

N° Ordre...../FHC/UMBB/2024

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie

**Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :**

MASTER

Présenté par

GHOUL Hatem

Et

DEHILI Mohammed Tahar Aymen

Filière : Hydrocarbures

Spécialité : Electricité industrielle

Thème :

**Modélisation d'un turbogénérateur commandé par
un régulateur automatique de tension AVR**

Devant le jury :

.....	MCA	UMBB	Président
.....	MAA	UMBB	Examineur
KESRAOUI	Mohammed	Pr	UMBB	Encadrant

Année Universitaire : 2023/2024

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie

Département : Automatisation des procédés industriels et électrification

Filière : Hydrocarbures

Spécialité : Electricité industrielle

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Thème :

**Modélisation d'un turbogénérateur commandé par
un régulateur automatique de tension AVR**

Présenté par :

- GHOUL Hatem
- DEHILI Mohammed Tahar Aymen

Avis favorable de l'encadrant :

KESRAOUI Mohammed
signature:

Avis favorable du Président du jury

Nom et Prénom :

Signature :

Cachet et signature

ملخص

هذه المذكرة تركز على دراسة ونمذجة توربينات البخار والمولدات الكهربائية، مع التركيز بشكل خاص على تنظيم سرعة الدوران وجهد خرج المولد بواسطة منظم الجهد التلقائي (AVR). تقدم هذه المذكرة تحليلاً عميقاً لتوربينات البخار والمولدات الكهربائية، وتوفر معلومات قيمة حول تنظيم سرعة الدوران وجهد خرج المولد بواسطة AVR. إنها تعتبر موردًا ثمينًا لأولئك الذين يهتمون بدراسة ونمذجة توربينات البخار والمولدات الكهربائية

Abstract

This thesis focuses on the study and modeling of steam turbines and alternators, with a particular emphasis on regulating the rotational speed and output voltage of the generator by an Automatic Voltage Regulator (AVR). This thesis provides a deep analysis of steam turbines and alternators, and offers valuable insights into the regulation of the rotational speed and output voltage of the generator by the AVR. It serves as a valuable resource for those interested in the study and modeling of steam turbines and alternators.

Résumé

Ce mémoire se concentre sur l'étude et la modélisation des turbines à vapeur et des alternateurs, avec un accent particulier sur la régulation de la vitesse de rotation et la tension de sortie du générateur par un régulateur automatique de tension (AVR). Ce mémoire offre une analyse approfondie des turbines à vapeur et des alternateurs, et fournit des informations précieuses sur la régulation de la vitesse de rotation et de la tension de sortie du générateur par l'AVR. Il sert de ressource précieuse pour ceux qui s'intéressent à l'étude et à la modélisation des turbines à vapeur et des alternateurs.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à tous ceux qui ont rendu ce travail possible.

Tout d'abord, nous remercions notre encadrant pour ses précieux conseils, son soutien inébranlable et sa patience tout au long de ce projet. Votre expertise et votre dévouement ont été une source d'inspiration constante.

Nous remercions également nos parents, nos familles et nos amis pour leur soutien moral et leur encouragement constant. Votre foi en nous a été un pilier de force.

Nous dédions ce travail à tous ceux qui ont contribué à notre parcours académique et qui ont cru en nous. Merci

SOMMAIRE

Introduction Générale	1
-----------------------------	---

CHAPITRE I : Généralité sur la turbine à vapeur

I.1. Introduction :	4
I.2. L'historique des turbines :	6
I.3. Le turbo-alternateur	7
I.3.1. La chaudière :	8
I.3.2. La turbine :	8
I.3.3. L'alternateur :	9
I.3.4. Le condenseur :	9
I.3.5. Le transformateur :	9
I.4. Les types des turbines :	10
I.5. La turbine à vapeur :	11
I.5.1. Présentation :	11
I.5.2. Les TAV (Turbine à Vapeur) :	12
I.5.3. Types des TAV :	13
I.5.4. Conception à lames et étages :	13
I.6. Classification en mode de travail :	15
I.6.1. Turbine à action (impulsion) :	15
I.6.2. Turbine à réaction :	16
I.7. Classification en mode thermodynamique :	17
I.7.1. Cycle de Rankine :	18
I.7.2. Cycle de Hirn :	19
I.8. Conclusion :	21

CHAPITRE II : Etude théorique et modélisation de l'alternateur

II.1.	Introduction :	23
II.2.	Construction de l'alternateur :	23
II.2.1.	Stator :	23
II.2.2.	Rotor :	25
II.2.3.	Les bagues collectrices :	26
II.2.4.	Excitatrices :	27
II.2.5.	Ventilateur :	27
II.3.	Principe de fonctionnement de l'alternateur :	27
II.4.	Fonctionnement d'un alternateur monophasé :	28
II.5.	Fonctionnement d'un alternateur triphasé :	32
II.6.	L'induction magnétique et les champs tournants :	33
II.7.	Les lois Lenz-faraday :	34
II.7.1.	Loi de Faraday :	34
II.7.2.	Loi de Lenz :	34
II.7.3.	L'action génératrice :	35
II.8.	Les systèmes d'excitations :	38
II.8.1.	Éléments d'un système d'excitation :	39
II.8.2.	Types de système d'excitation :	40
II.9.	Modèle de Behn-Eschenburg d'un alternateur :	44
II.10.	Analyse de fonctionnement des alternateurs :	46
II.10.1.	Caractéristique à vide :	46
II.10.2.	Caractéristique en charge :	47
II.11.	Bilan des puissances d'un alternateur :	49
II.11.1.	Puissance absorbée :	50

II.11.2.	Puissance utile :	51
II.12.	Rendement d'un alternateur :	51
II.13.	Mis en équations des machines synchrones :	52
II.13.1.	Hypothèses simplificatrices :	52
II.13.2.	Convention de signe :	53
II.14.	Modèle en a, b, c d'une machine synchrone à pôles lisse :	54
II.14.1.	Equations électriques :	54
II.14.2.	Equations magnétique :	55
II.14.3.	Définitions des matrices inductance :	55
II.15.	Modèle en repère de PARK d'une machine synchrone à pôles lisse :	57
II.16.	Blocs Simulink :	63
II.16.1.	Schéma Bloc à vide :	64
II.16.2.	Schéma Bloc en charge :	66
II.17.	Conclusion :	67

CHAPITRE III : Régulation de la vitesse de rotation et la tension de sortie du générateur par l'AVR

III.1.	Introduction :	70
III.2.	Système de contrôle :	70
III.3.	Les régulateurs PID :	71
III.3.1.	Présentation du régulateur PID :	71
III.3.2.	Les actions PID :	72
III.4.	Régulation de la tension de sortie de l'alternateur :	73
III.5.	Régulation de la vitesse de rotation de l'alternateur :	78
III.6.	Détermination des paramètres du contrôleur :	79
III.6.1.	La tension de sortie :	82

III.6.2. La Vitesse de rotation (ω) :	84
III.7. Conclusion :	85
Conclusion générale	86
Bibliographie	87

Liste des figures

CHAPITRE I : Généralité sur la turbine à vapeur

Figure 1: Schéma d'une centrale à charbon	5
Figure 2 : turboalternateur à vapeur	8
Figure 3 : le système turbo-alternateur	9
Figure 4 : mécanisme de la turbine à vapeur	10
Figure 5 : Le rotor de la TAV	12
Figure 6: La différence entre la turbine à impulsion et la turbine à réaction	17
Figure 7: le schéma du cycle de Rankine	19
Figure 8: le cycle de Hirn	20

CHAPITRE II : Etude théorique et modélisation de l'alternateur

Figure 9 : construction du stator	24
Figure 10 : Rotor à pôles saillantes	25
Figure 11 : Rotor à pôles lisses.....	26
Figure 12: les bagues collectrices.....	26
Figure 13: spire stator MN.....	28
Figure 14: Sens du courant dans MN.....	29
Figure 15: Champ H d'un rotor	30
Figure 16: Positions du rotor	31
Figure 17: stator triphasé.....	32
Figure 18.....	33
Figure 19: Règle des trois doigts de Fleming	36
Figure 20: induction dans un cadre mobile	37
Figure 21.....	38
Figure 22: Schéma fonctionnel du système d'excitation d'une génératrice	39

