur pilote est constitué d'aimants permanents en rotation et l'induit placé au stator est bobiné en triphasé. Cette tension de sortie statorique est redressée à l'aide d'un pont à thyristors. La tension continue ainsi obtenue alimente l'enroulement de l'excitatrice. La tension triphasée produite au rotor de l'excitatrice est appliquée à un pont de diodes tournantes calé sur l'arbre de l'alternateur principal [41].

3.4.1 Principe d'excitation

Les alternateurs de la centrale thermique de RAS DJINET sont excités par une excitation principale à travers deux ponts diodes tournantes. L'excitatrice principale du système d'excitation à diode tournante est un alternateur inversé dont le circuit d'excitation, alimenté par l'alternateur pilote, de sorte que l'alimentation du système d'excitation soit indépendante du réseau [41].

En effet l'excitatrice pilote dont l'inducteur est l'aimant permanent installé au rotor et l'induit installé au stator alimente et excite l'excitatrice principale à travers le régulateur à pont de thyristors dont son inducteur parcouru par un courant continu (il est en série avec l'induit de l'excitatrice pilote) [41].

D'autre part l'excitatrice principale à son tour alimente et excite le rotor de l'alternateur principal en courant continu (courant d'excitation) à travers deux ponts de diodes tournantes. A noter donc, que le réglage de la tension alternateur se fait dans le circuit inducteur de l'excitatrice principale [41].

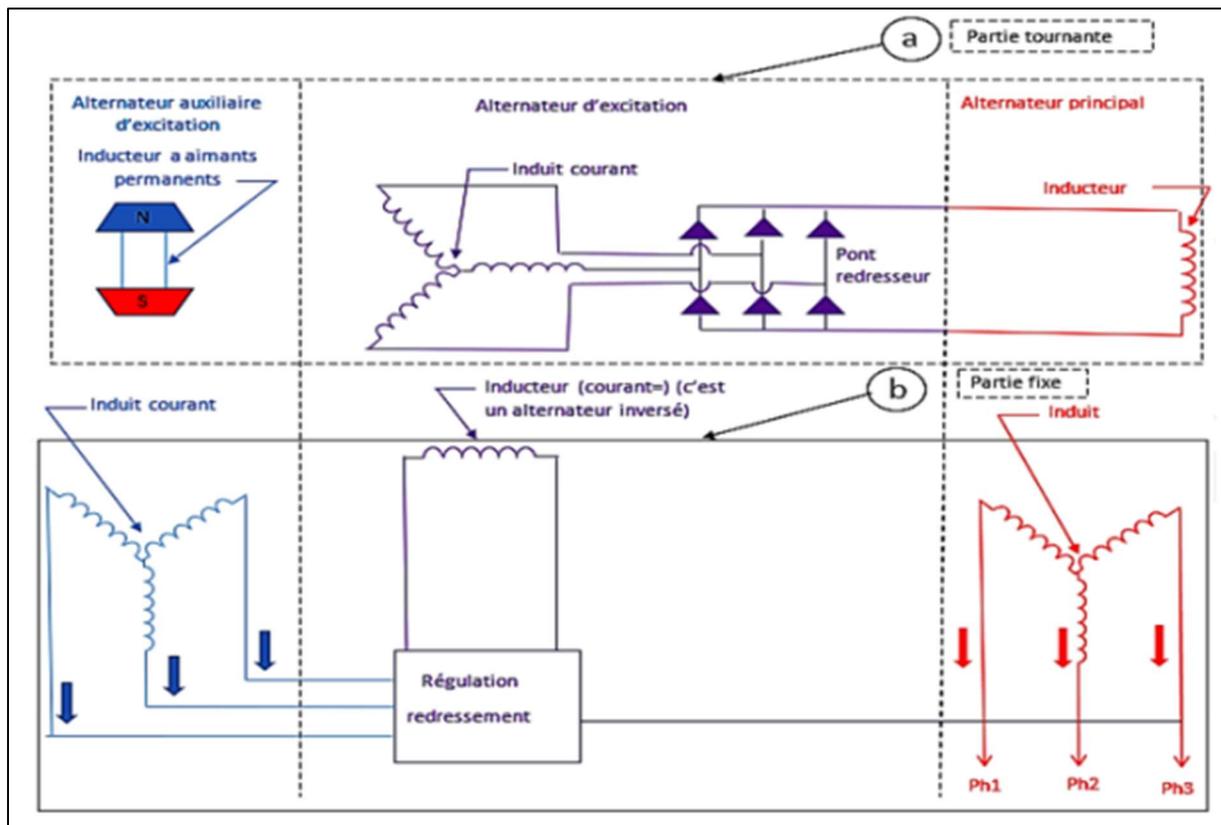


Figure 3. 4 : Schéma Bloc du système d'excitation [41]

3.4.2 Principe de réglage

La régulation de tension est assurée grâce au régulateur multi canal avec une sécurité de fonctionnement particulière pour grands alternateur avec excitatrice à courant triphasé. Le dispositif de réglage possède trois circuits complètement séparés avec leurs propres convertisseurs pour [41] :

- Réglage de la tension
- Réglage du courant de champ
- Régime de secours avec transformateur de réglage

On peut commuter à la main ou automatiquement sans à-coup entre les modes de service réglage de la tension et réglage du courant de champ lorsque certaines conditions sont remplies. Les perturbations des régulateurs sont détectées et évaluées dans un appareil de surveillance. Les régulateurs sont entièrement électroniques et composés de cartes à circuit imprimé remplaçables et d'ensembles de pièces détachées enfichable [41].

Type de la machine	Alternateur	Excitatrice principale	Excitatrice pilote
Puissance	176MW	558KW	15KVA
Tension	15,5KV	240V	220V
Courant	8195A	2450A	41A
Vitesse	50 tr/s	50tr/s	50tr/s
Fréquence	50 Hz	50Hz	400Hz
COS θ	0.8	...	1
Courant d'induit	2450 A	41A	Aimant permanent

Tableau 3. 3 : Caractéristiques du système d'excitation [41]

3.5 Régulation adaptée

Le dispositif de réglage possède trois circuits séparés avec leurs propres convertisseurs [41].

- Régulateur de tension
- Régulateur de courant de champ
- Régulateur à main

3.5.1 Régulateur de tension

Le régulateur est réalisé en tant que régulateur de tension avec régulateur de courant de roue polaire inséré et régulateur de courant de champ inséré. Il règle la tension aux bornes de l'alternateur. La tension de consigne est fournie par afficheur de consigne. La mise au point du potentiomètre de consigne peut se faire à la main sur place ou moyennant la commande à moteur à partir du poste de commande. La gamme de réglage se situe entre 85% et 115% de l'alternateur [41].

Le régulateur possède une chaîne de régulation à trois boucles fermées

- ✚ Une boucle fermée de la régulation de tension d'alternateur U_a avec un régulateur à caractéristique PI
- ✚ Une boucle fermée pour la régulation de courant de rotor (courant d'excitation) I_R avec régulateur à caractéristique P
- ✚ Une boucle fermée pour la régulation du courant de champ (courant inducteur de l'excitation principale) I_F avec un régulateur à caractéristique PI

Le régulateur possède un générateur d'impulsions (générateur de courant de gâchette) pour allumage des thyristors pour le réglage de la tension. Ce système de réglage se distingue par :

- ✓ Une grande stabilité et une vitesse de réglage dans tous les cas de charge
- ✓ Un statisme de puissance active et réactive
- ✓ Un accessoire de stabilisation de puissance active est raccordé au régulateur de tension pour amortir le groupe des machines en cas de condition de secteur critiques, c'est un dispositif électronique qui envoie des signaux additionnels au régulateur de tension afin que celui-ci tienne compte des variations de puissance active dues aux variations de tension d'excitation [41].

3.5.2 Régulateur de courant de champ

Il prend en charge le réglage de tension en cas de défaillance du circuit du régulateur de tension. Dans ce cas, la régulation de tension est opérée manuellement. Le régulateur de courant de champ se compose dans une large mesure des mêmes composants que le régulateur de tension. Lors d'une défaillance du régulateur de tension, l'installation commute automatiquement au régulateur de courant de champ, ceci étant rendu possible grâce à un réglage supplémentaire par poursuite et d'équilibrage (équilibrage non linéaire). Le régulateur par poursuite permet la commutation sans à-coups du régulateur de tension au régulateur de courant de champ. Ce dernier est tout le temps informé des données du régulateur de tension. Un dispositif d'équilibrage non linéaire à bande morte empêche un rajustement trop fréquent lors de l'écart des deux valeurs de consigne qui sont I_{FCA} et I_{FCM} .

I_{FCA} : valeur de consigne du courant de champ lors du réglage automatique.

I_{FCM} : valeur de consigne du courant de champ lors du réglage manuel [41].

3.5.3 Régulateur à main

Le régulateur à main utilisé en régime secours est constitué d'un transformateur de réglage télécommandé. Les qualités du transformateur intermédiaire permettent l'adaptation de la tension d'excitation maximale. Dans ce cas, le réglage de la tension se fait manuellement par variation du rapport de transformation du transformateur [41].

Remarque : une commutation entre le régulateur à main et le régulateur à thyristors pendant le service n'est pas possible.

3.5.4 Permutation des régulateurs

Le réglage de la tension de sortie de l'alternateur est assuré automatiquement par le régulateur de tension.

Une commutation de régulation de tension à régulation de courant de champ peut se faire de façon manuelle ou automatique. Lors d'une défaillance du régulateur de tension, l'installation commute automatiquement au régulateur de courant de champ. Un réglage

supplémentaire par poursuite et d'équilibrage ainsi qu'un appareil de contrôle d'avaries du régulateur sont prévus pour réaliser cette exigence.

Le régulateur par poursuite permet la commutation sans à coup de la régulation de tension à la régulation de courant de champ et assure que l'afficheur de consigne du régulateur de courant de champ suive le régulateur de tension.

La commutation se fait sans a coup si les deux valeurs de consigne sont égales. La différence entre les deux valeurs de consigne est signalée sur instrument d'équilibrage [41].

3.6 Mesure des grandeurs rapportées aux régulateurs

Pour la marche, la mise au point et le contrôle du régulateur, il est important en chaque instant à ce dernier d'acquérir certaines grandeurs de l'alternateur, à savoir :

- ✓ Le courant d'alternateur I_A
- ✓ La tension d'alternateur U_A
- ✓ Le courant de roue polaire I_R
- ✓ Le courant de circuit de champ I_F
- ✓ L'angle de déphasage interne δ

Toutes les valeurs, mis à part le courant de roue polaire peut être mesuré directement.

La mesure de ses grandeurs d'alternateur est faite en chaque instant et rapportés analogiquement au régulateur de tension. Nous développons après chaque détection et son rapport au régulateur [41].

3.6.1 Mesure du courant d'alternateur I_A

Moyennant un transformateur d'intensité, le courant d'alternateur est envoyé sur un potentiomètre pour la mise au point de la tension effective du courant, il est obtenu ainsi une mesure analogique du courant allant de 0 à 5 V.

Cette détection de I_A est envoyée au circuit de limitation et à l'élaboration de l'angle interne [41].

3.6.2 Mesure du courant de champ I_F

Elle se fait moyennant trois transformateurs de courant d'alternateur pour ramener le courant triphasé du convertisseur à thyristors (provenant de l'excitatrice pilote). Cette mesure à l'amont du pont de redresseur, nous permet contrairement à la mesure directe dans le circuit d'excitation une séparation galvanique afin de manipuler des courants faibles, libres de potentiel (pour les cartes électroniques). Il faut signaler qu'il ya deux détections de courant I_F propre aux deux convertisseurs à thyristors. Le courant I_F est envoyé à un potentiomètre pour la mise au point de la tension effective du courant, il est obtenu ainsi une mesure analogique du courant allant de 0 à 10 V.

L'alimentation du circuit de champ par des tensions de fréquence 400HZ permettra un très bon lissage de la tension d'excitation ainsi que le courant I_F [41].

3.6.3 Mesure du courant de roue polaire I_R

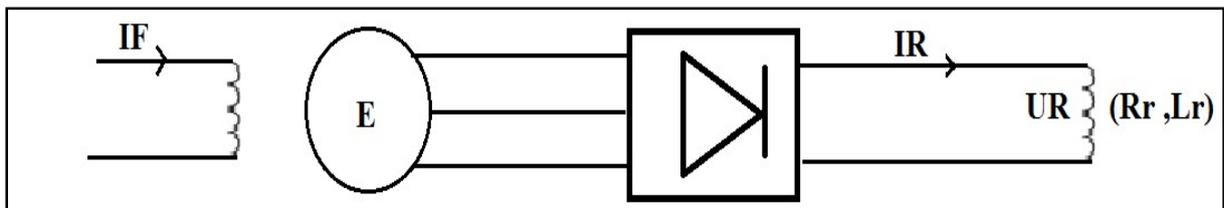
Celle –ci est opérée en deux fois :

En premier lieu, elle est opérée par une simulation directe du courant de champ et rapportée au régulateur de I_R (inséré dans le régulateur de courant) et en second lieu par une mesure d'un champ transversal placé dans le stator de l'excitatrice principale [41].

A) SIMULATION DE I_R RAPPORTEE AU REGULATEUR

L'une des deux mesures du courant de champ I_F en amont des ponts redresseurs servira à la simulation de I_R dans une carte électronique [41].

Nous pouvons d'abord admettre la proportionnalité qui existe entre U_R et I_F à savoir que $U_R \cong k \cdot I_F$



$$U_R = R_r I_R + L_r \frac{dI_R}{dt} = (R_r + L_r \frac{d}{dt}) I_R = (R_r + L_r p) I_R \xrightarrow{TL} I_R = \frac{1}{R_r} U_R \quad (3.6)$$

$$I_R = \frac{1/R_r}{1 + (\frac{L_r}{R_r})p} U_R = \frac{1/R_r}{1 + (\frac{L_r}{R_r})p} K I_F \quad (3.7)$$

$$I_R = \frac{k/R_r}{1 + (\frac{L_r}{R_r})p} I_F = \frac{K'}{1 + Tp} a \text{ avec } k' = k/R_r \quad (3.8)$$

U_R : tension rotorique de l'alternateur

L_r : inductance rotorique

R_r : résistance rotorique

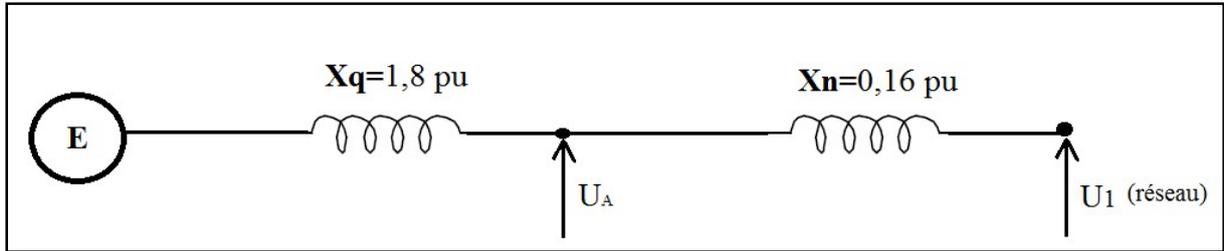
3.6.4 Mesure de l'angle de déphasage interne δ

Cette détection de l'angle interne se fait moyennant un trigger réagissant sur le front montant d'un signal élaboré par \vec{E} et \vec{V}_1 [41].

E : f.e.m interne

V_1 : tension de sortie de l'alternateur

Soit le schéma électrique suivant :



$$\vec{E} = \vec{U}_A + X_q \vec{I}_A \tag{3.9}$$

$$\vec{V}_1 = \vec{U}_A + X_n \vec{I}_A \tag{3.10}$$

$$\delta = (\vec{E}, \vec{V}_1) = (\vec{U}_A + X_q \vec{I}_A, \vec{U}_A + X_n \vec{I}_A) \tag{3.11}$$

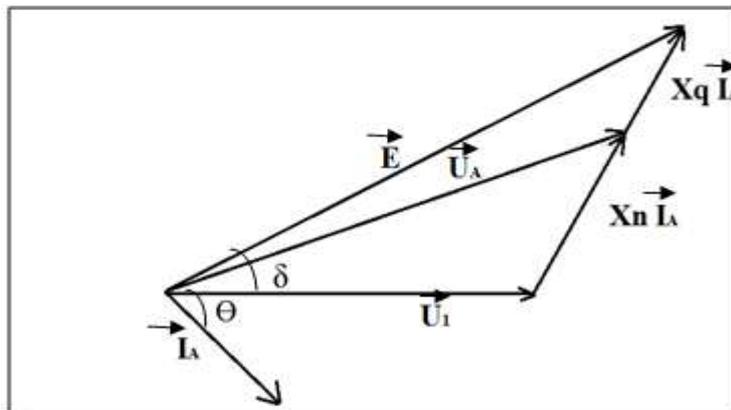


Figure 3. 5 : Diagramme de Behn-Eschenburg

X_q : Réactance de l'alternateur

X_n : Réactance de l'enroulement T, F à la sortie

δ : Angle interne

θ : Angle de déphasage entre U et I

3.7 Détails du modèle du système

La variation de l'amplitude de la tension du système dépend de la réactance de la machine pendant la durée de la variation décidée par la constante de temps du générateur. Étant un

appareil statique, l'AVR offre un délai minimum et apporte la tension du système à sa valeur nominale rapidement. La tension aux bornes du system est détectée par l'AVR et maintenue à sa valeur nominale par réguler l'excitation. Les composants de base d'un AVR sont : le capteur, l'amplificateur, l'excitation et le générateur. Le modèle de fonction de transfert complet d'un système AVR (sans régulateur) est représenté sur la figure III.6. Les valeurs de gains, les constantes de temps et la fonction de transfert de différents composants de l'AVR utilisés dans notre travail sont décrits dans le Tableau [12].

3.7.1 Fonction de transfert de l'amplificateur

La fonction de transfert d'un amplificateur est modélisée par un gain de K_a et une constante de temps T_a donnée par [12] :

$$FT_a = \frac{K_a}{1 + sT_a} \quad (3.12)$$

3.7.2 Fonction de transfert de l'excitation

La fonction de transfert d'un excitateur modélisé par un gain de K_e et une constante de temps T_e est donnée par [12] :

$$FT_e = \frac{K_e}{1 + sT_e} \quad (3.13)$$

3.7.3 Fonction de transfert du Générateur

Un générateur modélisé par un gain de K_g et un constant de temps de T_g et fonction de transfert représenté par [12] :

$$FT_g = \frac{K_g}{1 + sT_g} \quad (3.14)$$

3.7.4 Fonction de transfert du capteur

Le capteur peut être représenté par une fonction de transfert de premier ordre avec un gain de K_c et un constant de temps T_c est donner par [12] :

$$FT_c = \frac{K_c}{1 + sT_c} \quad (3.15)$$

3.8 Etude de la stabilité de système

La stabilité de tension, par définition, se rapporte à la capacité d'un système de puissance, pour une condition de fonctionnement initiale donnée, de maintenir des valeurs de tensions acceptables à tous les nœuds du système après avoir subi une perturbation. La stabilité de

tension dépend donc de la capacité de maintenir/restaurer l'équilibre entre la demande de la charge et la fourniture de la puissance à la charge. L'instabilité résultante se produit très souvent sous forme de décroissance progressive de tensions à quelques nœuds. Généralement, l'instabilité de tension se produit lorsqu'une perturbation entraîne une augmentation de puissance réactive demandée au-delà de la puissance réactive possible. Enfin, la stabilité de tension peut être classée en deux catégories ; la stabilité de tension aux grandes perturbations et aux petites perturbations.

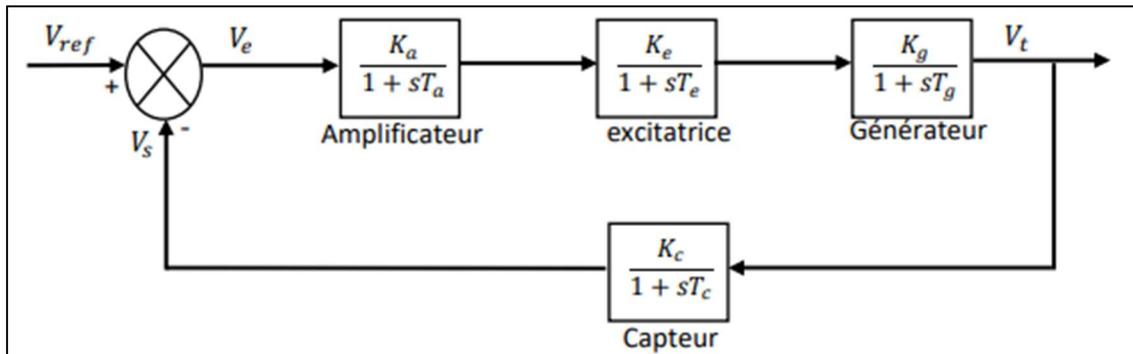


Figure 3. 6 : schéma bloc de système d'alternateur

Eléments	Fonction de transfert	Gain	Constants de temps
Amplificateur	$FT_a = \frac{K_a}{1 + sT_a}$	$K_a = 10$	$T_a = 0.1$
Excitatrice	$FT_e = \frac{K_e}{1 + sT_e}$	$K_e = 1$	$T_e = 0.4$
Générateur	$FT_g = \frac{K_g}{1 + sT_g}$	$K_g = 1$	$T_g = 1$
Capteur	$FT_c = \frac{K_c}{1 + sT_c}$	$K_c = 1$	$T_c = 0.01$

Tableau 3. 4 : Paramètres utilisés pour le système de régulation automatique [12]

3.8.1 La fonction de transfert du système

La fonction de transfert de notre système sans régulateur PID :

$$\frac{V_t}{V_{ref}} = \frac{K_a * K_e * K_g}{(1 + sT_a) * (1 + sT_e) * (1 + sT_g)} \quad (3.16)$$

$$1 + \frac{K_a * K_e * K_g}{(1 + sT_a) * (1 + sT_e) * (1 + sT_g)} * \frac{K_c}{(1 + sT_c)}$$

Avec les paramètres donnés dans le tableau 4 est : [12]

$$\frac{V_t}{V_{ref}} = \frac{0.1s+10}{0.0004s^4+0.0454s^3+0.555s^2+1.51s^1+11} \quad (3.17)$$

Les pôles de cette fonction de transfert sont :

$$P1 = -99.9712$$

$$P2 = -12.4892$$

$$P3 = -0.5198+4.6642i$$

$$P4 = -0.5198- 4.6642 i$$

On remarque que les quatre pôles sont à partie réelle négative alors notre system est stable.

3.9 Réponse indicielle du système sans régulation

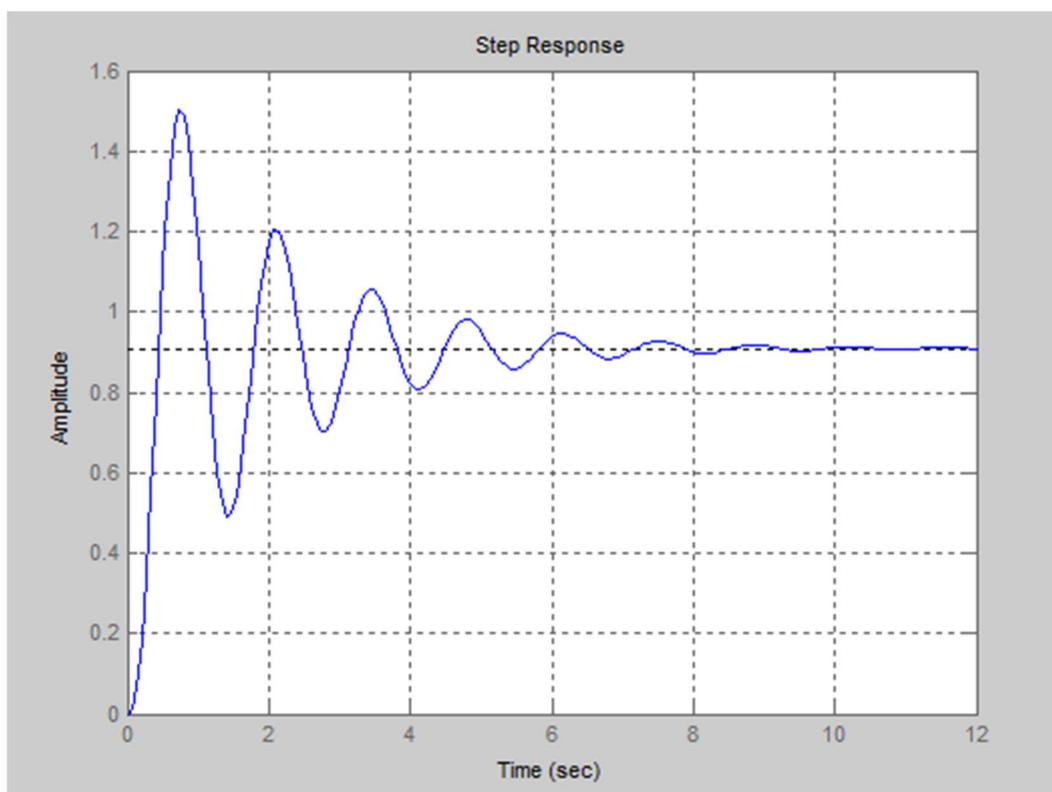


Figure 3. 7 : La réponse de système sans régulation

3.10 Etude du système avec régulation

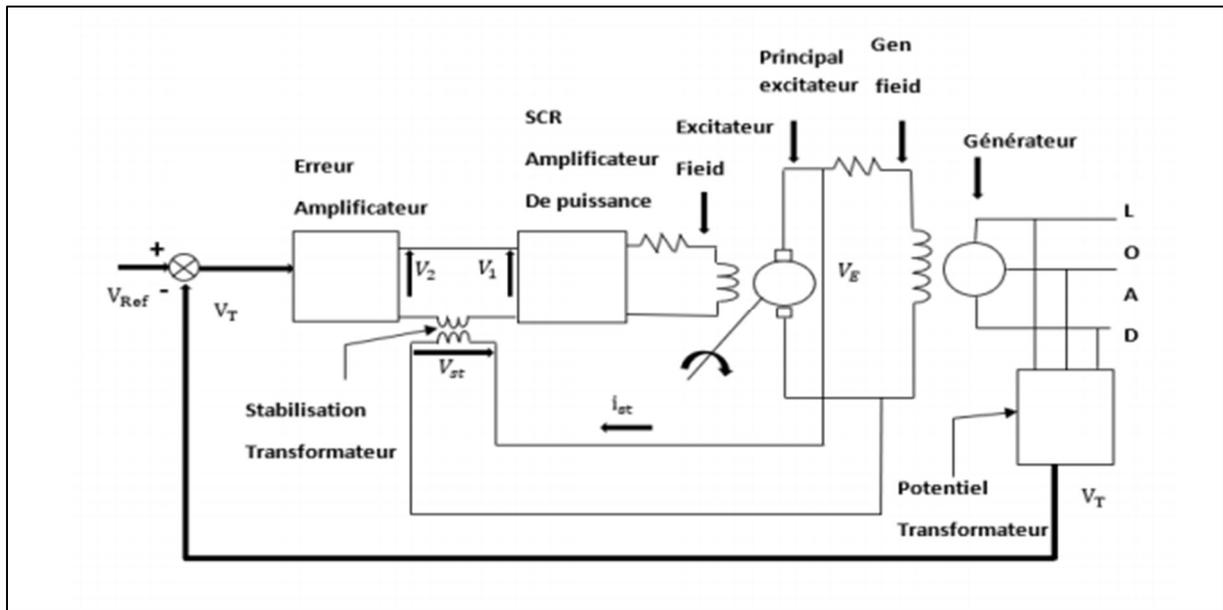


Figure 3. 8 : Diagramme de principe de régulation de tension de l'alternateur

3.10.1 Régulation de tension à vide

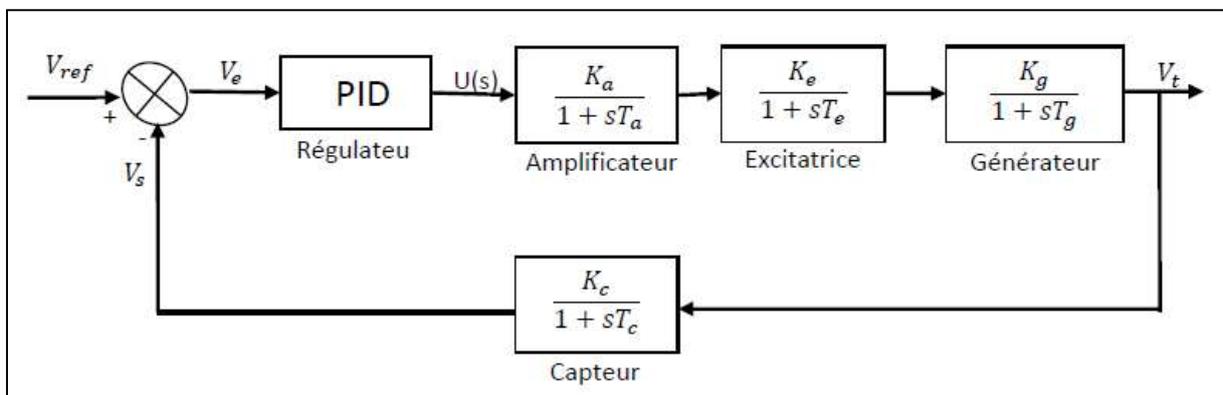


Figure 3. 9 : Schéma bloc de régulation de tension

Pour choisir les paramètres du régulateur PID nous avons utilisé plusieurs valeurs pour K_p , K_i et K_d et on note des fonctions objectives OF1, OF2, OF3 et OF4.

Paramètres	OF1	OF2	OF3	OF4
K_p	0.5878	0.6022	1.2930	0.6190
K_i	0.4062	0.3763	0.9828	0.4222
K_d	0.1843	0.1841	0.6303	0.2058

Tableau 3. 5 : Paramètres de régulateur PID avec plusieurs fonctions objectives

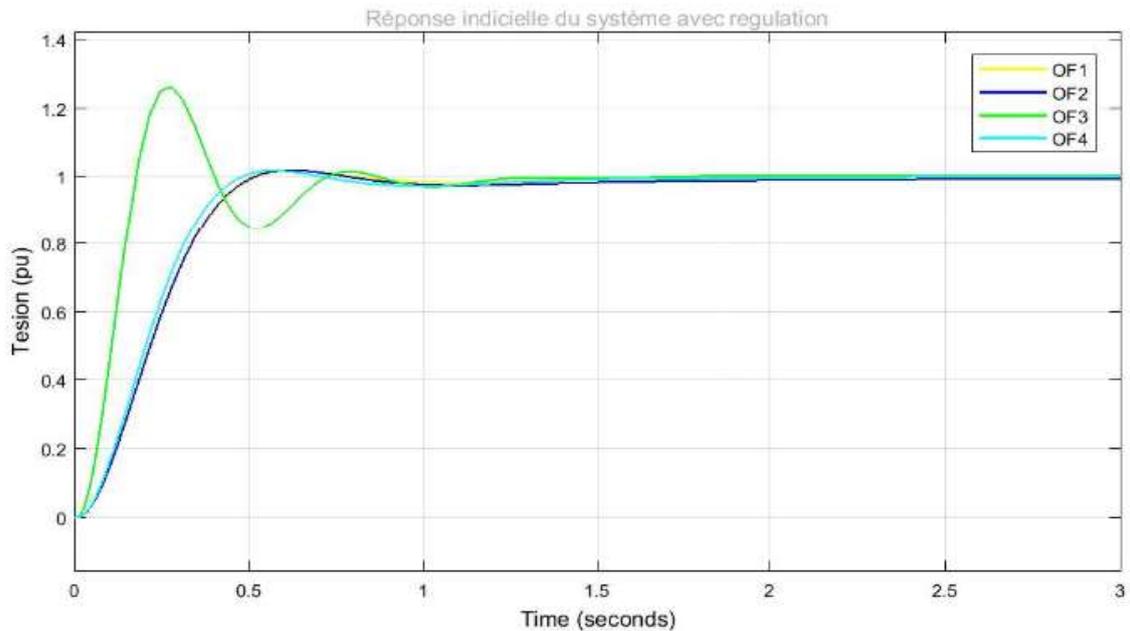


Figure 3. 10 : Réponse indicielle du système avec changement de K_p , K_i et K_d

3.10.2 Régulation de tension en charge

Le gain de générateur K_g et le constant de temps T_g dépendent de la charge. K_g varie entre 0.7 et 1 et T_g entre 1 et 2 sec, la variation est entre alternateur en charge et alternateur sans charge [22].

Pour régler la tension de l'alternateur en charge il faut démarrer notre machine à vide, après certains temps nous plaçons une charge variable.

1er cas

Pour $K_g = 0.7$ avec toutes les valeurs possibles de T_g :

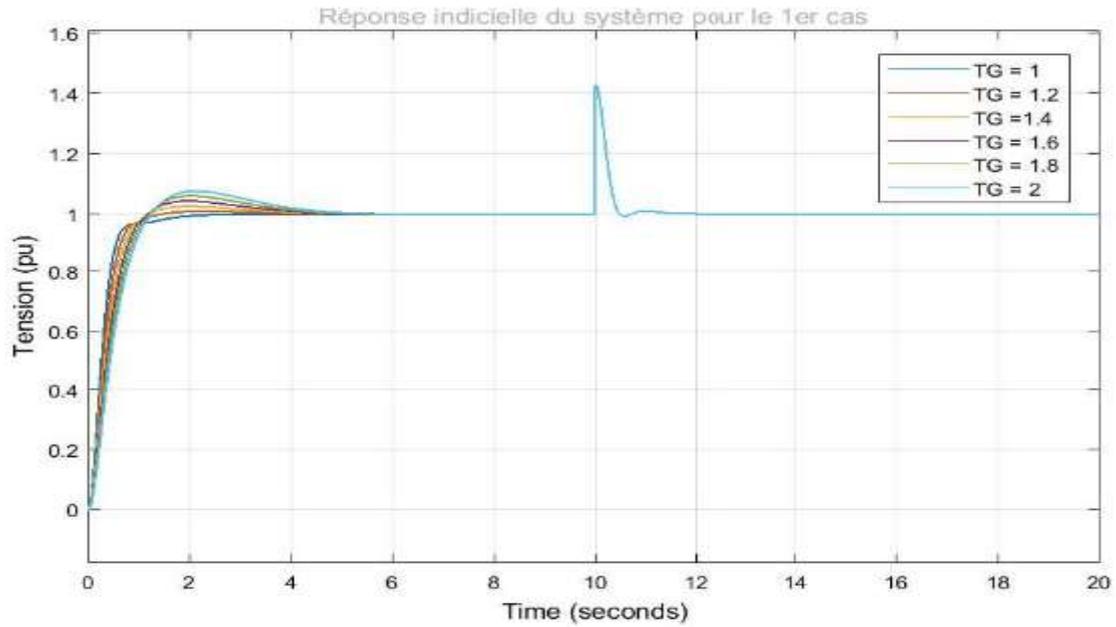


Figure 3. 6 :Réponse indicielle du système pour le 1er cas

La courbe présente la réponse du système en fonction de temps à une entrée échelon a amplitude égale à 1 pour $Kg=0.7$ après 10 sec, nous constatons que le pique de perturbation arrive à une valeur maximale de 1.429.