Figure 23:système d'excitation DC	41
Figure 24:Excitation de type AC avec redresseur non commandé	42
Figure 25:Excitation de type AC avec redresseur commandé	42
Figure 26: Système d'excitation de type Brushless	43
Figure 27:Excitatrice statique par redresseur commandé à source de tension	44
Figure 28:Schéma électrique et schéma monophasé équivalent de Behn-Eschenburg.....	45
Figure 29:Zone linéaire et zone de saturation de la machine.....	46
Figure 30:Caractéristique d'un alternateur à vide	47
Figure 31:Caractéristiques d'un alternateur en charge	48
Figure 32: Bilan de puissance de l'alternateur	49
Figure 33: machine synchrone triphasé avec amortisseur	54
Figure 34:Modèle de la machine synchrone dans le repère (dq _o)	60
Figure 35: Modèle Simulink de l'alternateur à vide	64
Figure 36 : Park inverse subsystem.....	64
Figure 37 : les tensions des phases V _a , V _b et V _c	65
Figure 38 : le courant d'excitation I _f	65
Figure 39 : Modèle Simulink de l'alternateur en charge.....	66
Figure 40 : paramètres de la charge entraîné par le générateur	66
Figure 41 : Les tensions V _a , V _b et V _c	67
Figure 42 : les courants I _a , I _b et I _c	67

CHAPITRE III : Régulation de la vitesse de rotation et la tension de sortie du générateur par l'AVR

Figure 43 : le circuit de contrôle du système turbine-alternateur	71
Figure 44 : structures du régulateur PID	71
Figure 45 : représentation du groupe de régulation	74
Figure 46 : Modèle schématique d'un régulateur AVR	75

Figure 47 : modèle du système d'excitation IEEE-type ST1.....	77
Figure 48 : modèle simplifié du système d'excitation IEEE-type ST1	77
Figure 49 : Modèle schématique d'un régulateur AVR	78
Figure 50 : Principe de contrôle de la vitesse	78
Figure 51 : Contrôleur PID et servomoteur	79
Figure 52 : Structure combinée du générateur et blocs de contrôle dans Simulink	81
Figure 53 : Structure du régulateur de tension de sortie dans Simulink	81
Figure 54 : Structure du régulateur de vitesse (ω_r) dans Simulink	82
Figure 55 : les tensions de sortie V_a, V_b et V_c	82
Figure 56 : les courants des phases I_a, I_b et I_c	83
Figure 57 : la vitesse de rotation à vide (sans charge)	84
Figure 58 : la vitesse de rotation avec charge et sans AVR.....	84
Figure 59 : la vitesse de rotation avec charge et avec l'AVR	85

Annexes

- e, e_1, e_2 : La force électromotrice engendrée dans le conducteur
- H : Le champ magnétique produit par le rotor
- v : Vitesse du rotor
- i : Le courant d'excitation de l'alternateur monophasé
- E : la force électromotrice
- f : la fréquence
- N : Nombre total de conducteurs
- L_s : inductance synchrone
- Ω : Vitesse de rotation du champs tournant en rad/s
- n : Vitesse de rotation du champs tournant en tr/s
- U : Tension composée
- V : Tension simple
- I : courant de charge
- I_{ex} : courant d'excitation
- U_{ex} : tension d'excitation
- P : la puissance active
- Q : la puissance réactive
- $V_{a,b,c}$: les tensions de sorties des phases a, b et c respectivement
- $I_{a,b,c}$: les courants de sorties des phases a, b et c respectivement
- $\Phi_{a,b,c}$ Les flux magnétiques des trois enroulement statorique a, b, c respectivement.
- $V_{f,D,Q}$: Les Tensions d'excitation, d'enroulement d et d'enroulement q respectivement.
- $\Phi_{f,D,Q}$: Les flux magnétiques d'excitation, d'enroulement d et d'enroulement q
- $I_{f,D,Q}$: Les flux magnétiques d'excitation, d'enroulement d et d'enroulement q
- Φ : Flux total sous un pôle
- p : nombre de paire de pôle
- L : inductance propre
- M : Inductance mutuelle m avec les deux autres phases

Introduction Générale

Dans le passé, la non-disponibilité de l'électricité rendait les tâches quotidiennes ardues. Aujourd'hui, il est crucial de produire de l'électricité de façon continue et efficace. Pour cela, il est impératif de construire des infrastructures industrielles capables de produire de l'électricité en grande quantité afin de satisfaire la demande croissante. Les centrales nucléaires, les centrales thermiques utilisant des combustibles fossiles et les centrales hydroélectriques constituent les principales méthodes de production d'électricité dans le monde. Ces centrales transforment différentes sources d'énergie primaire en électricité, se distinguant uniquement par leur source d'énergie initiale, qu'elle soit thermique, hydraulique, éolienne, nucléaire, etc.

La production d'électricité résulte de la conversion de l'énergie mécanique produite par une turbine – qu'elle soit à gaz ou à vapeur dans les centrales thermiques, ou hydroélectrique dans les centrales hydrauliques. Cette énergie mécanique est la sortie de la turbine et l'entrée de l'alternateur, et l'ensemble formé par la turbine et l'alternateur est appelé turbo-alternateur. De nos jours, une grande partie de l'électricité mondiale est produite par ces turbo-alternateurs, qui sont composés d'une turbine et d'un alternateur transformant l'énergie mécanique en électricité. L'alternateur est un composant clé dans la génération d'électricité. Cependant, ces systèmes sont soumis à diverses contraintes. Des perturbations mineures ou majeures, telles que les changements de charge, les courts-circuits ou les pertes de synchronisme, peuvent affecter le réseau électrique à tout moment et, dans certains cas, le pousser hors des limites de stabilité, entraînant un déséquilibre.

Ces perturbations provoquent une divergence entre la puissance mécanique et la puissance électrique, se manifestant par des variations dans la vitesse de rotation de l'alternateur et dans la tension de sortie. Les turbo-alternateurs doivent constamment ajuster leur fonctionnement pour maintenir la vitesse et la tension aux valeurs nominales, faisant face à des contraintes importantes pour éviter les risques liés à une survitesse lorsque la fréquence diminue.

Pour préserver la stabilité du réseau électrique et la sécurité des installations, il est nécessaire d'implémenter des dispositifs de régulation. Ces dispositifs doivent réagir instantanément aux perturbations affectant les turbo-alternateurs. Les systèmes de régulation

doivent aussi assurer le fonctionnement de ces équipements dans des limites sûres. Nos intérêts se portent sur la garantie de la stabilité du système en intégrant des régulateurs de type PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé) dans les systèmes de commande. L'analyse dynamique du système requiert un modèle mathématique pour le calcul et l'analyse.

Notre travail de recherche se concentre sur l'analyse, la modélisation et la commande du turbo-alternateur, un élément crucial dans la production de l'électricité utilisée au quotidien. Notre mémoire se divise en trois parties principales, détaillées ci-dessous :

Chapitre I : offre un aperçu des turbines à vapeur, abordant leur structure, leur mécanisme d'action et leur classification afin de fournir une compréhension approfondie de ces dispositifs.

Chapitre II : présentera une analyse théorique de l'alternateur en explorant sa composition et son mode de fonctionnement. Il portera aussi une discussion de ses applications industrielles et de l'intérêt de son utilisation.

Chapitre III : consacré à la mise en place d'une régulation de la tension de sortie et l'application d'un régulateur "AVR" (Régulateur Automatique de Tension) au système d'excitation. En plus de la présentation du système de régulation PID pour contrôler la vitesse de rotation de l'alternateur.