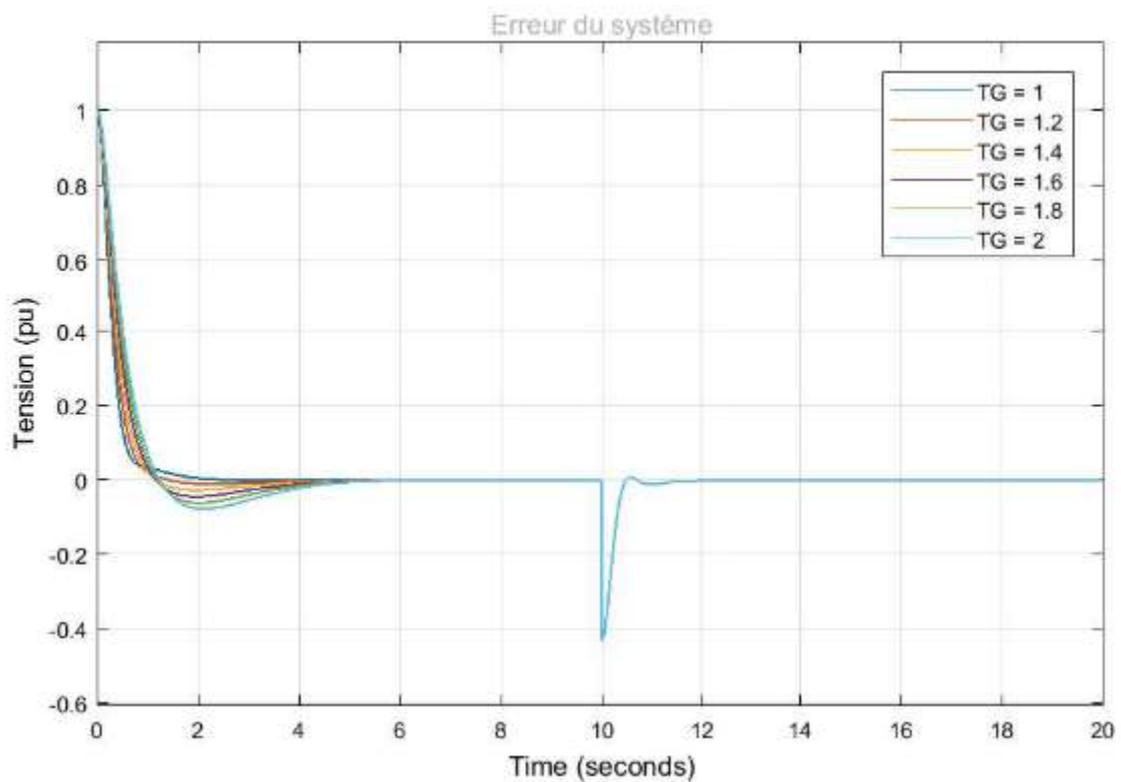


Figure 3. 7 : Erreur du système pour le 1er cas

L'erreur tend ver 0 avec une perturbation d'une valeur min de -0.4286 à l'instant $t = 10$ sec

2. 2eme cas

Pour $K_g=0.8$ avec toutes les valeurs possibles de T_g :

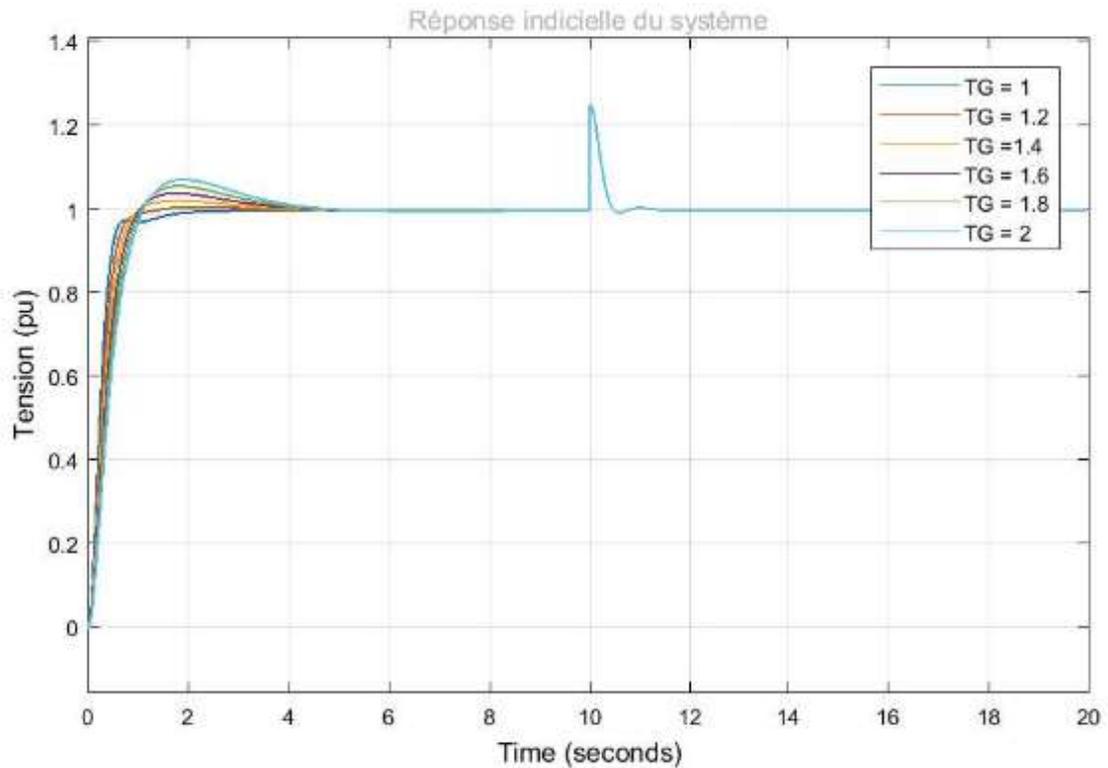


Figure 3. 8 : Réponse du système pour le 2eme cas

Nous avons fait la même chose que le 1er cas pour $K_g = 0.8$, la même remarque sauf que la perturbation arrive à une valeur de 1.25.

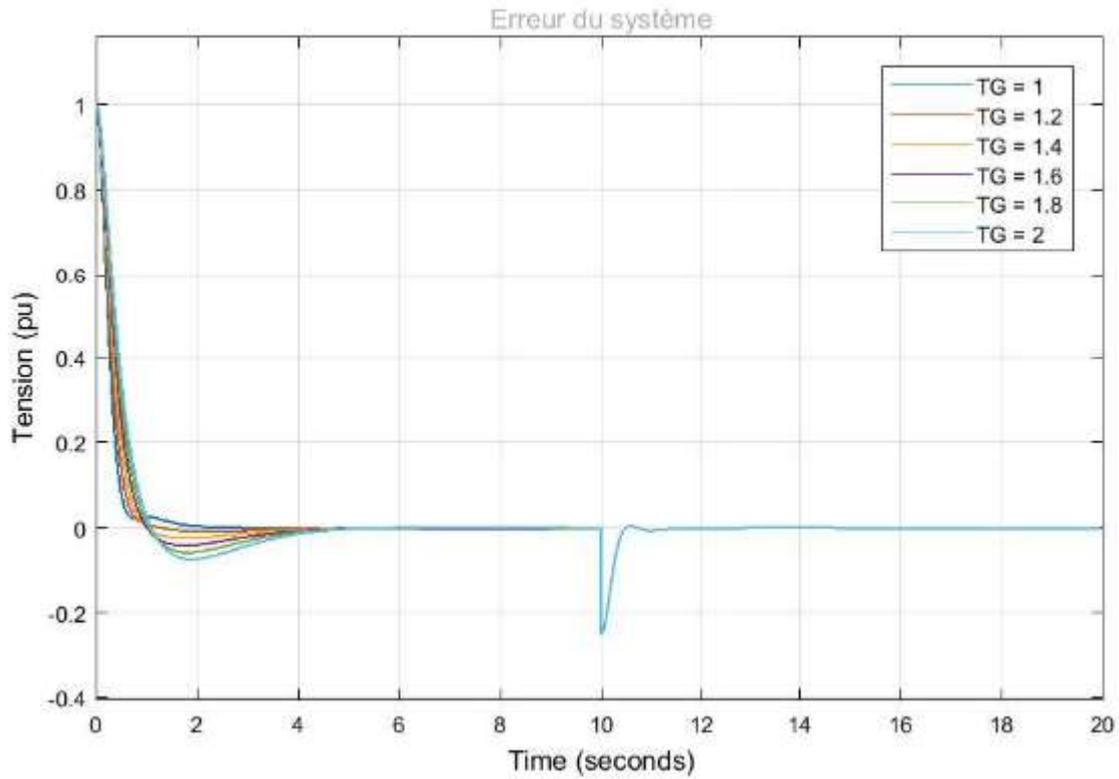


Figure 3. 9 : Erreur du système pour le 2ème cas

La même erreur que le 1er cas mais à une valeur de -0.25

3. 3eme cas

Pour $K_g=0.9$ avec toutes les valeurs possibles de T_g :

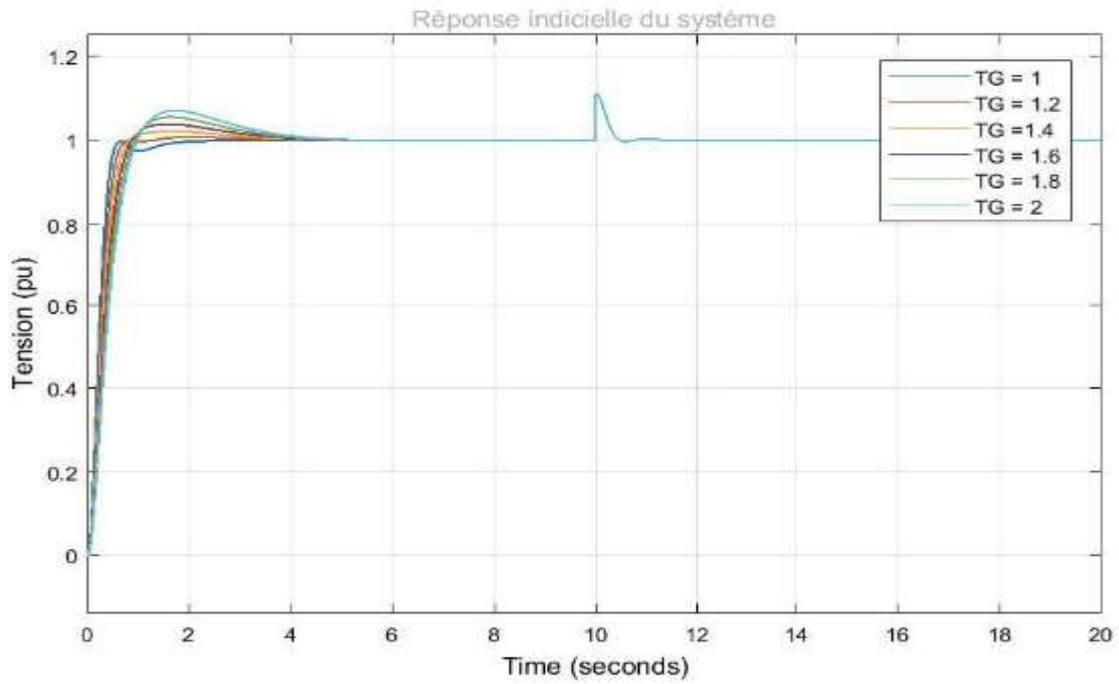


Figure 3. 10 : Réponse du système pour le 3ème cas

La même remarque mais la perturbation augmente à une valeur de 1.15.

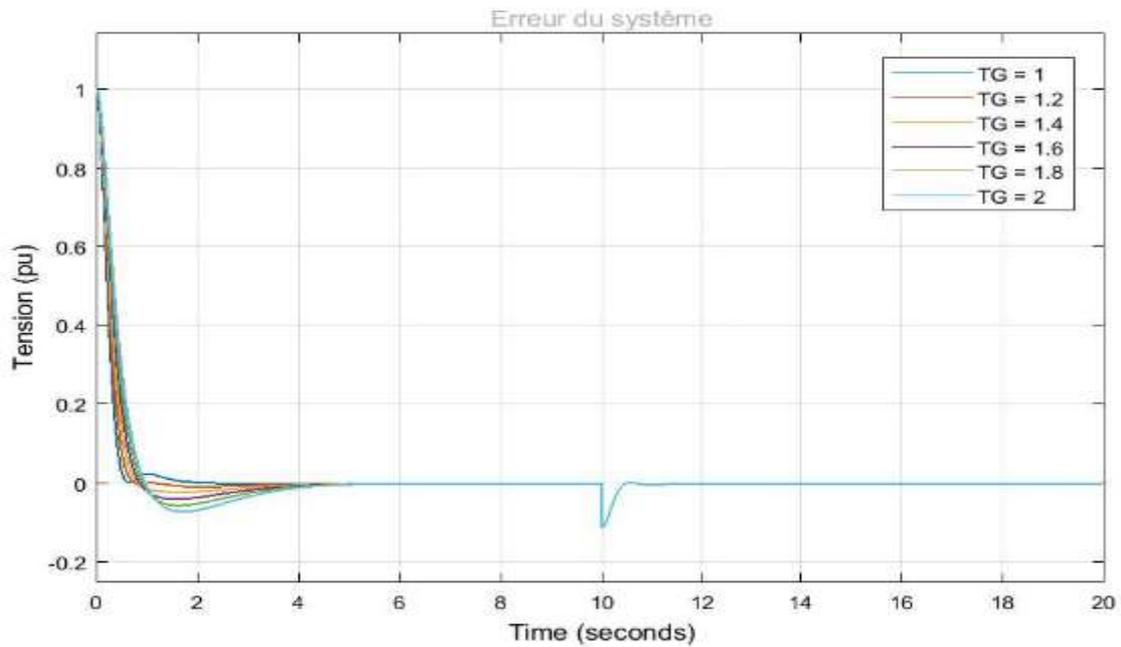


Figure 3. 11 : Erreur du système pour le 3ème cas

La même erreur avec une perturbation d'amplitude de -1.15.

4. 4eme cas

Pour $K_g=1$ avec toutes les valeurs possibles de T_g :

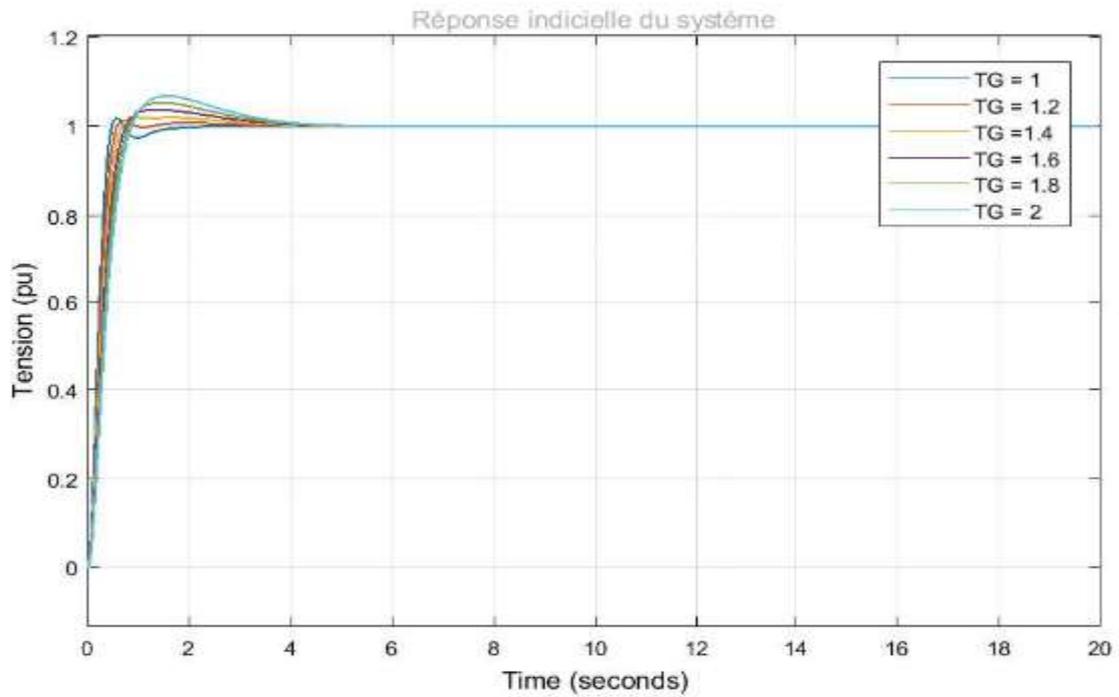


Figure 3. 12 : Réponse du système pour le 4ème cas

Dans ce cas on remarque qu'il n'y a aucune perturbation

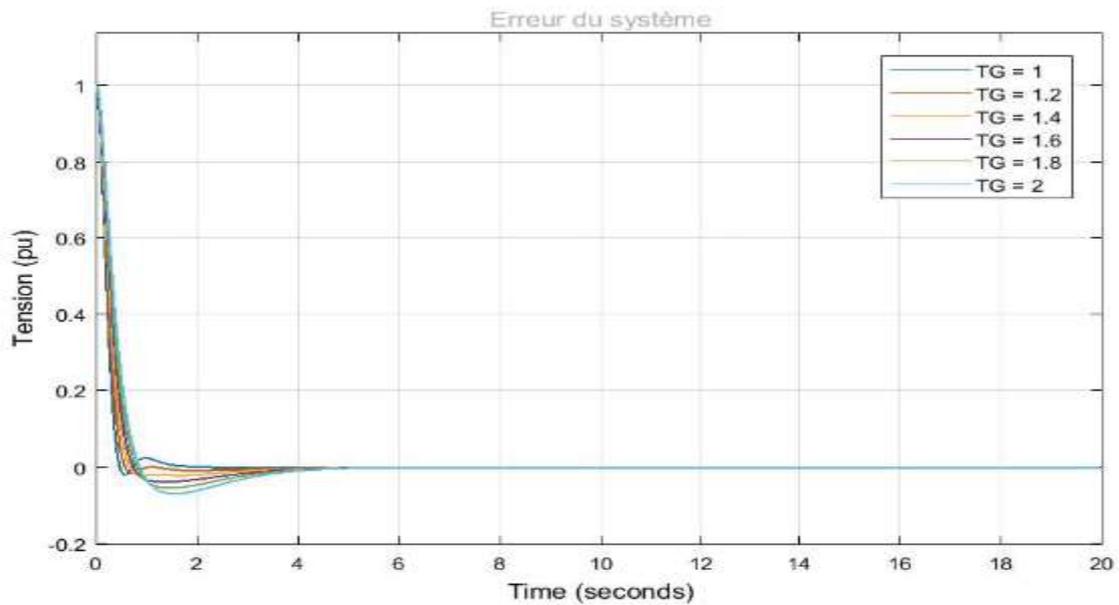


Figure 3. 13 : Erreur de système pour le 4ème cas

Pas de perturbation donne l'erreur de 4eme cas.

3.11 Résultats et discussion

D'après le tableau 3.5 et la figure 3.10. Il ressort que lorsque OF4 est choisi comme fonction objectif, la performance du système AVR contrôlé par PID améliore encore de dépassement minimal et temps de stabilisation minimum. Par conséquent, les paramètres du contrôleur obtenus en prenant OF4 comme fonction objective sont choisis pour une analyse plus approfondie.

Pour la régulation en charge nous avons placé une charge après un certain temps après le démarrage de notre alternateur de puissance par quatre cas de variation de cette charge, nous avons remarqué dans les réponses indicielles de tension qu'un pique de tension à l'instant du placement de la charge, l'amplitude du pique diminue avec le changement de variable jusqu'à sa disparition pour le 4eme objectif.

3.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié et présenté la régulation de tension de sortie d'un alternateur de puissance et comme exemple nous avons pris la centrale thermique de Ras Djanet d'Algérie. Nous avons utilisé un régulateur de type PID classique en vérifiant sur le courant d'excitation de l'alternateur.

Nous avons utilisé un modèle linéaire de notre système, ce modèle a été dans plusieurs références de qualité, ce qui nous a permis d'avoir des résultats très satisfaisants, ou la sortie a bien suivi la consigne.

CHAPITRE 4

Implémentation logicielle de la commande de régulation

CHAPITRE 4 : Implémentation logicielle de la commande de régulation

4.1 Introduction

L'automatique fait partie des sciences de l'ingénieur. Il s'agit de la science des systèmes. Plus précisément, cette discipline traite de la modélisation, de l'analyse, de l'identification et de la commande des systèmes dynamiques. Elle inclut donc la cybernétique au sens étymologique du terme, et a pour fondements théoriques les mathématiques, la théorie du signal et l'informatique théorique. L'automatique permet de contrôler un système en respectant un cahier des charges (rapidité, dépassement, stabilité) [42].

Dans ce chapitre on va introduire les Api spécifiquement notre api qui on a utilisé (S7-300) et sa logicielle de programmation (TIA portal) et faire l'implémentation logicielle de la commande de régulation.

4.2 Matériel utilisé

Pour notre projet on a utilisé :

- ✓ API s7-300
- ✓ Boutons poussoirs (marche /arrêt).
- ✓ Capteur cos phi mètre.
- ✓ Transformateur de tension.
- ✓ Transformateur de courant.
- ✓ Contacteur.
- ✓ Interface IHM.

4.3 Définition d'un API

Un automate programmable industriel (API) est un appareil électronique spécialisée dans la conduite et la surveillance en temps réel de processus industriels et tertiaires.

Il exécute une suite d'instructions introduites dans sa mémoire sous forme de programme et s'apparente par conséquent aux machines de traitement d'information.

Trois caractéristiques fondamentales le distinguent totalement des outils d'informatiques tels que les ordinateurs utilisés dans les entreprises et tertiaires [43] :

-  Connexion directe aux différents capteurs et actionneurs grâce à ces entrées/sortie
-  Fonctionnement dans des conditions industrielles sévères (température, vibrations, humidité, microcoupure de l'alimentation en énergie électrique...)

- ✚ Son aspect pratique grâce à la possibilité de sa programmation en utilisant Un langage spécialement développé pour le traitement de fonctions d'automate (SIMATIC S7).

4.3.1 Critères de choix d'un automate

Le choix d'un automate programmable est en premier lieu le choix d'une société ou d'un groupe et les contacts commerciaux et expériences vécues sont déjà un point de départ. Les grandes sociétés privilégieront deux fabricants pour faire jouer la concurrence et pouvoir "se retourner" en cas de "perte de vitesse" de l'une d'entre elles. Un automate utilisant des langages de programmation de type GRAFCET est également préférable pour assurer les mises au point et dépannages dans les meilleures conditions. La possession d'un logiciel de programmation est aussi source d'économies (achat du logiciel et formation du personnel). Des outils permettant une simulation des programmes sont également souhaitables. Il faut ensuite quantifier les besoins :

- ✚ Nombre d'entrées / sorties : le nombre de cartes peut avoir une incidence sur le nombre de racks dès que le nombre d'entrées / sorties nécessaires devient élevé.
- ✚ Type de processeur : la taille mémoire, la vitesse de traitement et les fonctions spéciales offertes par le processeur permettront le choix dans la gamme souvent très étendue.
- ✚ Fonctions ou modules spéciaux : certaines cartes (commande d'axe, pesage ...) permettront de "soulager" le processeur et devront offrir les caractéristiques souhaitées (résolution, ...).
- ✚ Fonctions de communication : l'automate doit pouvoir communiquer avec les autres systèmes de commande (API, supervision ...) et offrir des possibilités de communication avec des standards normalisés (Profibus ...).

Parmi les nombreux API se trouvant sur le marché, nous avons sélectionné l'API S7-300 CPU314-2PN/DP, pour l'application réalisée.

4.3.2 Description de l'Automate S7-300

L'automate utilisé dans notre projet appartient à la gamme SIMATIC S7 de SIEMENS ; le S7300 est un mini-automate modulaire pour les applications d'entrée et de milieu de gamme, avec possibilité d'extensions jusqu'à 32 modules, et une mise en réseau par l'interface Multipoint (MPI), PROFIBUS et Industriel Ethernet. Ils permettent de réaliser de nombreuses autres fonctions grâce à des modules intelligents que l'on dispose sur un ou plusieurs racks. Ces modules ont l'avantage de ne pas surcharger le travail de la CPU car ils disposent bien souvent de leur propre processeur. [45] Il se compose de :

- Une alimentation.
- Une unité centrale ou CPU :

La figure III.1 montre les organes de commande et de visualisation d'une CPU.

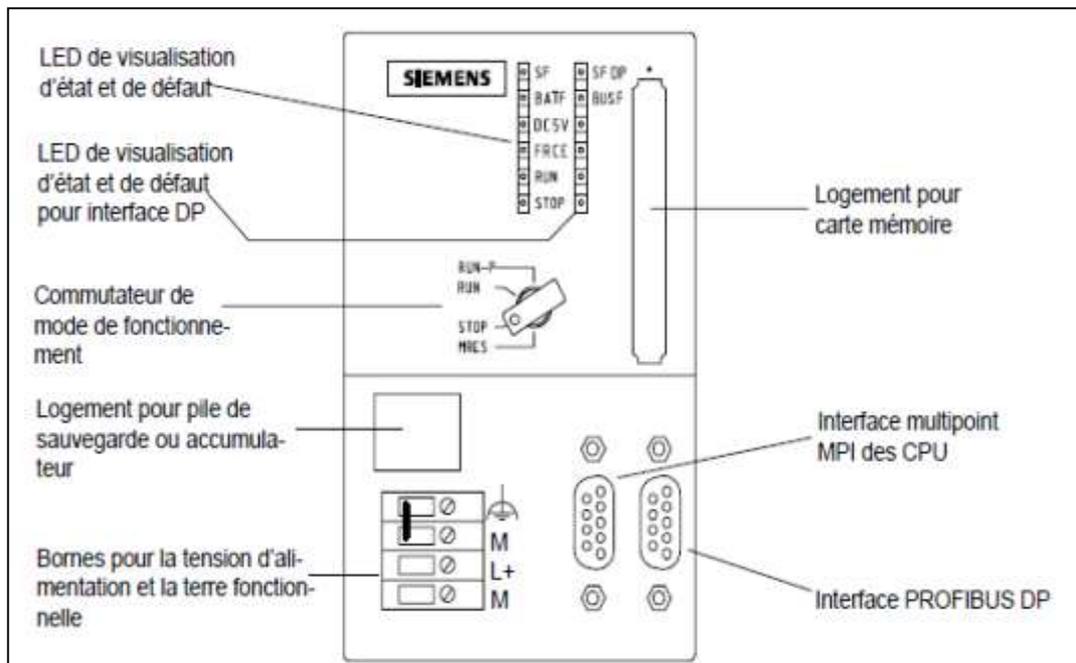


Figure 4. 1 : Organes de commande et de visualisation des CPU [46]

Sur certaines CPU, la disposition des organes diffère de celle représentée ici. Les CPU ne disposent pas toujours de tous les organes représentés.

- De modules I/O digitales ou analogiques.
- De cartes intelligentes métier ou coupleurs de communication pour dialoguer avec le monde extérieur.
- Un ou plusieurs bus de communication pour le dialogue entre la CPU et tous ces modules.
- Un système d'exploitation dans la CPU.
- De la mémoire dans la CPU répartie en différentes zones, MIE, MIS, Bits internes, tempos, compteurs, données, programme.
- Pour créer le programme, un atelier logiciel, STEP 7

4.3.2.1 Caractéristiques techniques

24 CPU standards : avec interface Ethernet/PROFINet intégrée, CPUS de sécurité, CPU compactes avec fonctions technologiques et périphéries intégrées, CPU technologiques pour la gestion des fonctions motion control ·

Modules d'E/S TOR et analogiques pour la quasi-totalité des signaux avec possibilité de traitement des interruptions et du diagnostic · Modules pour emploi dans des zones à atmosphère explosive.

4.3.3 Avantages de l'automate S7-300

L'automate S7-300, présente de nombreux avantages [47], cités ci-dessous :

- ✓ Une construction compacte et modulaire, libre des contraintes de configuration.
- ✓ Une riche gamme de modules adaptés à tous les besoins du marché, est utilisable en architecture centralisée.
- ✓ Une large gamme de CPU.
- ✓ Une large plage de température de -25°C à +60°C.
- ✓ Une meilleure tenue aux sollicitations mécaniques.
- ✓ Une résistance à la pollution par des gaz nocifs, de la poussière et d'humidité de l'air.

4.4 Logiciels de programmation

Il existe de nombreux logiciels de programmation d'API ou d'IHM tels que chaque marque d'api contient un logiciel spécial.

Dans notre cas nous avons adopté le logiciel TIA PORTAL, pour la configuration et la programmation de l'API s7-300 et notre IHM siemens.

4.4.1 Description du logiciel TIA (Totally Integrated Automation) portal

La plateforme Totally Integrated Automation Portal est le nouvel environnement de travail Siemens qui permet de mettre en œuvre des solutions d'automatisation avec un système d'ingénierie intégré comprenant les logiciels SIMATIC STEP 7 V13 et SIMATIC WinCC [9].

4.4.2 STEP 7

SIMATIC STEP 7 Basic (TIA Portal) est une version économique et allégée du logiciel pour contrôleur STEP 7 Professional Controller Software dans le TIA Portal, pouvant être utilisé à la fois pour l'ingénierie des microcontrôleurs SIMATIC S7-300 et la configuration des SIMATIC HMI Basic Panels, étant donné que WinCC Basic fait partie intégrante de l'ensemble des logiciels.

4.4.2.1 Vue du portal et vue du projet

Lorsque l'on lance TIA Portal, l'environnement de travail se décompose en deux types de vue :

- **La vue du portal** : Elle est axée sur les tâches à exécuter et sa prise en main est très rapide.
- **La vue du projet** : Elle comporte une arborescence avec les différents éléments du projet. Les éditeurs requis s'ouvrent en fonction des tâches à réaliser. Données, paramètres et éditeurs peuvent être visualisés dans une seule et même vue.

A) Vue du portal

Chaque portail permet de traiter une catégorie de tâche (actions). La fenêtre (Figure IV.2) affiche la liste des actions pouvant être réalisées pour la tâche sélectionnée.

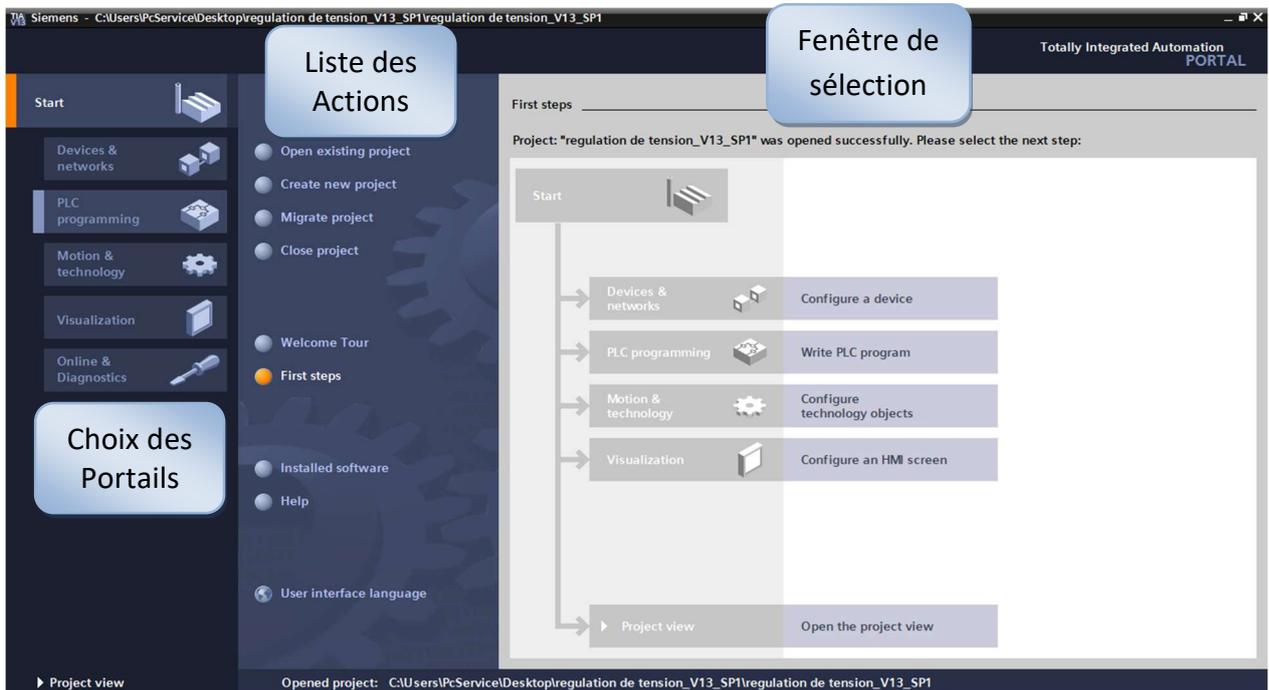


Figure 4. 2 : Vue du portail.