Chapitre I :
Généralité sur la turbine à vapeur

I.1. Introduction :

Les centrales de production d'électricité sont des installations qui utilisent des turbines pour entraîner des générateurs électriques. Les turbines sont des machines qui transforment l'énergie d'un fluide en mouvement, comme la vapeur, l'eau ou le gaz, en énergie mécanique de rotation. Les générateurs sont des machines qui transforment l'énergie mécanique de rotation en énergie électrique. Il existe différents types de centrales des turbines :

Centrale à gaz : elle utilise du gaz naturel ou du biogaz qui est brûlé dans une chambre de combustion pour faire tourner une turbine à gaz qui entraîne un alternateur. Elle peut aussi utiliser la vapeur d'eau issue de la combustion du gaz pour faire tourner une turbine à vapeur supplémentaire, ce qui augmente le rendement. Elle permet de produire de l'électricité à partir d'une source d'énergie propre et abondante, et de réduire les émissions de gaz à effet de serre par rapport aux autres combustibles fossiles, mais elle dépend de la disponibilité et du prix du gaz, émet encore des gaz à effet de serre et des oxydes d'azote, et nécessite un système de traitement des gaz de combustion. [1]

Centrale hydraulique : elle utilise l'eau d'un barrage ou d'une rivière qui est envoyée sur une turbine hydraulique qui entraîne un alternateur. L'eau peut être stockée dans un réservoir en hauteur pour être utilisée en cas de besoin. Elle permet de produire de l'électricité à partir d'une source d'énergie renouvelable et gratuite, de stocker l'énergie potentielle de l'eau dans un réservoir, et de réguler la production en fonction de la demande, mais elle a un impact sur l'environnement et les écosystèmes aquatiques, sur la vue de la nature et les traditions culturelles, et dépend des conditions climatiques et hydrologiques. [2, 3]

Centrale éolienne : elle utilise le vent qui fait tourner des pales d'une éolienne qui entraîne un alternateur. Les éoliennes peuvent être installées sur terre ou en mer. Elle permet de produire de l'électricité à partir d'une source d'énergie renouvelable et gratuite, de réduire les émissions de gaz à effet de serre et la consommation de combustibles fossiles, et de diversifier le mix énergétique, mais elle a un impact visuel et sonore sur le paysage, sur la faune aviaire et les radars, et dépend de la vitesse et de la direction du vent. [3]

Centrale thermique à vapeur : elle utilise de la vapeur d'eau produite par la combustion de combustibles fossiles ou par la fission nucléaire pour faire tourner une turbine à vapeur qui

entraîne un alternateur. Elle permet de produire de l'électricité à partir de diverses sources d'énergie, mais elle émet des gaz à effet de serre et des polluants atmosphériques, consomme beaucoup d'eau pour le refroidissement et produit des déchets radioactifs dans le cas de l'énergie nucléaire. [1][2]

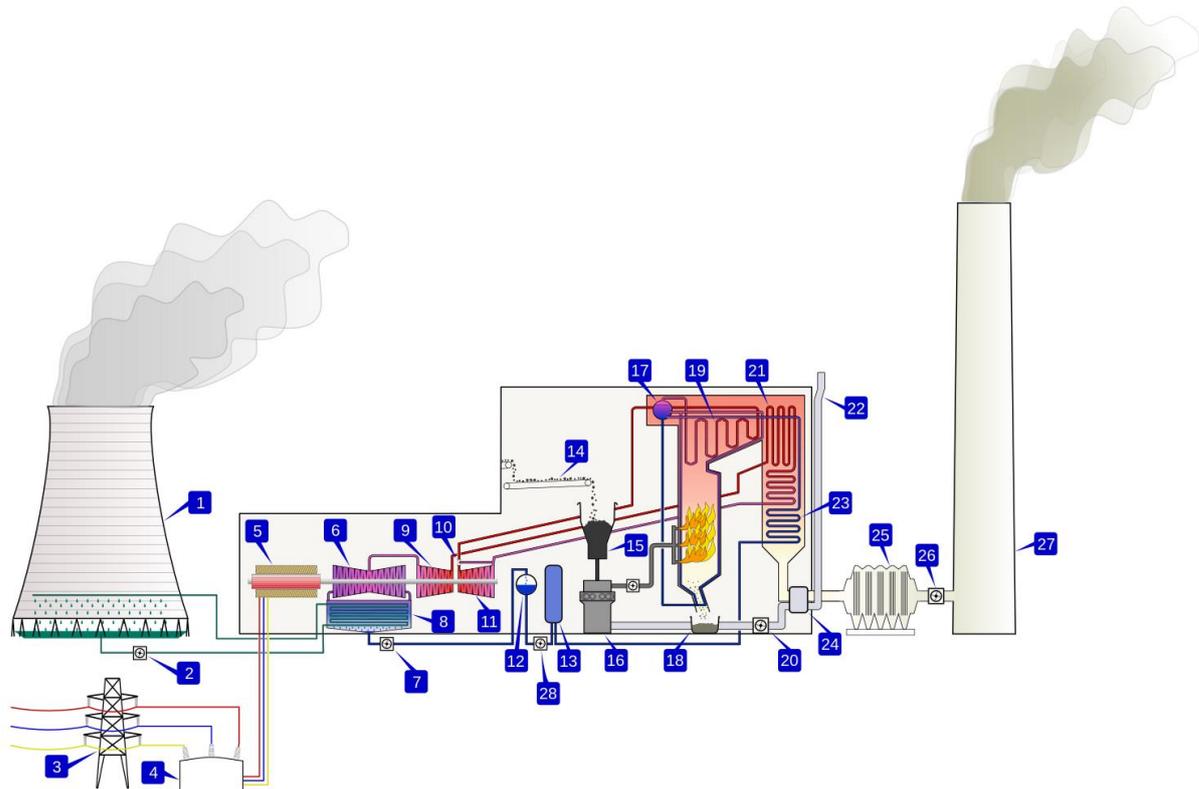


Figure 1: Schéma d'une centrale à charbon

- | | | |
|--|--|---------------------------|
| 1. Tour aéroréfrigérante | 2. Pompe de refroidissement condenseur | 3. Ligne HT triphasée |
| 4. Transformateur élévateur de tension | 5. Générateur électrique | 6. Turbine basse pression |
| 7. Pompe extraction condensat | 8. Condenseur | 9. Turbine intermédiaire |
| 10. Vanne de contrôle | 11. Turbine haute pression | 12. Dégazeur |
| 13. Préchauffeur | 14. Convoyeur à charbon | 15. Trémie à charbon |

16. Concasseur à charbon 17. Ballon séparateur 18. Trémie à mâchefers
19. Surchauffeur primaire 20. Ventilateur d'alimentation 21. Surchauffeur intermédiaire
22. Prise d'air de combustion 23. Économiseur 24. Réchauffeur d'air
25. Electrofiltre 26. Ventilateur de tirage 27. Cheminée
28. Pompe alimentaire haute pression

I.2. L'histoire des turbines :

Le premier dispositif qui pourrait être considéré comme une turbine à vapeur était plus un jouet, le célèbre Éolipyle, décrit au 1er siècle par le mathématicien grec Héron d'Alexandrie en Égypte romaine. En 1551, Taqi al-Din en Égypte ottomane a décrit une turbine à vapeur dont l'application pratique est la rotation d'une broche. Les turbines à vapeur ont également été décrites par l'italien Giovanni Branca (1629) et par John Wilkins en Angleterre (1648). En 1672, une voiture à turbine à impulsion fut conçue par Ferdinand Verbiest. Une version plus moderne de cette voiture a été produite peu de temps après, à la fin du XVIIIe siècle par un mécanicien inconnu allemand. La théorie des turbines voit le jour avec les travaux de Segner et d'Euler, qui y consacrent deux communications. À la vapeur utilisée dans l'éolipyle, Segner substitue de l'eau, réalisant ainsi le prototype de la turbine hydraulique. La turbine à vapeur moderne fut inventée en 1884 par Sir Charles Parsons, dont le premier modèle était relié à une dynamo qui générait 7,5 kW (10 ch) d'électricité. L'invention de Parsons rend possible l'électricité bon marché et abondante, et a révolutionné le transport maritime et la marine de guerre. Le modèle de Parsons est du type à réaction. Sa licence est brevetée et sa turbine est améliorée peu de temps après par un Américain, George Westinghouse. Parsons a eu la satisfaction de voir son invention adoptée par toutes les grandes centrales de ce monde, et la taille des génératrices a augmenté depuis la première de 7,5 kW jusqu'à des unités de 50 000 kW de capacité. Pendant la vie de Parson, la capacité de production d'une unité a été multipliée par environ 10 000, et la puissance totale des génératrices construites par son cabinet C. A. Parsons and Company et par leurs titulaires, à des fins terrestres uniquement, avait dépassé les trente millions de chevaux-vapeur. Un certain nombre d'autres variantes de turbines ont été développées pour travailler efficacement avec la vapeur. La turbine de Laval (inventée par Gustaf de Laval) accélérât la vapeur d'eau

à pleine vitesse avant de l'envoyer vers des aubes de turbine. La turbine à impulsion de Laval est plus simple, moins coûteuse et n'a pas besoin d'être aussi résistante à la pression. Elle peut fonctionner avec de la vapeur sous pression, mais est nettement moins efficace. Auguste Rateau développa une turbine à pression à impulsion sur la base du principe de Laval dès 1896, obtint un brevet américain en 1903, et appliqua la turbine à un torpilleur français en 1904. Il enseigna à l'École nationale supérieure des mines de Saint-Étienne pendant une décennie jusqu'en 1897, et fonda ensuite une entreprise à succès qui fut incorporée dans Alstom après sa mort. L'un des fondateurs de la théorie moderne de la vapeur et des turbines à gaz fut Aurel Stodola, un ingénieur-physicien slovaque, professeur à l'école Polytechnique (aujourd'hui Institut ETH) de Zurich. Son travail *Die Dampfturbinen und ihre Aussichten als Wärmekraftmaschinen* (en français : *La Turbine à Vapeur et de son utilisation future comme Moteur Thermique*) fut publié à Berlin en 1903. Un livre ultérieur, *Dampf und Gaz-Turbinen* (en français : *Turbines à Gaz et à Vapeur*), fut publié en 1922. La turbine Brown-Curtis, de type à impulsion, qui avait été à l'origine développée et brevetée par la société américaine International Curtis Marine Turbine Company, fut développée dans les années 1900, en collaboration avec John Brown & Company. Elle fut utilisée dans des moteurs John Brown de navires marchands et de guerre, y compris des paquebots et navires de guerre de la Royal Nav. [1][3][4]

I.3. Le turbo-alternateur

Les turboalternateurs sont des machines électriques tournantes qui sont couplées à une turbine à vapeur ou à une turbine à gaz (également nommée turbine à combustion). Ils convertissent l'énergie mécanique d'un fluide en mouvement en énergie électrique. Le fluide utilisé peut-être liquide, comme l'eau d'un cours d'eau pour une centrale hydroélectrique, ou gazeux, comme la vapeur générée par une centrale thermique (classique ou nucléaire).

Un système turboalternateur est un système qui utilise une turbine pour entraîner un alternateur et produire de l'électricité. Il peut être alimenté par de la vapeur, du gaz ou du vent. Voici un schéma d'explication pour un système turboalternateur à vapeur.

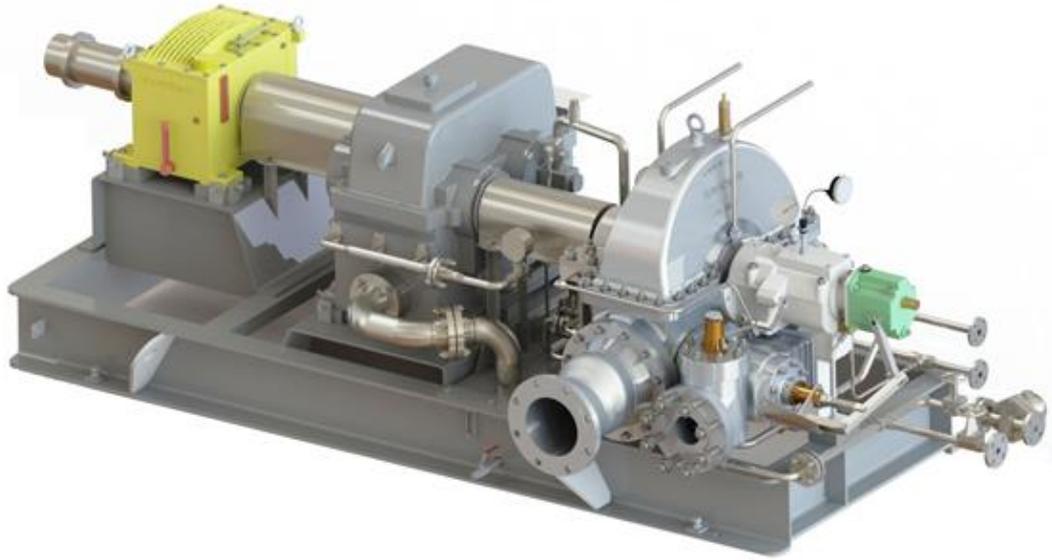


Figure 2 : turboalternateur à vapeur

Dans les centrales électriques thermiques, l'alternateur est relié à une turbine à vapeur qui tourne à grande vitesse. La fréquence du courant alternatif produit par l'alternateur dépend du nombre de pôles du rotor. Pour les réseaux à 50 Hz, le rotor a généralement 4 pôles et tourne à 1500 tours par minute, ou 2 pôles et tourne à 3000 tours par minute. Dans les centrales hydrauliques, la turbine tourne plus lentement et le rotor a plus de pôles (14, 16 pôles). L'arbre de la turbine et de l'alternateur peut être vertical ou horizontal et a un grand diamètre. L'arbre de turboalternateur est fabriqué en acier forgé à haute résistance mécanique.

Les éléments principaux d'un turboalternateur à vapeur sont :

I.3.1. La chaudière :

C'est l'élément qui produit de la vapeur à haute pression et à haute température à partir de l'eau et du combustible (charbon, gaz, fioul, etc.).

I.3.2. La turbine :

C'est l'élément qui reçoit la vapeur de la chaudière et la fait tourner à grande vitesse. La turbine est composée de plusieurs étages de pales fixes et mobiles qui forment les aubes.

La vapeur se détend et perd de la pression et de la température en traversant les aubes, ce qui lui fait gagner de la vitesse et transfère son énergie aux pales mobiles.

I.3.3. L'alternateur :

C'est l'élément qui transforme l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique. L'alternateur est composé d'une partie fixe, le stator, et d'une partie mobile, le rotor. Le stator contient des bobines de cuivre qui créent un champ magnétique. Le rotor contient des aimants permanents ou des électroaimants qui tournent avec la turbine. Le mouvement relatif entre le rotor et le stator induit un courant électrique dans les bobines du stator

I.3.4. Le condenseur :

C'est l'élément qui refroidit la vapeur qui sort de la turbine et la transforme en eau. Le condenseur utilise un fluide de refroidissement, comme de l'eau ou de l'air, pour échanger de la chaleur avec la vapeur. L'eau condensée est renvoyée vers la chaudière par une pompe, ce qui forme un cycle fermé.

I.3.5. Le transformateur :

C'est l'élément qui adapte la tension du courant électrique produit par l'alternateur à la tension du réseau électrique. Le transformateur augmente ou diminue la tension en fonction du rapport entre le nombre de spires des bobines primaires et secondaires.

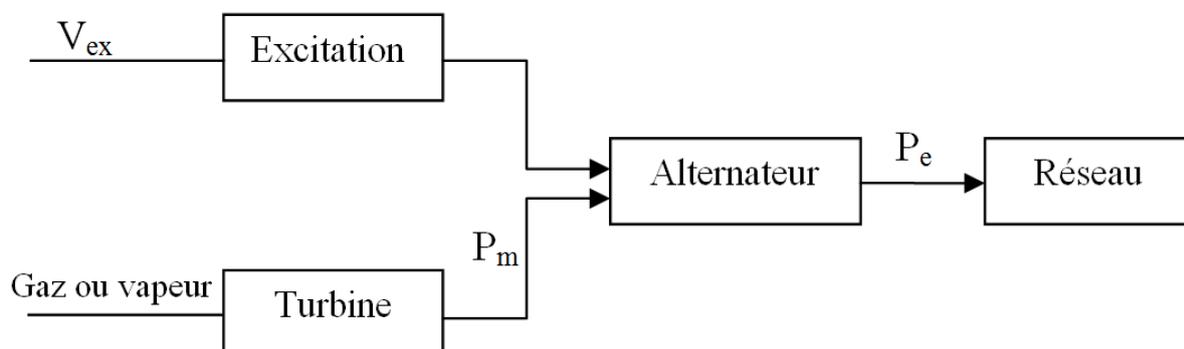


Figure 3 : le système turbo-alternateur

P_m : puissance mécanique ; **P_e** : puissance électrique

I.4. Les types des turbines :

Une turbine est une machine rotative qui utilise l'énergie d'un fluide en mouvement pour produire de l'énergie mécanique. Le fluide agit sur des éléments mobiles fixés sur un arbre, appelés ailettes, hélices, lames, aubes ou augets, selon leur forme. L'arbre entraîne ensuite un alternateur qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Il existe plusieurs types de turbines, selon le fluide utilisé et la conception de la machine. On peut distinguer les turbines hydrauliques à eau, les turbines à vapeur et les turbines à gaz.