B) Vue du projet

L'élément « Projet » contient l'ensemble des éléments et des données nécessaires pour mettre en œuvre la solution d'automatisation souhaitée.

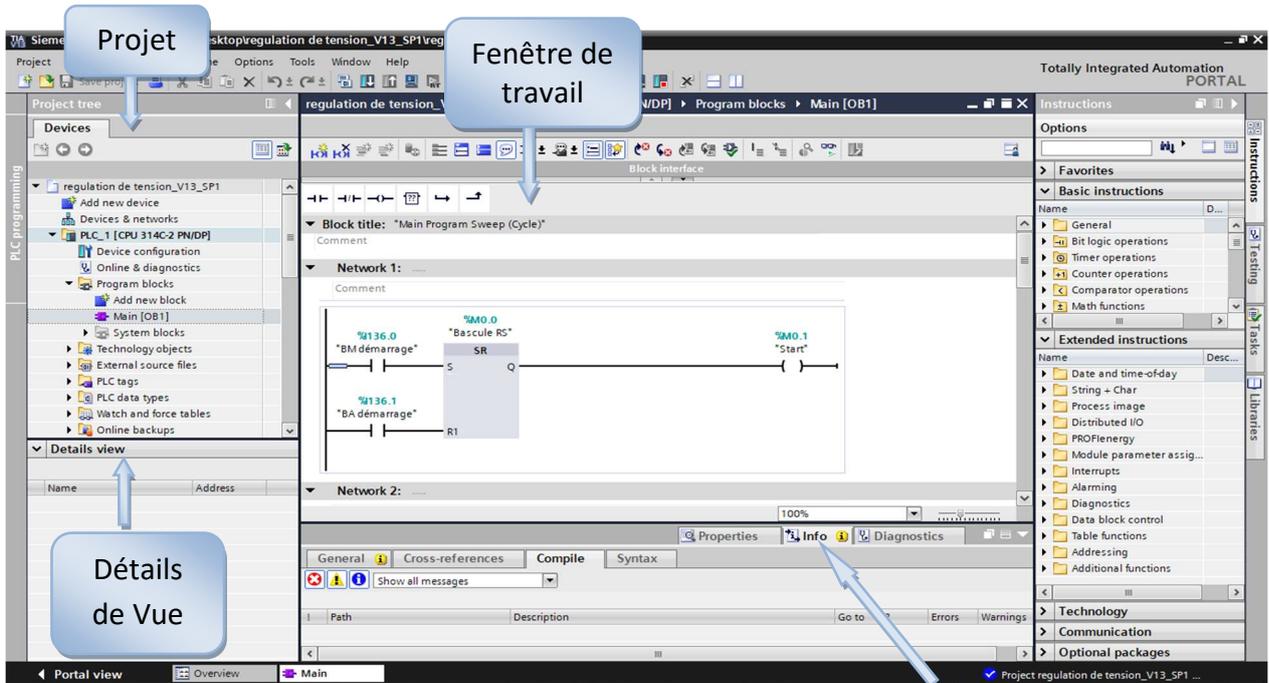


Figure 4. 3 : Vue du projet.

Fenêtre d'inspection

- **La fenêtre de travail** : permet de visualiser les objets sélectionnés dans le projet pour être traités. Il peut s'agir des composants matériels, des blocs de programme, des tables des variables, des HMI, ...
- **La fenêtre d'inspection** : permet de visualiser des informations complémentaires sur un objet sélectionné ou sur les actions en cours d'exécution (propriété du matériel sélectionné, messages d'erreurs lors de la compilation des blocs de programme...).
- **Les onglets de sélection de tâches** : sont un contenu qui varie en fonction de l'objet sélectionné (configuration matérielle, bibliothèques des composants, bloc de programme, instructions de programmation).

Cet environnement de travail contient énormément de données. Il est possible de masquer ou réduire certaines de ces fenêtres lorsque l'on ne les utilise pas. Il est également possible de redimensionner, réorganiser, désancrer les différentes fenêtres.

4.4.2.2 Création d'un projet et configuration

Pour créer un projet et configurer on doit effectuer les étapes suivantes :

A) Création d'un projet

Pour créer un projet dans la vue du portail il faut d'abord ouvrir l'logiciel TIA PORTAL après sélectionné l'action « créer un projet » (Figure IV.4) et donné un nom au projet après il suffit de cliquer sur le bouton « créer ».

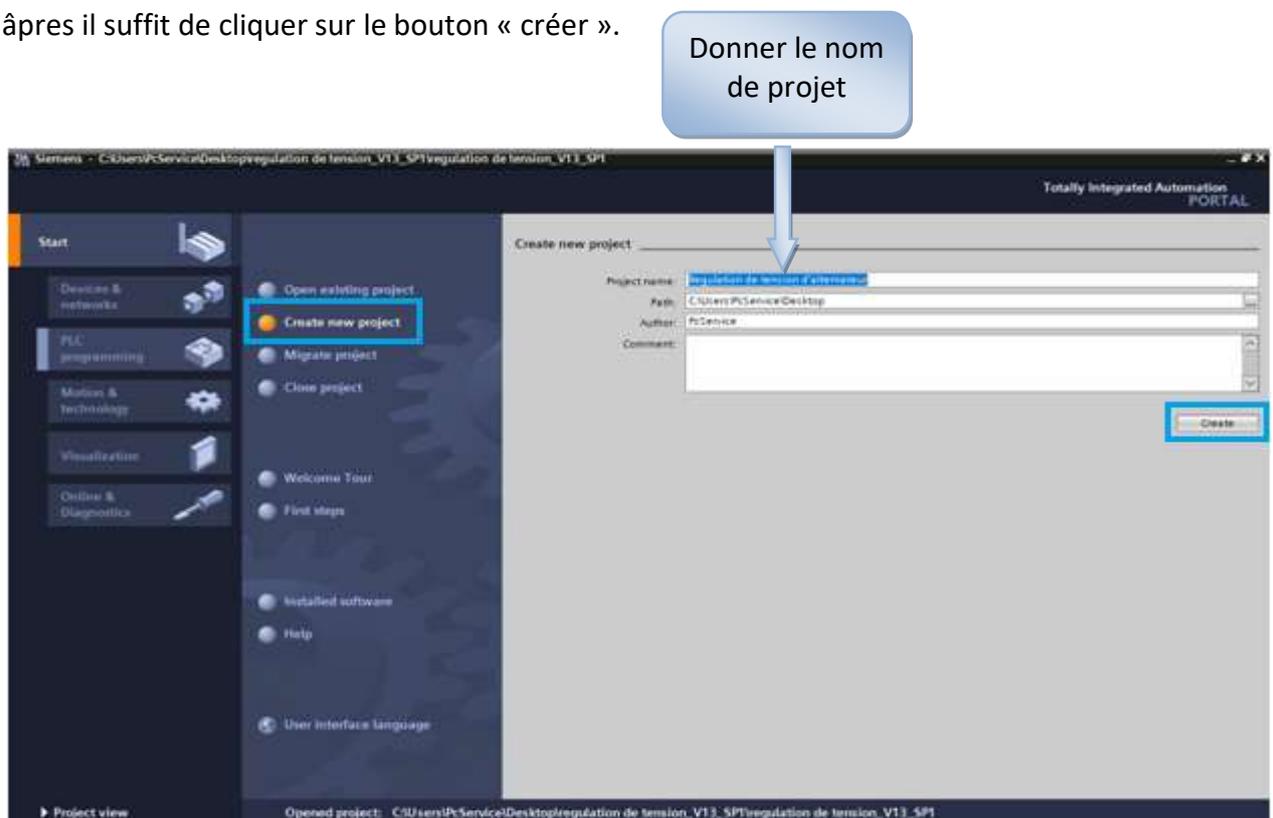


Figure 4. 4 : Création d'un projet

B) Configuration du matériel

Lorsque le projet est créé on peut configurer station de travail suivant ces étapes :

- ✓ Définir le matériel existant.
- ✓ Cliquer sur « Ajouter un appareil ».
- ✓ Faire le choix de la CPU.
- ✓ Ajouter les modules complémentaires (alimentation, E/S TOR ou analogiques, module de communication...).

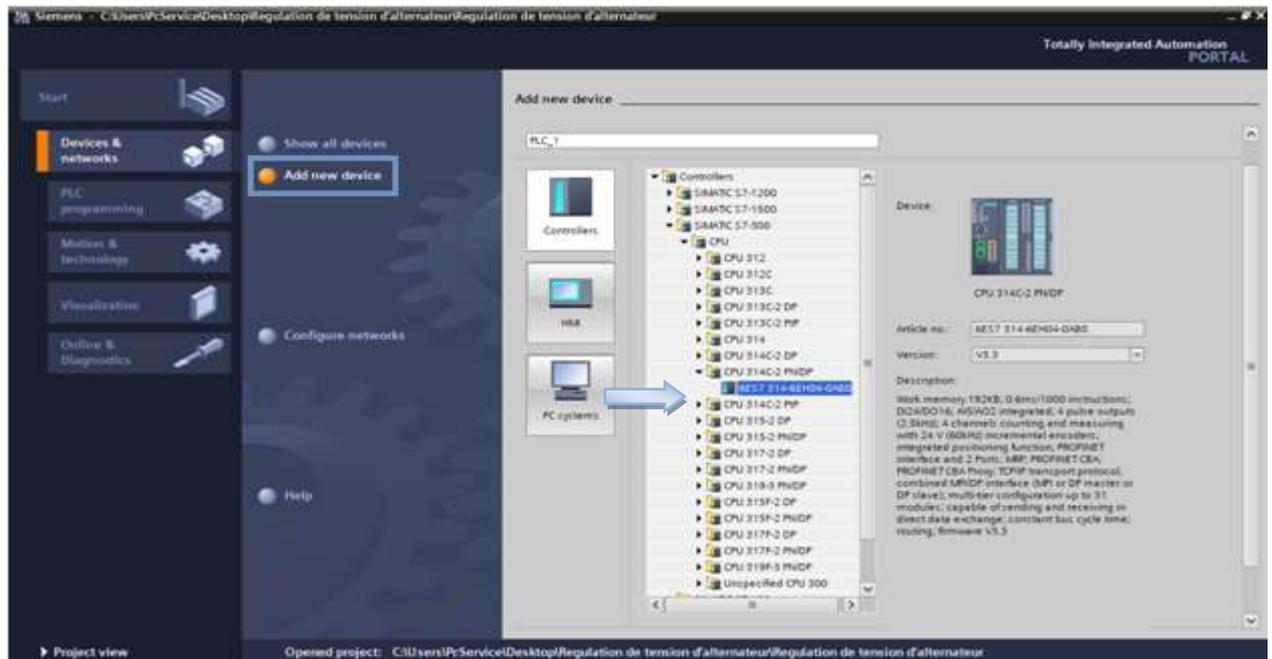


Figure 4. 5 : Configuration matérielle

4.4.2.3 Adressage des E/S

Pour connaître l'adressage des entrées et sorties présentes dans la configuration matérielle, il faut aller dans « appareil et réseau » dans le navigateur du projet. Dans la fenêtre de travail, on doit s'assurer d'être dans l'onglet « Vue des appareils » et de sélectionner l'appareil voulu [48].

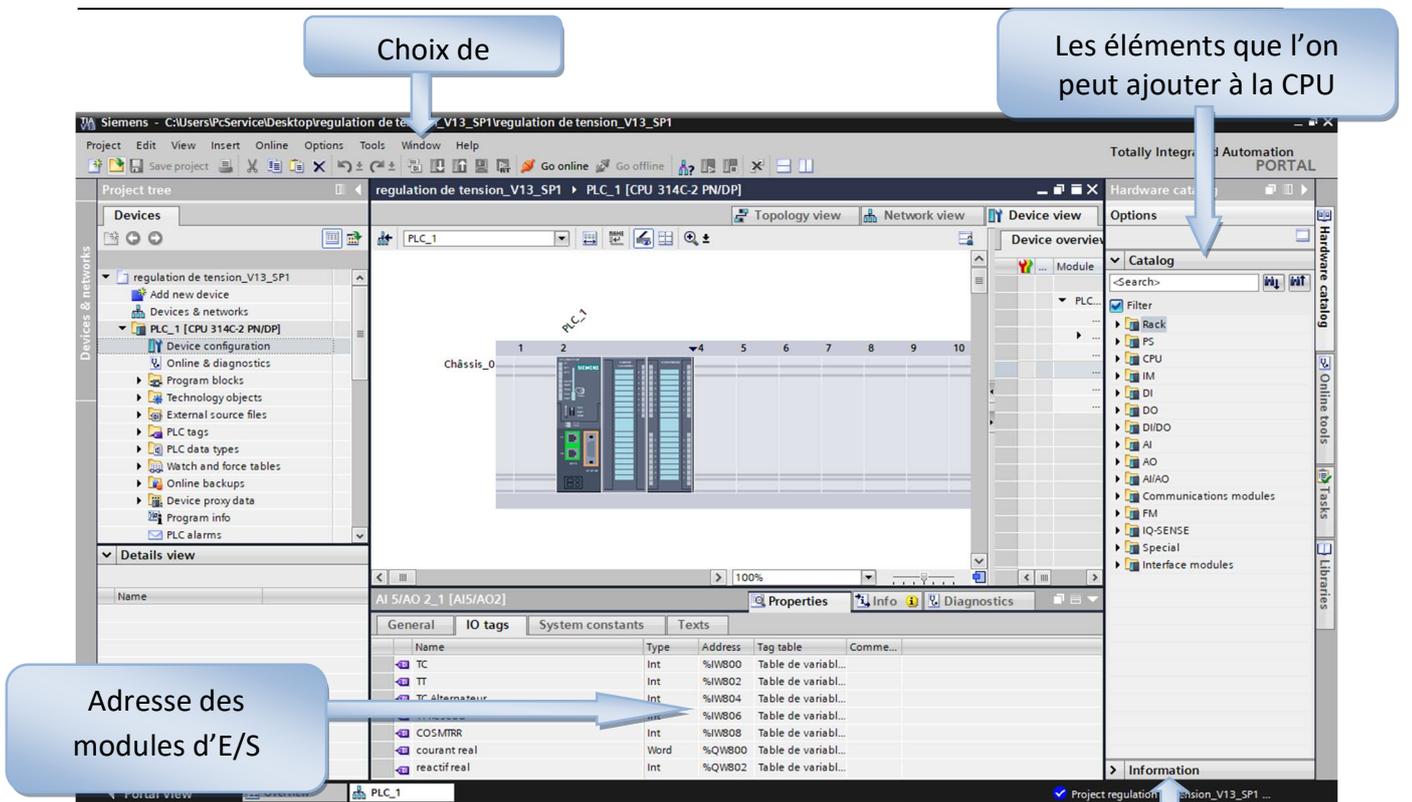


Figure 4. 6 : Adressage E/S

Il existe deux types d'adressage :

Adressage lié à l'emplacement : il s'agit du mode d'adressage par défaut, c'est à dire que le step7 effectue à chaque numéro d'emplacement, une adresse de défaut du modèle fixé à l'avance. Dans le cas de cet adressage, (adressage par défaut), une adresse de début de module est affectée à chaque numéro d'emplacement sur le profilé support (châssis).

Adressage libre : dans ce mode d'adressage, il faut effectuer à chaque mode une adresse de son choix, pourvu qu'elle soit continue dans la plage d'adresses possible de la CPU.

- ✚ **Adressage absolu des modules de signaux** Ce type d'adressage est nécessaire, pour adresser les voies des modules de signaux dans le programme utilisateur. Chaque sortie possède une adresse absolue, déterminée par la configuration matérielle.
- ✚ **Adressage des modules TOR** L'adressage d'une entrée ou d'une sortie, est constitué d'une adresse d'octet et d'une adresse de bit. Ainsi, l'adressage d'octet dépend de l'adresse de début de module et l'adressage de bit, est indiqué sur le module.
- ✚ **Adressage des modules analogiques** L'adressage d'une voie d'entrée ou d'une sortie analogique, est toujours une adresse de mot. L'adresse de la voie dépend de l'adresse de début du module. Si le premier module analogique occupe l'emplacement 4, l'adresse de début par défaut est 256. L'adresse de début de chaque module analogique suivant, est incrémentée de 16 par emplacement. Les voies d'entrée et de sortie analogique, d'un module d'E/S analogique a la même adresse de début.

4.4.2.4 Table des variables API

Il suffit d'aller dans la table des variables et intégrer les différents éléments, le nom du symbole, son adresse réelle, sont type et son commentaire.