Selon le type de centrale électrique, thermique, hydraulique ou nucléaire, le couple moteur appliqué au rotor de l'alternateur varie. L'alternateur est entraîné par une turbine qui convertit l'énergie primaire en énergie mécanique. Dans les centrales hydrauliques, c'est la force de l'eau qui dépend de la hauteur de la chute qui entraîne la turbine. Dans les centrales thermiques ou nucléaires, cette énergie primaire est la chaleur qui produit de la vapeur sous pression qui actionne la turbine. Pour notre travail, nous avons opté pour la turbine à vapeur.

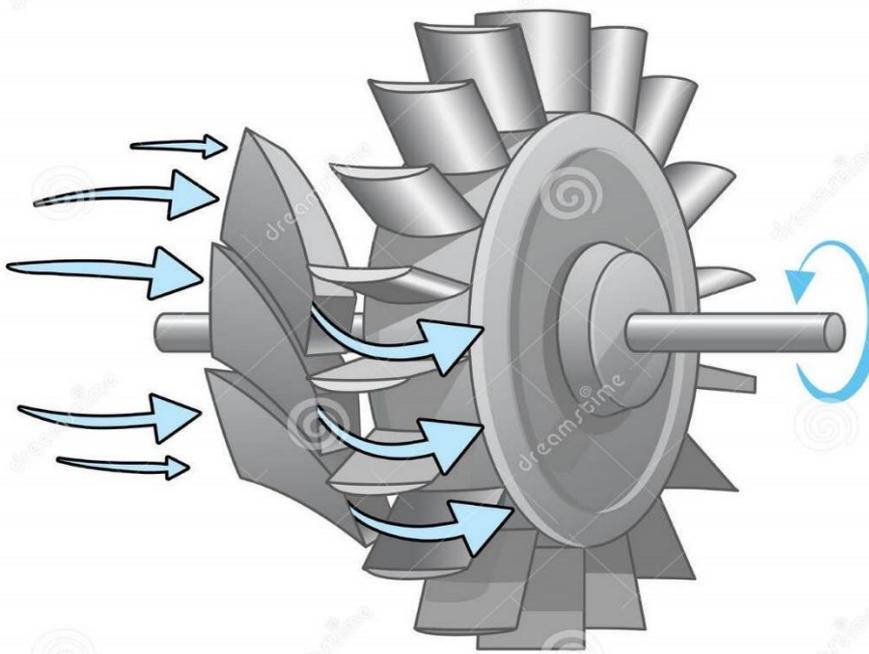


Figure 4 : mécanisme de la turbine à vapeur

I.5. La turbine à vapeur :

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la turbine à vapeur, qui est le type de turbine que nous avons choisi pour notre travail.

I.5.1. Présentation :

Une turbine à vapeur est une machine qui extrait l'énergie thermique de la vapeur sous pression et l'utilise pour produire un travail mécanique de rotation de l'arbre de sortie.

L'extérieur de la turbine à vapeur est constitué d'un carter, qui est une enveloppe métallique qui protège et soutient les éléments internes de la turbine. Le carter est généralement cylindrique ou conique, et il est divisé en deux parties, le carter supérieur et le carter inférieur, qui sont reliés par des boulons. [7][8]

Une turbine à vapeur se compose généralement des éléments suivants :

1. La Chaudière (Générateur de vapeur) : C'est ici que tout commence. L'eau est introduite dans la chaudière, où elle est chauffée pour devenir de la vapeur sous pression.
2. Le Surchauffeur : La vapeur est ensuite passée à travers le surchauffeur pour augmenter sa température et éliminer l'humidité qui endommage les pièces métalliques (l'effet de corrosion) avant d'être introduite dans la turbine.
3. La Turbine : La vapeur sous pression entre dans la turbine, où elle se détend à travers une série de pales fixes (buses), qui orientent le flux de vapeur en jets à grande vitesse.
4. Les Aubes : Les aubes sont les composants clés de la turbine. Elles sont disposées en deux grilles, l'une fixe et l'autre mobile. Les aubes fixes orientent le flux de vapeur, tandis que les aubes mobiles (sur le rotor) changent de direction lorsque le jet de vapeur les frappe, convertissant ainsi l'énergie cinétique du jet de vapeur en rotation de l'arbre.
5. Le Rotor : Le rotor est l'élément qui tourne dans la turbine. Les pales du rotor sont en forme de godet et changent de direction lorsque le jet de vapeur les frappe, ce qui convertit l'énergie cinétique du jet de vapeur en rotation de l'arbre.

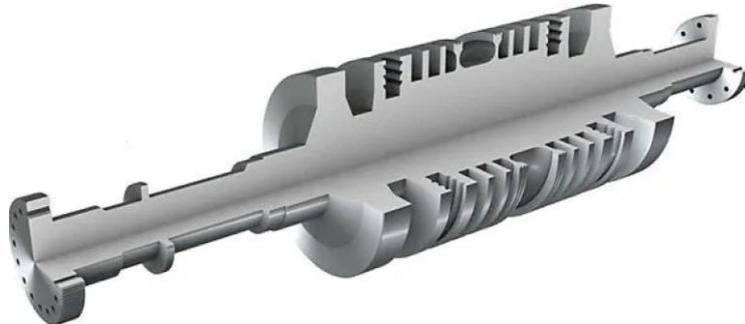


Figure 5 : Le rotor de la TAV

6. L'Alternateur : L'alternateur est généralement relié à l'arbre de la turbine et tourne à la même vitesse. Lorsque l'arbre tourne, il fait tourner un ensemble de bobines de fil à l'intérieur d'un champ magnétique, produisant ainsi de l'électricité.
7. Le Condenseur : Après avoir traversé la turbine, la vapeur est refroidie et condensée en eau dans le condenseur. Cette eau est ensuite renvoyée à la chaudière pour être réchauffée et transformée à nouveau en vapeur.
8. La Pompe d'alimentation : La vapeur condensée est ensuite renvoyée à la chaudière pour être réutilisée.

I.5.2. Le marché des TAV (Turbine à Vapeur) :

Selon une étude de Platts, les trois leaders mondiaux de la fabrication de turbines à vapeur étaient des entreprises chinoises : Harbin Electric, Shanghai Electric et Dongfang Electric. Ces dernières détenaient ensemble plus de 50 % du marché, tandis que les autres acteurs, tels que Bhel, Siemens, Alstom, GE, Doosan Škoda Power, Mitsubishi Heavy Industries, et Toshiba, avaient des parts plus faibles. Le cabinet Frost & Sullivan prévoit que ce marché sera de plus en plus concentré d'ici à 2020, avec une expansion des fabricants chinois hors de leur pays d'origine. [4]

I.5.3. Types des TAV :

Dans ce paragraphe, nous allons nous intéresser aux types de turbines à vapeur, qui se différencient selon leur taille et leur puissance. Les turbines à vapeur peuvent avoir des dimensions et des performances très variées, allant de quelques kilowatts (kW) à plusieurs centaines de mégawatts (MW). Par exemple, les petites turbines à vapeur de moins de 1 kW sont utilisées pour entraîner des pompes, des compresseurs ou d'autres équipements mécaniques dans certains milieux spécifiques. Les grandes turbines à vapeur de plus de 1 GW sont utilisées pour produire de l'électricité dans les centrales thermiques ou nucléaires. On peut citer comme exemple la turbine à vapeur de la centrale nucléaire de Taishan, en Chine, qui a une puissance de 1,75 GW. Il existe plusieurs classifications modernes pour les turbines à vapeur, selon des critères tels que le type de fluide, le nombre d'étages, la pression, la température, le rendement, la vitesse de rotation ou la configuration de la machine. On peut classer les types des turbines à vapeur selon les suivants :

I.5.4. Conception à lames et étages :

Les lames et les tuyères :

Les lames et les tuyères sont les pièces mobiles ou fixes qui sont disposées sur la circonférence du rotor de la turbine. Elles ont pour rôle de modifier la pression et la vitesse de la vapeur qui circule dans la turbine, et de transmettre ou de recevoir l'énergie mécanique. Il existe deux types principaux de lames et de tuyères :

1. Les lames sont des éléments qui ne convergent pas, c'est-à-dire que leur profil est constant ou divergent. Elles sont soumises à l'impact de la vapeur, qui exerce une force tangentielle sur elles. Elles entraînent le rotor de la turbine par leur mouvement. La pression et la vitesse de la vapeur diminuent légèrement lors de son passage à travers les lames.
2. Les tuyères sont des éléments qui convergent, c'est-à-dire que leur profil se rétrécit vers la sortie. Elles sont soumises à la fois à l'impact et à la réaction de la vapeur, qui exerce une force axiale et tangentielle sur elles. Elles reçoivent le mouvement du rotor de la turbine. La pression de la vapeur chute fortement lors de son passage à travers les tuyères, tandis que sa vitesse augmente.