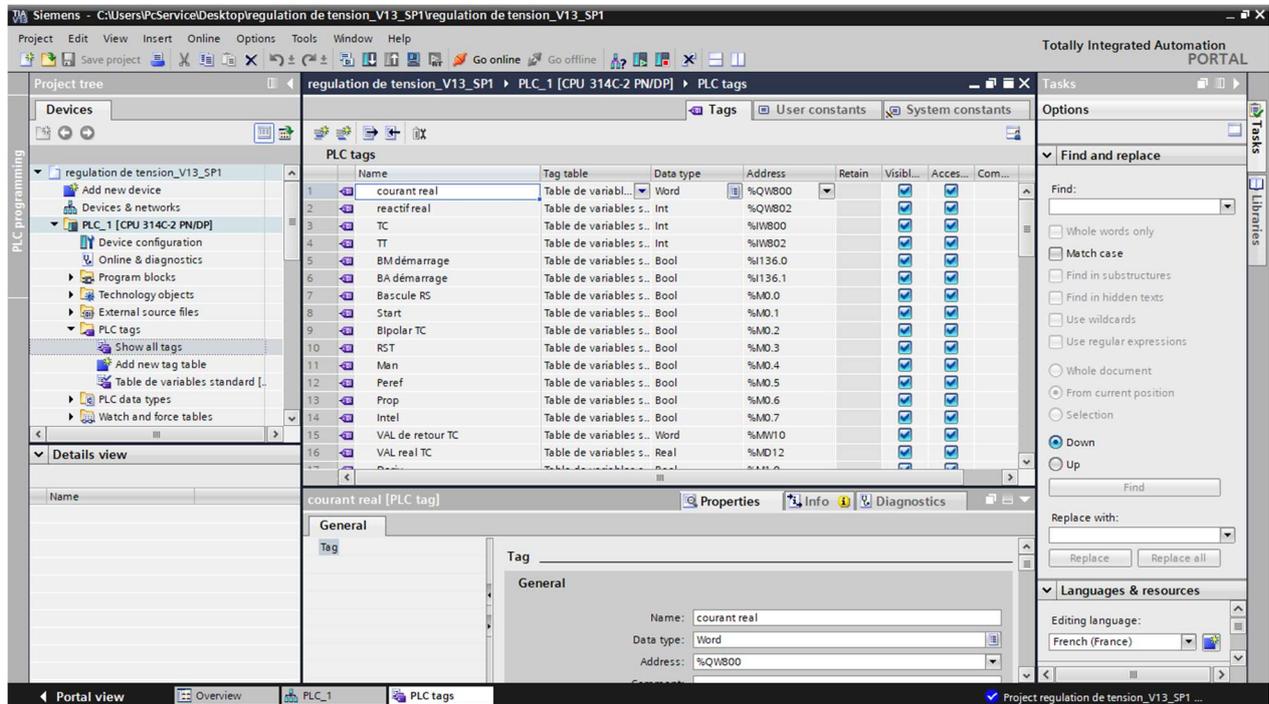


Figure 4. 7 : Partie de la table des variables

E) Mémentos

Les mémentos sont utilisés pour les opérations internes à l'automate, pour lesquelles l'émission d'un signal, n'est pas nécessaire. Les mémentos sont des bistables servant à mémoriser les états logiques 0 ou 1. Chaque automate programmable, dispose d'un grand nombre de mémentos (S7-300 dispose de 2048 bits de mémentos). Ces derniers sont programmés, comme des sorties. En cas de panne de la tension de service, le contenu sauvegardé dans les mémentos, est perdu.

F) Bloc du programme utilisateur

Ces blocs destinés à structurer le programme utilisateur, sont donnés par les blocs suivants :

- ✚ **Bloc d'organisation (OB)** : Les blocs d'organisations (OB) constituent l'interface entre le système d'exploitation de la CPU et le programme utilisateur.
- ✚ Il gère le traitement du programme cyclique et déclenche par alarme, la mise en route de l'API et le traitement des erreurs. L'OB contient l'instruction d'appel de bloc, pour ramener les autres blocs (FB, FC...) afin d'être exécutés par l'automate.
- ✚ **Bloc de donnée (DB)** : Les blocs de données sont destinés au stockage des données nécessaires, au traitement du programme. On distingue des blocs de données d'instance et des blocs de données globaux.

- ✚ **Bloc fonctionnel (FB)** : C'est un bloc programmable, rémanent, subordonné à un bloc d'organisation, afin qu'il puisse être traité par la CPU. Un bloc de données d'instance est associé à ce dernier, qui en constitue la mémoire. Il intervient dans des programmes spéciaux (programmation des régulateurs, fonction de signalisation, de calcul, de saut à l'intérieur d'un bloc, etc.).
- ✚ **Fonction (FC)** : Une fonction FC, est un bloc de codes programmables, sans mémoire. Les FC peuvent faire appel à des blocs de données globaux, pour la sauvegarde des données. Les programmes sont exécutés quand cette fonction, est appelée par d'autres blocs de code. Ce dernier se fait pour renvoyer une valeur de fonction au bloc appelant, ou pour l'exécution d'une fonction technologique.

4.4.2.5 Structure du programme proposé

L'écriture du programme utilisateur complet, se fait dans le bloc d'organisation OB1. Ce type de traitement est requis de la commande de procédés simples, exigeant des programmes de taille et des complexités réduites. Dans le cas de ce mémoire, c'est le DB1 qui est utilisé, pour le régulateur PID de notre API. La structure hiérarchique des blocs de notre système est illustrée par la (figure IV.8).

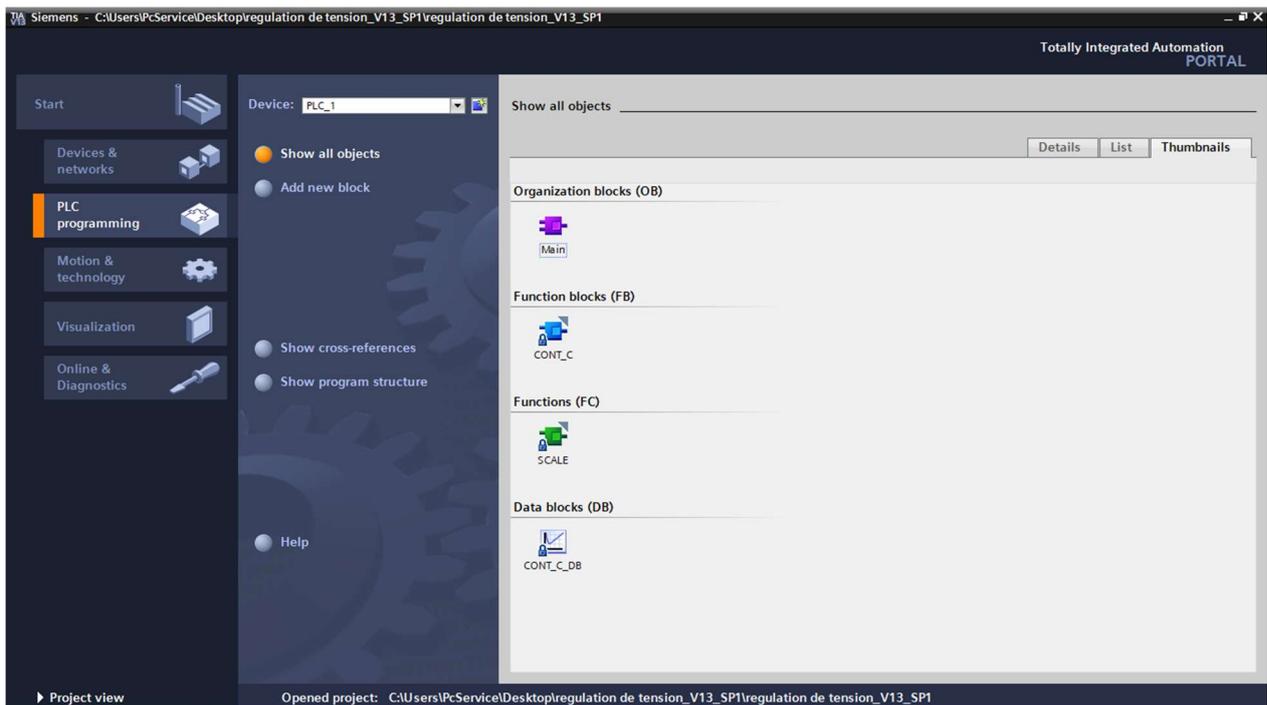


Figure 4. 8 : Vue des blocs

4.4.2.6 Compilation et chargement de la configuration matérielle

Une fois la configuration matérielle réalisée, il faut la compiler et la charger dans l'automate (Figure IV.9) d'après les deux étapes suivantes :

- ✓ Cliquer sur l'icône « compiler »

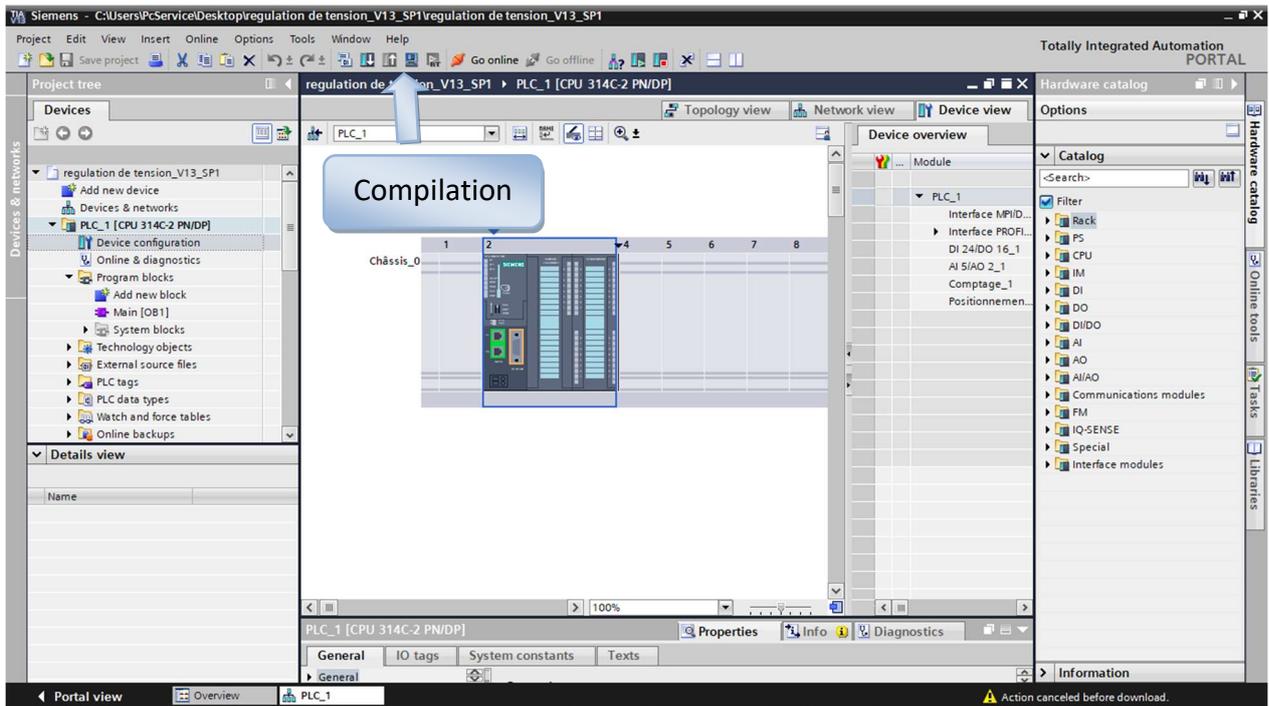


Figure 4.9 : Compilation

- ✓ Pour charger la configuration dans l'automate (figure IV.10), un clic sur l'icône « charger dans l'appareil » est effectué.

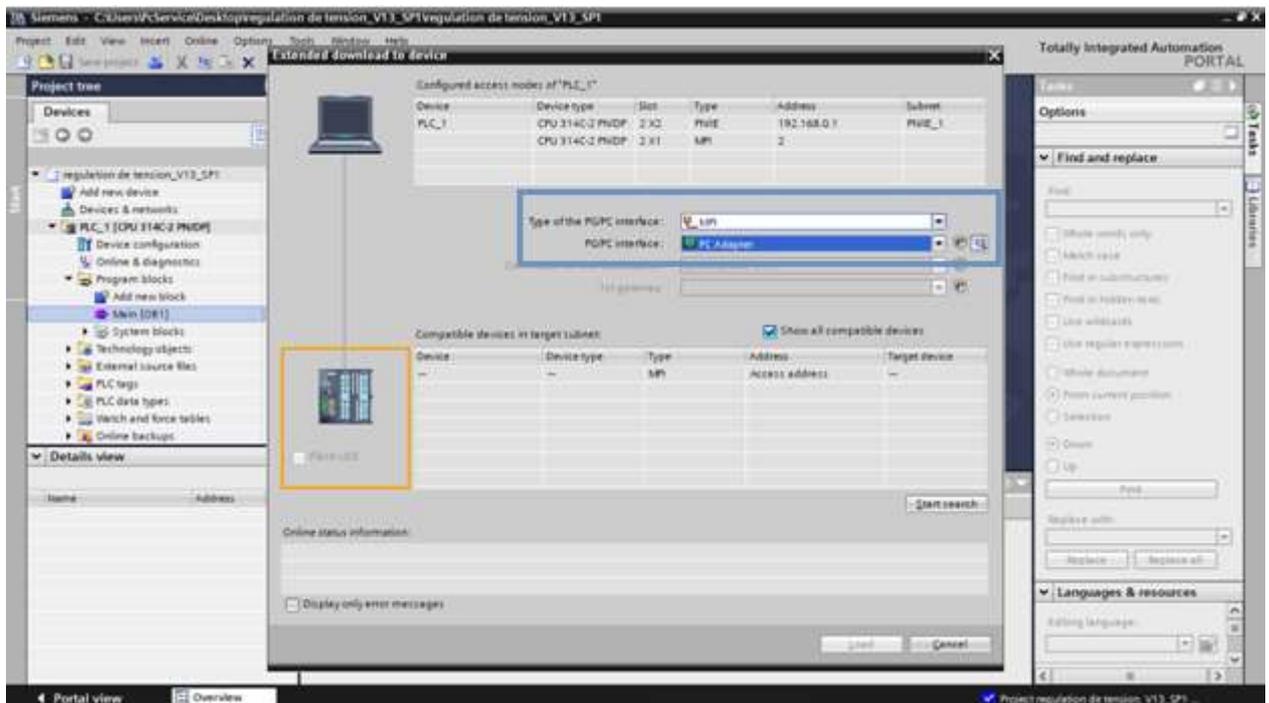


Figure 4.10 : Chargement

4.4.3 SIMATIC WinCC

WinCC (Windows Control Center), est le logiciel qui permet de créer une Interface

Homme Machine (IHM) graphique, qui assure la visualisation et le diagnostic du procédé. Il permet la saisie, l'affichage et l'archivage des données, tout en facilitant les tâches de conduite et de surveillance aux exploitants. Il offre une bonne solution de supervision, car il met à la disposition de l'opérateur des fonctionnalités adaptées aux exigences d'une installation industrielle [48].

A) Création d'un projet sous Win CC

Une fois notre projet créé, nous choisissons dans la vue portail du TIA PORTAL « configurer une vue HMI » (figure IV.11).

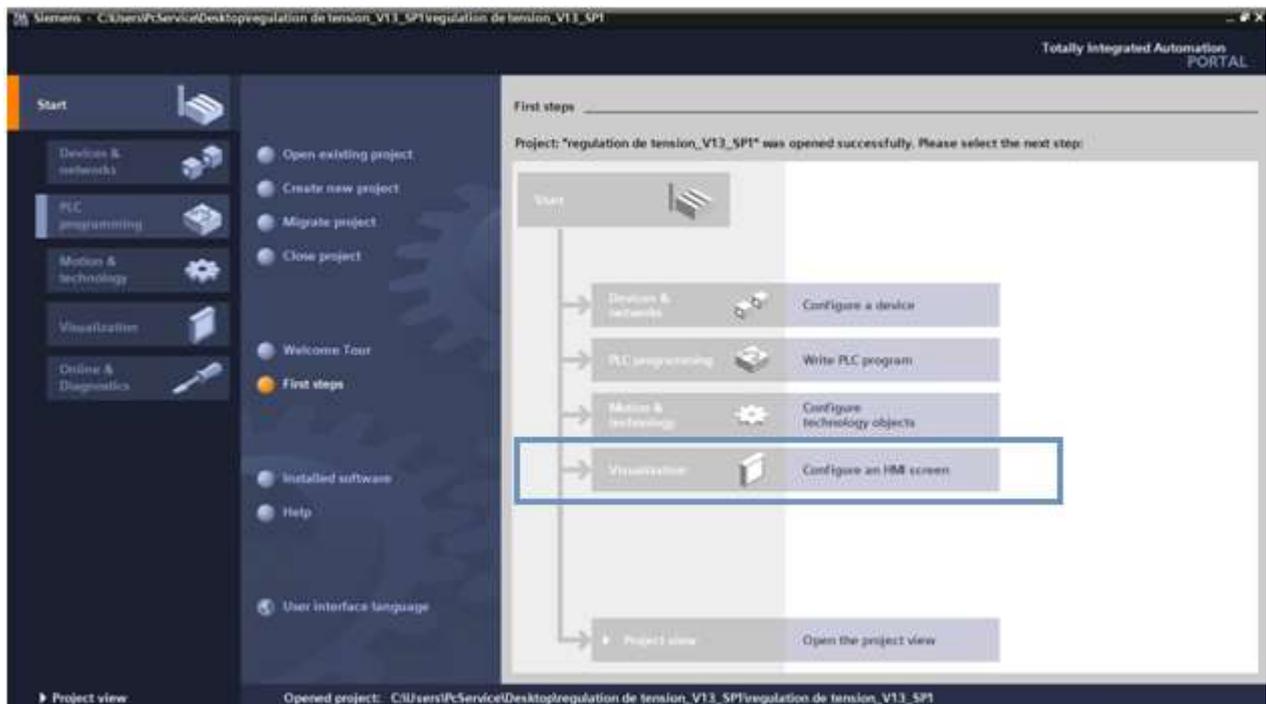


Figure 4. 11 : Configuration d'une vue IHM

Dans l'étape suivante, l'appareil adopté est ajouté (figure 4.13).