Les étages :

Les étages sont les ensembles de lames et de tuyères qui sont disposés en série le long de l'axe de la turbine. Ils ont pour rôle de diviser la chute de pression et de vitesse de la vapeur entre l'entrée et la sortie de la turbine, et d'optimiser le rendement de la machine. Il existe plusieurs types d'étages, selon la combinaison des lames et des tuyères :

1. Les étages à action ou à impulsion sont composés d'une rangée de tuyères fixes, suivie d'une rangée de lames mobiles. La vapeur subit une forte chute de pression et de vitesse dans les tuyères fixes, puis transmet son énergie aux lames mobiles par impact. La pression et la vitesse de la vapeur restent constantes dans les lames mobiles. Ce type d'étage est adapté aux hautes pressions et vitesses de la vapeur. Il existe plusieurs variantes d'étages à action, selon le nombre et la disposition des lames mobiles :

1. Les étages à action simple :

Sont composés d'une seule rangée de lames mobiles par étage. Ils sont utilisés pour les petites turbines ou les turbines à basse pression.

2. Les étages à action multiple :

Sont composés de deux ou plusieurs rangées de lames mobiles par étage, séparées par des lames fixes. Ils sont utilisés pour les grandes turbines ou les turbines à haute pression. Ils permettent de diviser la chute de vitesse de la vapeur en plusieurs petites chutes, ce qui augmente le rendement de l'étage. Les étages à action multiple sont aussi appelés turbines Curtis, turbines Rateau ou turbines Brown-Curtis, selon leur inventeur.

1. Les étages à réaction sont composés d'une rangée de tuyères fixes, suivie d'une rangée de tuyères mobiles. La vapeur subit une faible chute de pression et de vitesse dans les tuyères fixes, puis transmet son énergie aux tuyères mobiles par impact et par réaction. La pression et la vitesse de la vapeur diminuent progressivement dans les tuyères mobiles. Ce type d'étage est adapté aux basses pressions et vitesses de la vapeur. Les étages à réaction sont aussi appelés turbines Parsons, du nom de leur inventeur.

2. Le compoundage :

Le compoundage est la technique qui consiste à utiliser plusieurs étages en série dans une turbine, afin d'améliorer son efficacité et sa stabilité. Il existe plusieurs types de compoundage, selon le critère utilisé pour répartir la chute de pression et de vitesse de la vapeur :

- Le compoundage à pression est le fait d'utiliser plusieurs étages à action ou à réaction en série, de façon à diviser la chute de pression de la vapeur en plusieurs petites chutes. Chaque étage a la même vitesse de rotation, mais une pression différente. Ce type de compoundage est utilisé pour les turbines à haute pression et basse vitesse.
- Le compoundage à vitesse est le fait d'utiliser plusieurs étages à action multiple en série, de façon à diviser la chute de vitesse de la vapeur en plusieurs petites chutes. Chaque étage a la même pression, mais une vitesse différente. Ce type de compoundage est utilisé pour les turbines à basse pression et haute vitesse.
- Le compoundage à pression-vitesse est le fait d'utiliser une combinaison des deux types de compoundage précédents, en utilisant des étages à action simple ou multiple, suivis d'étages à réaction. Ce type de compoundage est utilisé pour les turbines à pression et vitesse intermédiaires

3. Alimentation en vapeur et conditions d'échappement :

Ces types comprennent les turbines à condensation, sans condensation, à réchauffage, à extraction et à induction.

I.6. Classification par mode de travail :

Il existe plusieurs façons de distinguer les turbines à vapeur selon leur conception, leurs niveaux de pression, leurs dimensions et d'autres critères. Cependant, on peut identifier deux types fondamentaux de turbines à vapeur :

I.6.1. Turbine à action (impulsion) :

Une turbine à action (impulsion) est composée de deux types de pales : les pales fixes, appelées buses, et les pales mobiles, appelées aubes. La vapeur sous pression est détendue

dans les buses, où elle acquiert une grande vitesse. La vapeur à haute vitesse frappe les aubes, qui changent sa direction et lui appliquent une force. Cette force fait tourner les aubes, qui sont reliées à l'arbre de sortie de la turbine. La pression de la vapeur reste constante dans les aubes. Les turbines à impulsion les plus connues sont les turbines Curtis, Rateau et Brown-Curtis. La première turbine à vapeur, inventée par De Laval, était également une turbine à impulsion, avec une seule aube.[4][5]

L'avantage d'une turbine à impulsion est qu'elle permet une grande chute de pression par étage, ce qui réduit le nombre d'étages et la taille des pales. Pour augmenter l'efficacité de la turbine, les pales sont disposées en plusieurs étages en série, appelés étages composés. Cependant, les turbines à impulsion présentent aussi des inconvénients, tels que les pertes par frottement dues à la vitesse élevée de la vapeur, et la nécessité d'un bon alignement des buses et des aubes.

I.6.2. Turbine à réaction :

Une turbine à réaction est composée de deux types de pales : les pales fixes, appelées directrices, et les pales mobiles, appelées réactives. La vapeur sous pression est détendue dans les directrices, où elle gagne en vitesse. La vapeur à haute vitesse frappe les réactives, qui changent sa direction et lui appliquent une force. Cette force fait tourner les réactives, qui sont reliées à l'arbre de sortie de la turbine. La pression de la vapeur diminue progressivement dans les réactives. La turbine à réaction la plus connue est la turbine Parsons, inventée par Sir Charles Parsons.

L'avantage d'une turbine à réaction est qu'elle permet un meilleur rendement que la turbine à impulsion, car elle utilise à la fois l'impulsion et la réaction de la vapeur pour faire tourner le rotor. Pour augmenter l'efficacité de la turbine, les pales sont disposées en plusieurs étages en série, appelés étages composés. Cependant, les turbines à réaction présentent aussi des inconvénients, tels que la nécessité d'avoir des pales plus petites et plus nombreuses, et la difficulté de maintenir l'étanchéité de la turbine.

Les turbines à vapeur modernes combinent souvent les principes de l'impulsion et de la réaction, en modifiant le degré de réaction et d'impulsion du pied à la pointe des pales. Les pales du rotor sont généralement conçues comme des pales d'impulsion à la racine et comme

des pales de réaction à la pointe. Une configuration courante consiste à utiliser un ou plusieurs étages de Curtis du côté haute pression, suivis d'un étage de Rateau ou de réaction. En général, lorsque le frottement est pris en compte, l'étage de réaction est le plus efficace, suivi par l'étage de Rateau et l'étage de Curtis. Les pertes par frottement sont plus faibles dans l'étage de réaction, car la vapeur se dilate continuellement et donc les vitesses d'écoulement sont plus faibles. La figure suivante montre la différence entre la turbine à impulsion et à réaction :

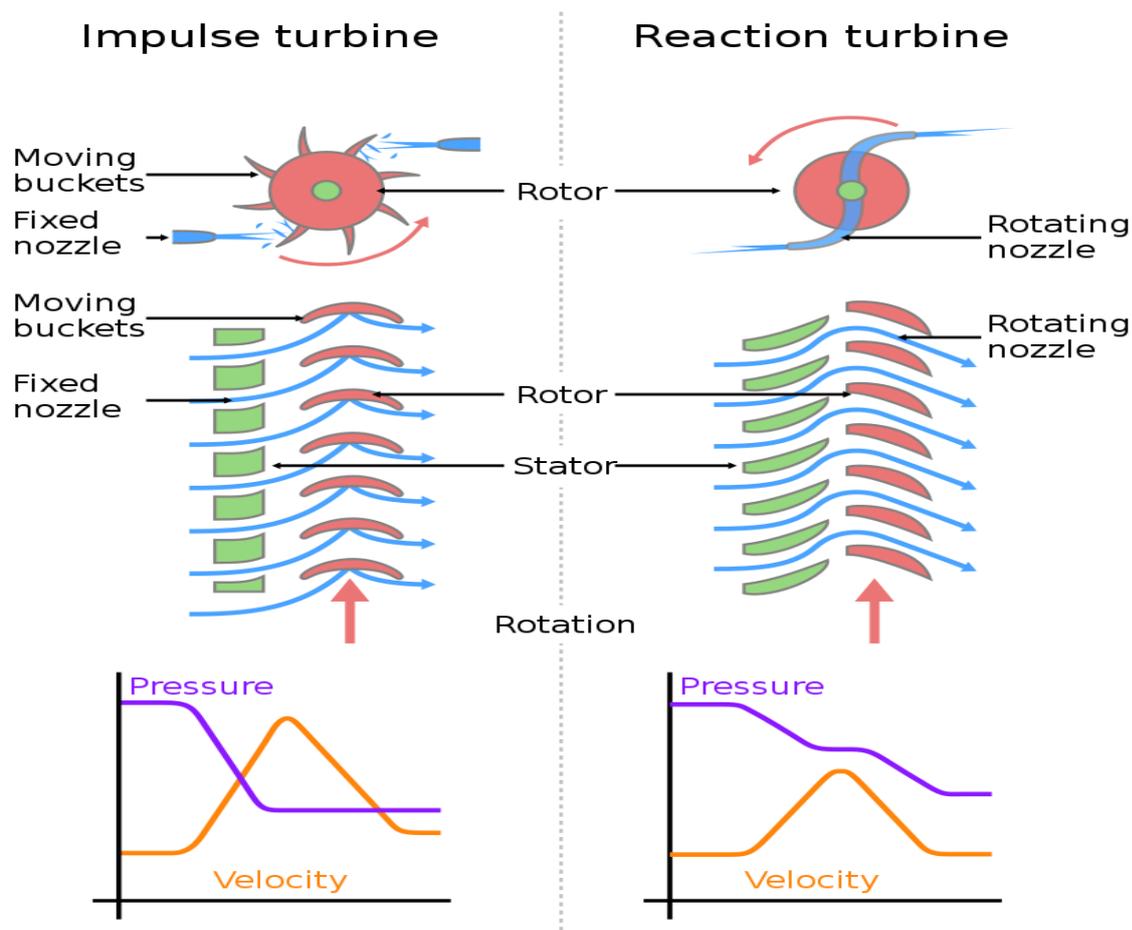


Figure 6: La différence entre la turbine à impulsion et la turbine à réaction

I.7. Classification par mode thermodynamique :

Le mode thermodynamique d'une turbine à vapeur dépend de la façon dont la vapeur est condensée, réchauffée ou extraite dans le cycle thermique. Le cycle thermique le plus courant pour les turbines à vapeur est le cycle de Rankine, qui décrit le fonctionnement d'un moteur thermique à pression constante.

I.7.1. Cycle de Rankine :

Le cycle de Rankine est un cycle thermodynamique qui permet de convertir la chaleur en travail mécanique, et donc en électricité, à l'aide d'un fluide de travail qui subit des transformations de phase.

Le cycle de Rankine est un cycle en boucle fermée qui utilise la vapeur comme fluide de travail. Le cycle se compose de quatre transformations principales, qui sont :

- 1. Compression isentropique (adiabatique) :** Le fluide, à l'état liquide, est comprimé à une pression élevée par une pompe, avec un faible travail consommé.
- 2. Vaporisation isobare :** Le fluide est ensuite chauffé à pression constante dans une chaudière, où il reçoit de la chaleur et se transforme en vapeur.
- 3. Détente isentropique (adiabatique) :** La vapeur est ensuite détendue dans une turbine, où elle fournit un travail mécanique important.
- 4. Liquéfaction isobare :** La vapeur est ensuite condensée à pression constante dans un condenseur, où elle cède de la chaleur et revient à l'état liquide, avant d'être renvoyée à la pompe.

Le cycle de Rankine présente l'avantage de réaliser la compression sur un liquide, ce qui réduit le travail nécessaire par rapport à un cycle où la compression se ferait sur un gaz. En effet, le liquide a un volume spécifique plus faible que le gaz, et donc une variation de volume plus faible lors de la compression. De plus, en condensant la vapeur à un liquide, la pression à la sortie de la turbine est abaissée, ce qui augmente la différence de pression entre l'entrée et la sortie de la turbine, et donc le travail produit. Ces facteurs contribuent à une plus grande efficacité pour le cycle.

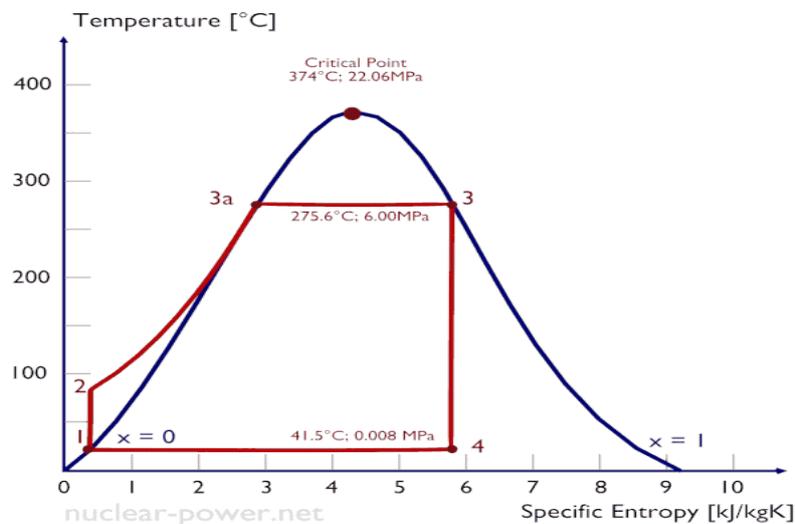


Figure 7: le schéma du cycle de Rankine

I.7.2. Cycle de Hirn :

Le cycle de Hirn est une version modifiée du cycle de Rankine, qui utilise de la vapeur surchauffée à une température supérieure au point critique. Il s'agit donc d'un cycle thermodynamique à vapeur directe. Le cycle de Hirn comprend les étapes suivantes :

1. **Compression** : L'eau à l'état de liquide saturé est comprimée par une pompe hydraulique.
2. **Vaporisation et surchauffe** : L'eau à l'état de liquide comprimé quitte la pompe et entre dans le générateur de vapeur, où elle subit une transformation isobare par échange de chaleur à la pression. Cette étape est composée par trois phases :
 - Élévation de la température du liquide à la pression p_2 , jusqu'à la température de saturation.
 - Vaporisation totale.
 - Surchauffe de la vapeur, qui passe d'un état de vapeur saturée sèche à un état de vapeur surchauffée.
3. **Détente** : La vapeur surchauffée est ensuite détendue dans une turbine, générant un travail mécanique.

4. Condensation : La vapeur est ensuite condensée à pression constante dans un condenseur pour être retransformée en liquide.

Le cycle de Hirn peut être vu comme la combinaison de deux cycles fonctionnant en parallèle : le premier est le cycle de Rankine simple initial, tandis que le second, à sa droite et en forme de dent, est le cycle de surchauffe ajouté.

Le cycle de Hirn présente l'avantage de permettre des titres de vapeur plus élevés en fin de détente.

Avec un taux inférieur à 0.88, les gouttelettes de liquide présentes dans la vapeur saturée seraient si nombreuses qu'elles endommageraient par érosion les aubes basses pression de la turbine.