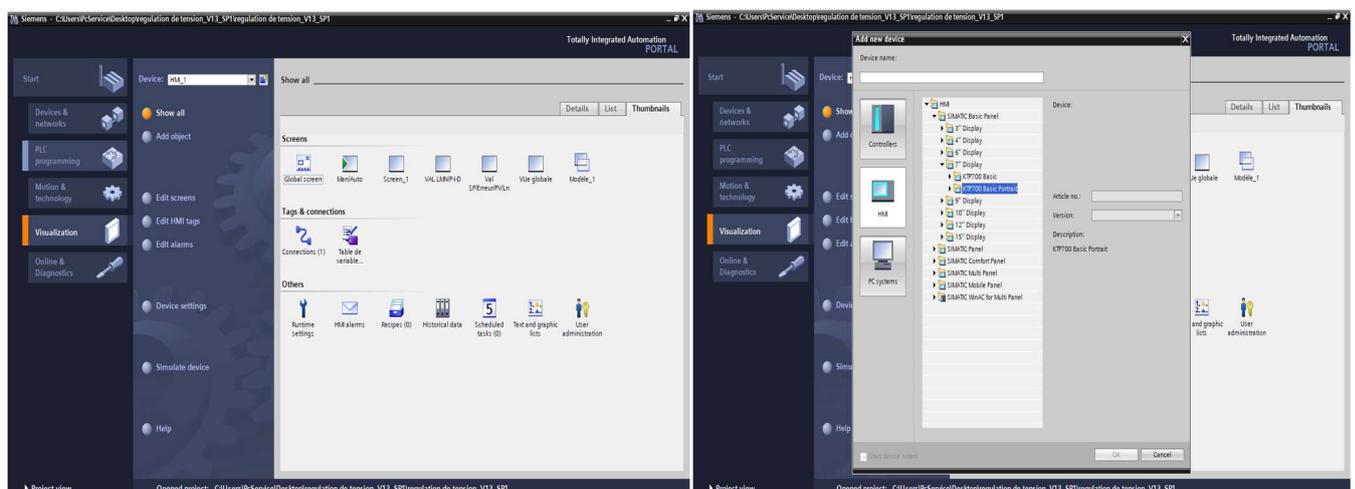


Figure 4. 12 : Ajout d'un appareil IHM

B) Fenêtre du travail dans le WinCC

Pour notre fenêtre de travail il y a quatre zones :

- ✓ **La zone de travail** : C'est dans cette zone où se fait la construction des différentes vues du projet.
- ✓ **La boîte d'outils** : Cette zone nous offre la possibilité d'importer les éléments de base nécessaires pour la création des vues (bouton, champ graphique, champ de texte, ...etc.).
- ✓ **La fenêtre de projet** : Elle affiche la structure du projet, on peut à partir de cette zone créée des vues, des variables configurées et des alarmes.
- ✓ **La fenêtre des propriétés** : Elle permet de charger ou de modifier les propriétés d'un objet sélectionné dans la zone de travail.

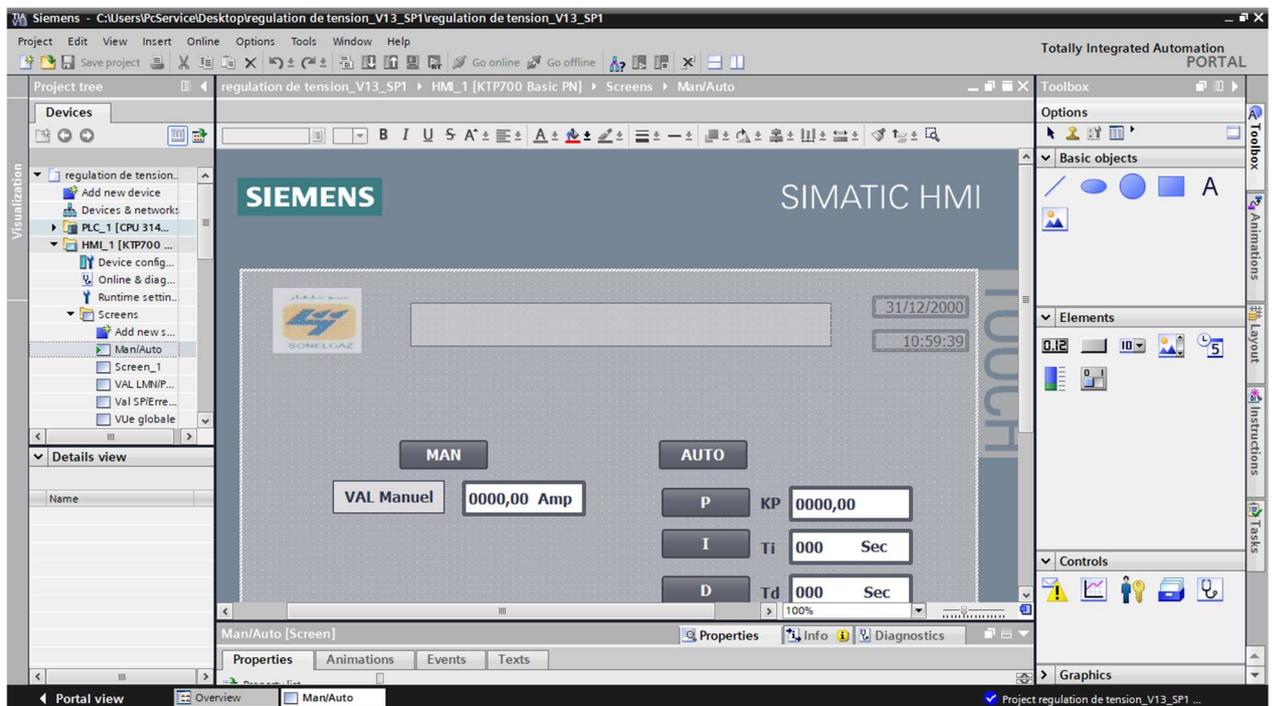


Figure 4. 13 : Fenêtre du travail dans le WinCC

4.4.4 Synoptique du système réalisé

Le système conçu comporte un bloc principal constitué d'un API siemens, qui est commandé par une plaquette de commande et un IHM. Ce t API est connectée à un ensemble de périphériques, constitués par des capteurs et des actionneurs.

4.4.5 Choix du matériel

Le matériel sélectionné, est représenté par deux parties principales : la configuration et les auxiliaires des commandes automatiques.

➤ Partie configuration

Après identification générale des entrées /sorties, nous utilisons dans notre projet ; 2 entrées TOR, 5 entrées analogiques et 2 sorties analogiques.

La configuration matérielle de notre projet, est illustrée par la (figure IV.13).

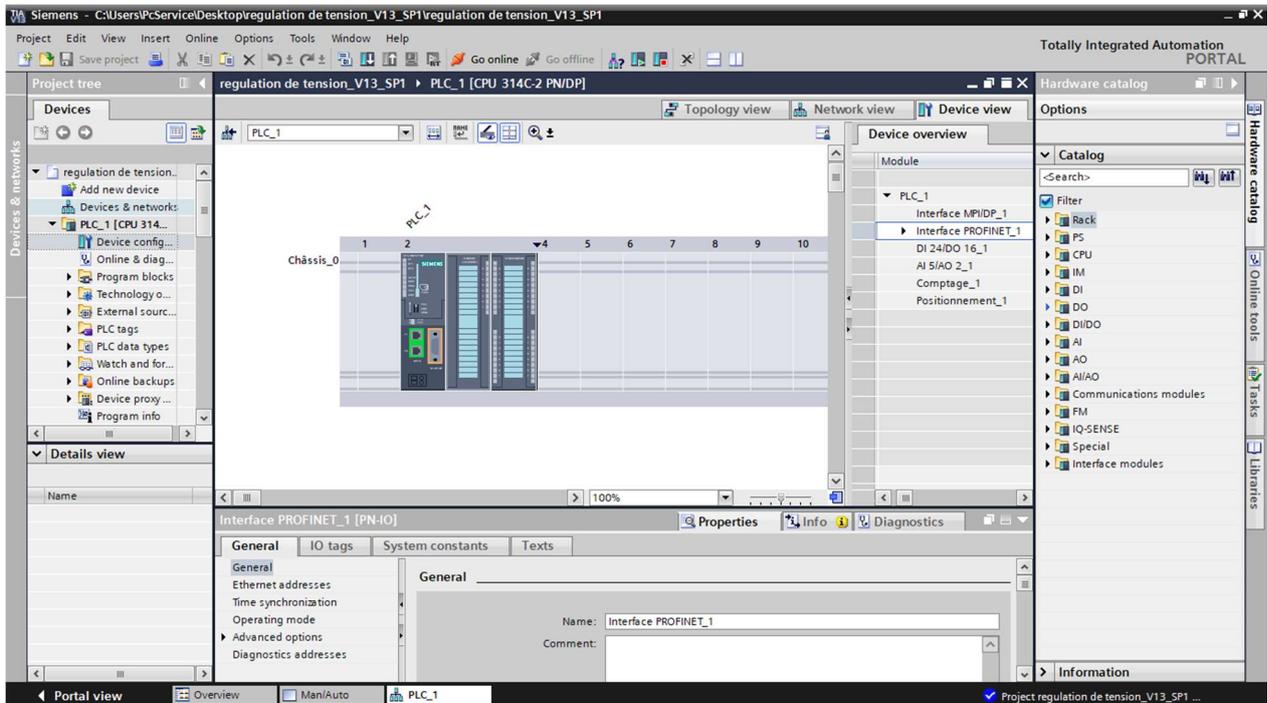


Figure 4. 14 : Configuration matérielle

➤ Parties des auxiliaires de commande automatique

Cette partie est composée des éléments suivants :

A) Capteurs

On distingue les éléments suivants :

✚ Boutons poussoirs (marche /arrêt)

Est un interrupteur simple qui permet de contrôler les capacités d'un processus.



Figure 4. 15 : Boutons poussoirs (marche /arrêt)

Capteur cos phi mètre

Le cosinus phi représente la valeur du déphasage angulaire entre la tension et l'intensité du courant dans un circuit alternatif.



Figure 4. 16 : Capteur Cosinus phi mètre

Transformateur de tension

Ce transformateur est l'un des moyens pour mesurer des tensions alternatives élevées. Il s'agit d'un transformateur qui a la particularité d'avoir un rapport de transformation étalonné avec précision, mais prévu pour ne délivrer qu'une très faible charge au secondaire, correspondant à un voltmètre. Le rapport de transformation permet de mesurer des tensions primaires s'exprimant en kilovolts (kV). On le rencontre en HTA et HTB. D'autres technologies existent, comme celle du diviseur capacitif [66].



Figure 4.16 : Transformateur de tension

Transformateur de courant

Un transformateur de courant est un appareil utilisé pour la transformation du courant à une valeur supérieure à une valeur inférieure au potentiel de la terre. Il est

utilisé avec les instruments à courant alternatif pour mesurer la valeur élevée du courant.



Figure 4.17 : Transformateur de courant

✓ **SIMATIC Basic Panel Siemens KTP700 Basic PN**

Le SIMATIC Basic Panel Siemens KTP700 est représenté par la figure IV.18, suivant les caractéristiques ci-dessous :

- ✓ Commande par touches/tactile.
- ✓ Ecran TFT 7'.
- ✓ Couleurs 65536.
- ✓ Interface PROFINET



Figure 4.18 : Interface Homme Machine

B) Actionneurs

Dans ce projet, nous adoptons un seul actionneur

✓ **Bobine**

Une bobine, solénoïde, auto-inductance ou quelquefois self (par anglicisme), est un composant courant en électrotechnique et électronique. Une bobine est constituée d'un enroulement de fil conducteur éventuellement autour d'un noyau en matériau ferromagnétique qui peut être un assemblage de feuilles de tôle ou un bloc de ferrite .

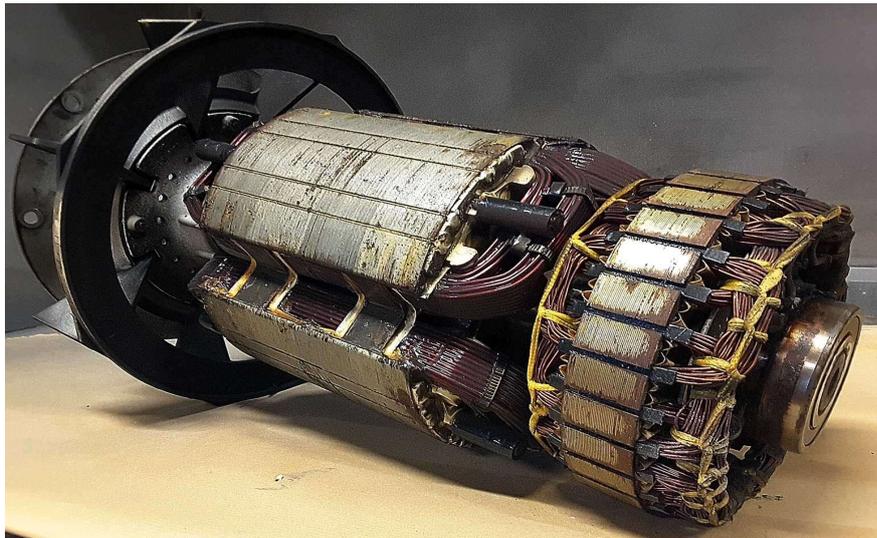


Figure 4.19 : Bobine

4.4.6 Interface développée sous Wincc

L'interface du système a été développée sous le logiciel Wincc.

4.4.6.1 Vue globale

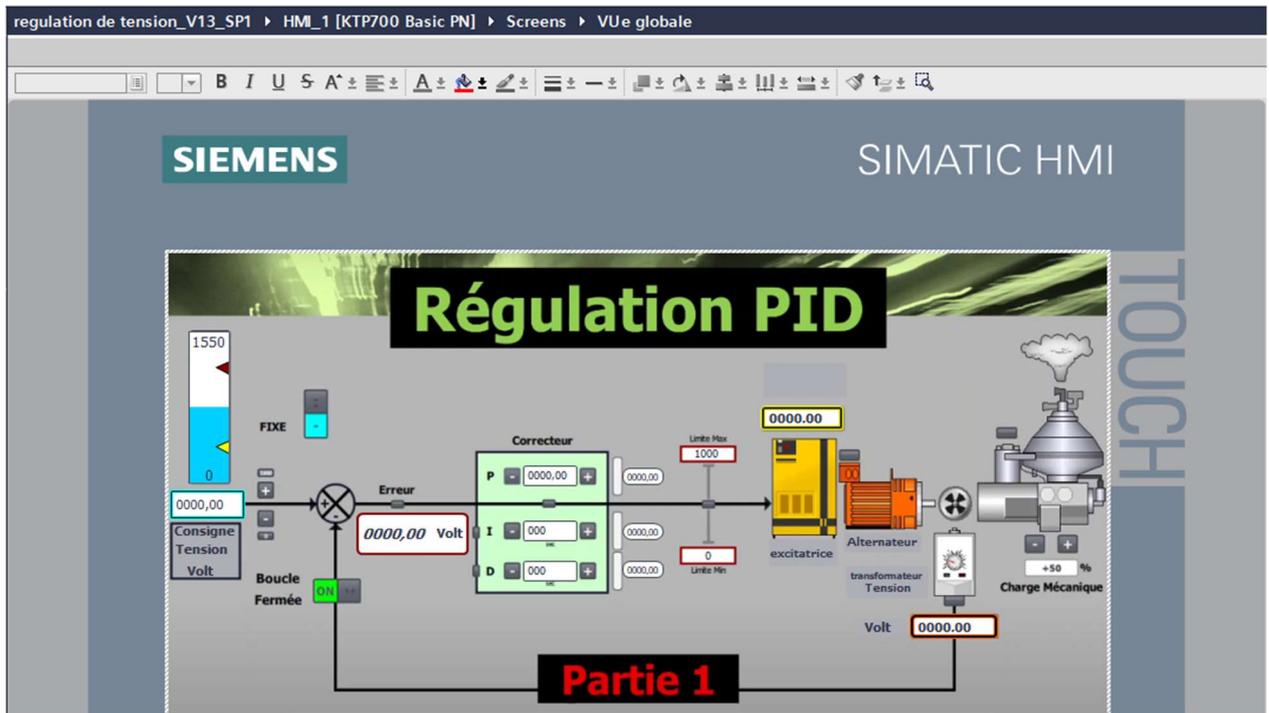


Figure 4.20 : Vue globale

4.4.6.2 Vue manuel automatique

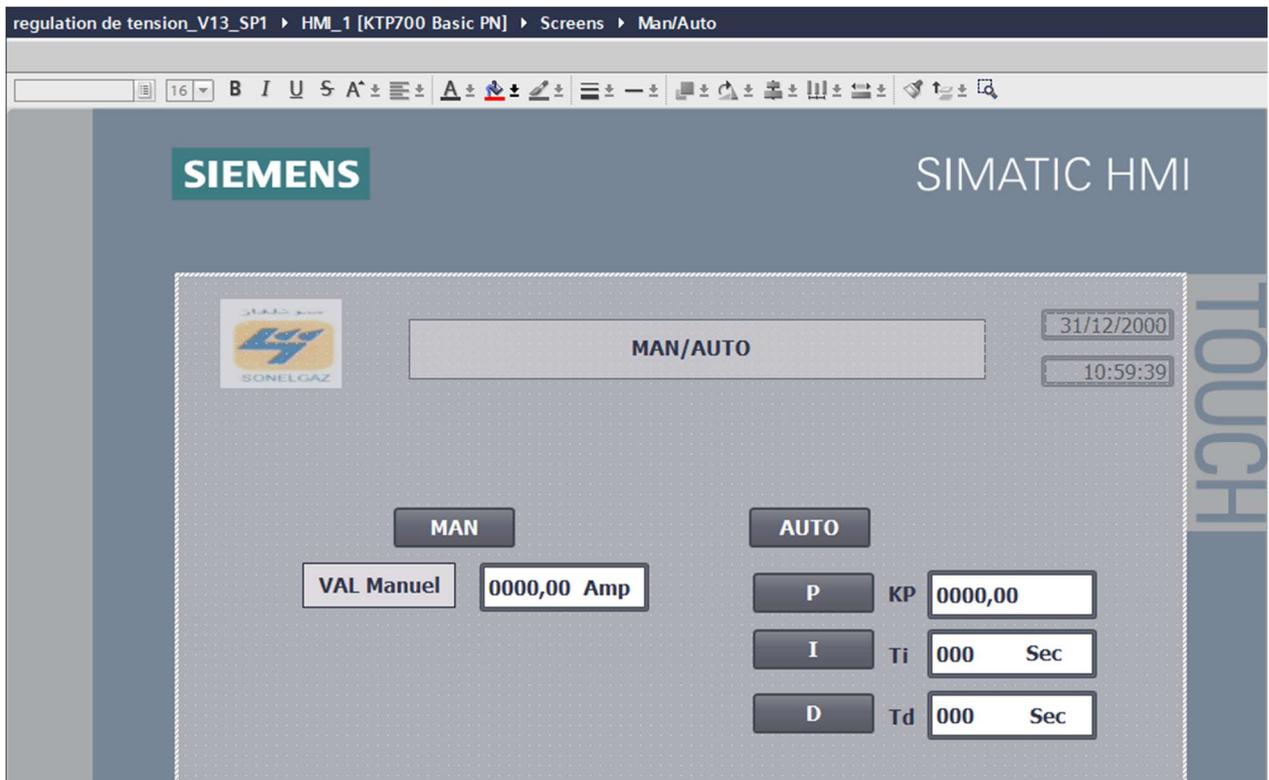


Figure 4.21 : Vue manuel automatique

4.4.6.3 Vue valeurs PID

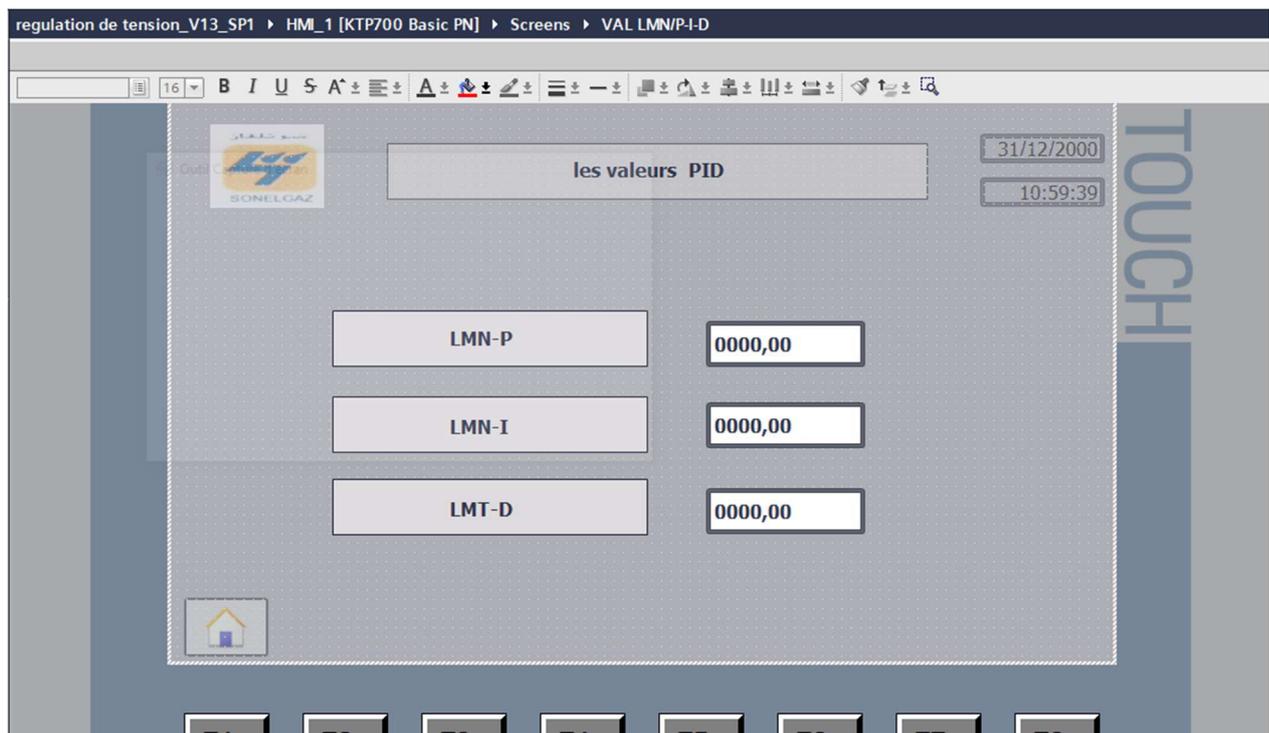


Figure 4.21 : Vue valeurs PID

4.4.7 Description du notre système de régulation de tension d'alternateur

Pour notre système de régulation il y a deux niveaux de réglage :

- ✓ Le réglage primaire (avant couplage) qui maintient la tension au stator des alternateurs à une valeur de consigne ; il faut maintenir une valeur de tension 15500 volt.

Donc pour maintenir il agit sur le courant d'excitation d'un alternateur on utilise le régulateur PID.

- ✓ Le 2eme niveau (après couplage) de réglage sur le réseau de transport le réglage de la tension est effectué en contrôlant la puissance réactive car sur ce type de réseau, en raison des caractéristiques des lignes, ce sont essentiellement les transits de puissance réactive qui créent des chutes de tension.

4.5 Conclusion

Ce chapitre, a été consacré à la mise en œuvre du système de régulation de tension d'un alternateur. Une description détaillée de l'application, mise en évidence au niveau de la partie réalisation, a été effectuée en citant tous les matériaux utilisés.

Les capteurs tel que :

- Boutons poussoirs.
- Cos phi mètre.
- Transformateur de tension.
- Transformateur de courant.

Les actionneurs et l'unité de commande tel que :

- Bobine.
- SIMATIC Basic Panel Siemens KTP700 Basic PN.

L'automate adopté et l'IHM, ont été programmés à l'aide du logiciel fourni par Siemens (TIA PORTAL). Les simulations obtenues, ont donné des résultats satisfaisants.

Conclusion générale

Conclusion générale

Notre projet de fin d'études a été effectué, au sein de l'école de SONEGAS, dans le but de concevoir une solution pure et programmable sur l'implémentation du logiciel de la commande de régulation de tension d'une machine synchrone fonctionnant en générateur.

Notre travail comporte deux grands axes : le premier axe porte sur la présentation détaillée de la technologie, le fonctionnement et la modélisation de la machine synchrone. Ainsi que nous avons fait la régulation de la tension de la machine synchrone (l'alternateur) en simulation sous l'environnement Matlab/Simulink en utilisant une loi de commande de type proportionnelle intégrale dérivée (PID).

Le deuxième axe est basé sur la commande automatique par un automate S7-300 réalisée suivant le logiciel de programmation « TIA PORTAL ». Ce logiciel nous a facilité le paramétrage, la programmation ainsi que la simulation des résultats.

La prise de connaissance du SIMATIC STEP 7 intégré à TIA Portal, nous a permis de programmer le fonctionnement de notre système et d'en récupérer les états des variables qui nous intéressent, pour créer notre interface homme-machine (IHM). Pour la conception de l'IHM en vue de la supervision du système, nous avons exploité les performances de SIMATIC WinCC (TIA portal), qui est un logiciel permettant de gérer les interfaces graphiques, avec des visualisations et des animations actualisées.

L'étude de ce système a été faite à vide et en charge, les simulations obtenues ont donné des résultats satisfaisants soit du côté de la stabilité du système, ou bien au niveau de la précision et la rapidité.

Ce projet était une occasion, d'appliquer les connaissances acquises durant notre formation. Il nous a permis d'acquérir un savoir-faire dans le domaine pratique, de tirer profit de l'expérience des personnes du domaine et d'autre part, d'apprendre une méthodologie rationnelle à suivre pour l'élaboration des projets d'automatisation. L'expérience fut très enrichissante.

Nous espérons que ce modeste travail, sera d'une grande utilité pour l'industrie et pour les promotions à venir.

Bibliographie

Références bibliographiques

- [1] JEAN NIAR –JEAN-CLAUDE GALLOIS - MICHEL YBILENSKY électricité machines électriques et électronique - AN-PIERRE LIBERSAC.
- [2] Cycle5 : Etude et modélisation des chaines de conversion électromécanique.
- [3] Cour MACHINE SYNCHRONE. Lycée P. Mendès France Epinal.
- [4] Cour Machines synchrones université Picardie jules verne Amiens.
- [5] THESE DE DOCTORAT DE L'ECOLE NORMALE SUPERIEURE DE CACHAN.
- [6] MEMOIRE DE FIN D'ETUDES Mr AID Karim Mr AKROUR Massinissa « Calcul et optimisation d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents ».
- [6] Mr AID Karim Mr AKROUR Massinissa MEMOIRE DE FIN D'ETUDES « Calcul et optimisation d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents ».
- [7] Mohamed ELLEUCH cour machine synchrone2010-2011.
- [8] GUY STURTZER, Modélisation et commande des moteurs triphasés.
- [9] A, F Jawad "Etude du problème inverse en électromagnétisme en vue de la localisation des défauts de désaimantation dans les actionneurs à aimants permanents ". Thèse de Doctorat l'Université de technologie de Belfort-Montbéliard, 05 décembre 2008.
- [10] Claude CHEVASSU MACHINES SYNCHRONES. Cours et Problèmes. Version du 5 février 2014.
- [11] D. Jolevski, *Excitation System of Synchronous Generator*, University of Split, Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture, Split, 2009.
- [12] Mr. TAIEB BENABBAS Mohamed Mlle. MESSADIA Habiba Mémoire de fin d'étude régulation de tension d'un alternateur 2017.
- [13] Nikola Tesla (1856-1943)., Electro Magnetic Motor Patent number n° 381,968, United States Patent Office, déposé le 12 octobre 1887, publié le 1er mai 1888.
- [14] Belkhira Sabrina Hadjer, *Etude et application des régulateurs automatiques AVR-PSS appliquée aux turbo alternateurs sous le régime des FACTS*, Mémoire de Fin d'Etudes, Université Dr. Tahar Moulay de Saïda, 2017.
- [15] Amari Mansour, *Cours d'électrotechnique*, Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Nabeul, Janvier 2014.
- [16] E. MATAGNE, Machines synchrones, Université Catholique de Louvain-ELEC2753-2012.

Références bibliographiques

- [17] Moteur synchrone représenter par énergie plus Septembre 25, 2007.
- [18] G. EIFFEL DIJON DC22 Machines électriques alternatives et leur contrôle.
- [19] processus de collage aimants représenté par rimac machines.
- [20] cours LES MACHINES SYNCHRONES.
- [21] Elharzli Cours Machine Synchrone.
- [22] Seatronic fiche pratique « PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN ALTERNATEUR ».
- [23] A. BLAJKINE, *Electrotechnique générale*, traduction français, Edition Mir 1977.
- [24] J.M. Dutertre cour électrotechnique.
- [25] Claude CHEVASSU, Machines Electriques. Cours et Problèmes, O1MM 2e année, Version n°2,71-05/02/2014.
- [26] Abdallah Mouhammad BARAKAT Thèse Pour l'obtention du grade de DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE POITIERS Présentée à L'UNIVERSITÉ DE POITIERS « Contribution à l'amélioration de la régulation de tension des générateurs synchrones : nouvelles structures d'excitation associées à des lois de commande H^∞ ».
- [26] KHALED OURAMDANE, Modélisation et optimisation du système d'excitation du groupe turbine-alternateur du simulateur analogique d'Hydro-Québec, Mémoire Présenté A L'école De Génie De L'université Du Québec En Abitibi Témiscaminque, MAI 2015.
- [27] Les Sources d'Énergie et Réseaux Électriques Filière Ingénieur Génie Electrique et Management Industriel Année universitaire 2020/2021.
- [28] Composition d'une éolienne (©Connaissance des Énergies) dernière modification le 30 janvier 2013.
- [29] Bapio BAYALA, *la machine électrique, Formation Continue Techniciens Supérieurs Ingénieurs Electrotechniciens* La dernière modification de cette page a été faite le 11avril 2018 à 09 :58.
- [30] Lamy Abdeljalil, MODELISATION DYNAMIQUE ET COMMANDEDES ALTERNATEURSCOUPLES DANS UN RESEAU ELECTRIQUE EMBARQUE, Thèse de Doctorat de à l'Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes – Saint Nazaire, 29 Novembre2006.
- [31] BOUYAHIAOUI Oussama et KOUROUGHLI Mohamed Amin, *Etude et simulation* du démarreur statique LS2100e de l'alternateur de grande puissance de la centrale

Références bibliographiques

de BOUFARIK, Mémoire de fin d'études, Université M'Hamed Bougara, Boumerdes, 2015/2016.

[32] E. MATAGNE, *Machines synchrones*, Université Catholique de Louvain-ELEC2753- 2012.

[33] Christophe palermo, *L'alternateur Synchrone*, IUT de Montpellier (Mesure physiques) 2010/2011.

[34] MEMOIRE de Mcoecel MOUSTIER. ETUDE ET REALISATION DE L'EXCITATION STATIQUE D'UN GROUPE SYNCHRONE MOTEUR-ALTERNATEUR.

[35] Mémoire de M. Bensaoula Mohamed Amine. *Conception du Contrôleur PID pour le Moteur à Courant Continu (MCC) à Excitation indépendante Simulation sous Matlab/Simulink.*

[36] Mémoire de Master Présenté par : Mr BAOUALI BILAL et Mr CHIBANE AMIR Etude du Système de Régulation Automatique de la Tension AVR+PSS des Alternateurs de Grande Puissance, Application : Alternateur 176 MW de la Centrale de Cap-Djinet.

[37] Kadri Ahmed Yacine, *Régulation Automatique*, cours, UNIVERSITE KASDIMERBAH-OUARGLA ,2013/2014.

[38] Ismayil C, Sreerama Kumar R, and Sindhu T. K<<Automatic Generation Control of Single Area Thermal Power System with Fractional Order PID (PIλD μ) Controllers, Third International Conference on Advances in Control and Optimization of Dynamical Systems, Kanpur, India, March 13-15, 2014.

[39] SakliMOUADH. Régulation Industrielle de Processus, projet fin d'études, projet automatisme- 2007.

[40] Charef Youcef, Chelouti Bilal « Optimisation de la stabilité dynamique d'un alternateur De puissance liée à un réseau infini », Mémoire fin d'étude UMBB 2016.

[41] Régulation de tension alternateur de groupe de production Exemple pratique - Centrale de RAS DJINET représenté par Institut de formation en électricité et gaz (école technique de Blida).

[42] dictionnaire. Sensagent. Leparisien.

[43] Initiation au programme du SIMATIC S7-1200.pdf.

[44] Document de formation T I A Edition : 05/2004 ; Fr : 05/2005.

[45] Grasset, Confucius et les automates ; 15/10/2014.

Références bibliographiques

[46] HACINI FARIDA Mémoire de fin d'étude CONTRIBUTION A L'AMELIORATION DE COMMANDE DE LA SOUDEUSE FBW 52 DE LA LIGNE DE DECAPAGE -LAF ARCELOR MITTAL.

[47] I. Boukhechem. Etude et réalisation d'un Système automatisé didactique : mise en Oeuvre de l'automate Siemens S300, Mémoire de Master en automatique, Université de Constantine, 2014.

[48] : Chetti Walid Automatisation de Système de traitement de l'Eau Usée (CILAS) MÉMOIRE DE MASTER juillet 2019.