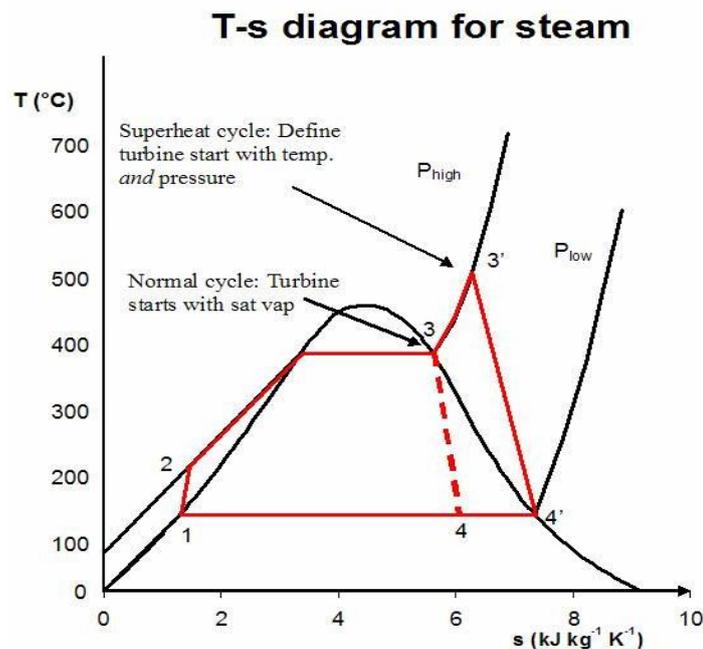


Figure 8: le cycle de Hirn

I.8. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions de base sur les turbines, qui sont des machines tournantes convertissant l'énergie d'un fluide en énergie mécanique. Nous avons retracé l'historique des turbines, depuis les premières éoliennes jusqu'aux turbines modernes utilisées dans les centrales électriques. Nous avons également décrit le fonctionnement d'un turboalternateur, qui est un ensemble constitué d'une turbine et d'un alternateur produisant de l'électricité.

Nous avons ensuite étudié les différents types de turbines, en fonction du fluide de travail, de la géométrie, de la vitesse et du sens de rotation. Nous avons plus particulièrement abordé les turbines à vapeur, qui sont les plus répandues dans les applications industrielles. Nous avons expliqué les principes de la thermodynamique appliqués aux turbines à vapeur, et nous avons distingué deux modes de travail : le mode isentropique et le mode réel.

Enfin, nous avons présenté les différents modes thermodynamiques des turbines à vapeur, en fonction du cycle suivi par le fluide de travail. Nous avons comparé les cycles ouvert, fermé et combiné, en analysant leurs avantages et leurs inconvénients en termes de rendement, de coût et d'impact environnemental. Nous avons conclu que le cycle combiné est le plus performant et le plus respectueux de l'environnement, mais aussi le plus complexe et le plus coûteux à mettre en œuvre.

Chapitre II :

Etude théorique et modélisation du l'alternateur

II.1. Introduction :

Dans les centrales de production, les alternateurs jouent un rôle crucial en convertissant l'énergie mécanique provenant des turbines (eau, vent ou vapeur) en énergie électrique. Cette énergie est par la suite distribuée aux points de consommation via des lignes à très haute tension.

Les machines électriques, de manière générale, se composent d'un rotor, qui est la partie rotative, et d'un stator, qui est la partie fixe. Ces machines sont qualifiées de réversibles car elles ont la capacité de transformer l'énergie électrique en énergie mécanique, ce qui correspond au mode moteur. Inversement, lorsqu'elles opèrent en mode générateur ou alternateur (pour les machines synchrones), elles transforment l'énergie mécanique en énergie électrique. Ces principes sont au cœur des systèmes de production d'énergie électrique.

II.2. Construction de l'alternateur :

Électriquement, un alternateur est formé de deux composants principaux :

- **L'inducteur et l'induit :**

L'inducteur est l'élément qui génère le champ magnétique et se compose d'électro-aimants agencés pour former des pôles nord et sud en alternance.

L'induit comprend tous les enroulements où est générée la tension électrique.

Il est à noter que, dans la plupart des alternateurs, l'inducteur est la partie mobile, alors que l'induit est la partie statique de l'appareil.

- **Stator et rotor**

D'un point de vue mécanique, un alternateur est principalement constitué de deux éléments : le rotor et le stator.

II.2.1. Stator :

Le stator, qui est la partie statique de l'alternateur, est généralement associé à l'induit.

Il est composé d'un noyau en tôle d'acier doté d'encoches pour accueillir les conducteurs formant les enroulements de l'induit.

Les enroulements du stator, faits de fils de cuivre isolés les uns des autres, sont arrangés en série dans les alternateurs monophasés et divisés en trois ensembles distincts espacés de 120° dans les alternateurs triphasés.

La structure externe du stator est une construction métallique soudée qui comprend une section cylindrique, deux brides, ainsi que des renforts radiaux et axiaux. Elle sert de support au circuit magnétique et à l'enroulement du stator.

Pour minimiser les pertes dues aux courants de Foucault, certaines zones de la structure proches des connexions de l'enroulement du stator sont fabriquées en acier non magnétique. Les autres sections sont principalement construites en acier. L'enceinte du stator est scellée du côté de la turbine et de l'excitatrice par des plaques de fermeture qui résistent à la pression. Ces plaques renferment les paliers de l'alternateur et les joints d'étanchéité de l'arbre.[9]

Le circuit magnétique est traversé par un champ magnétique rotatif, ce qui contribue à réduire les pertes par hystérésis et par courants de Foucault.

Dans cette zone active de l'alternateur, le circuit magnétique est formé d'un empilement de fines feuilles métalliques. Chaque couche de cet empilement est composée de multiples segments de tôles de silicium à haute résistivité, chacun étant isolé par une couche de vernis.[9]

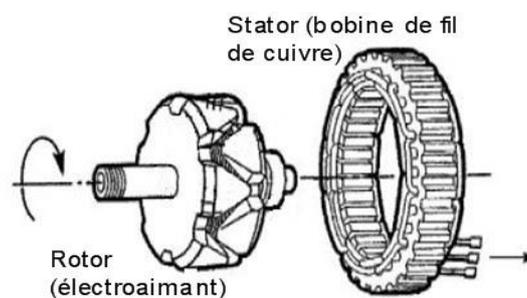


Figure 9 : construction du stator

II.2.2. Rotor :

Le rotor est la partie mobile de l'alternateur et contient les pièces polaires, aussi appelées l'inducteur ou "roue polaire".

Il existe deux types de rotors : à pôles saillants pour les alternateurs à basse vitesse et à pôles lisses pour les alternateurs à haute vitesse.

Les rotors à pôles saillants sont équipés de bobines d'excitation en cuivre fixées sur les pièces polaires, connectées en série pour alterner les polarités entre les pôles adjacents.

Ces alternateurs, dont la puissance varie entre 1 000 kVA et 250 MVA, sont couramment utilisés dans les centrales hydrauliques, les groupes de secours et sur les navires.

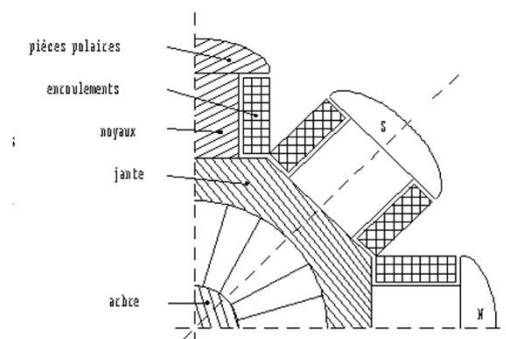


Figure 10 : Rotor à pôles saillants

Les rotors à pôles lisses sont adaptés aux petits alternateurs à haute vitesse, souvent désignés sous le terme de "turbo-alternateurs" en raison de leur vitesse de rotation élevée, avec des puissances pouvant atteindre 1,5 GVA, typiques des centrales thermiques classiques et nucléaires.[10][11]

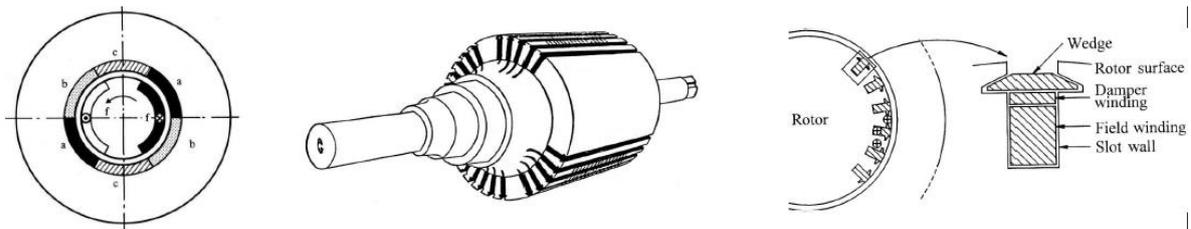


Figure 11 : Rotor à pôles lisses

II.2.3. Les bagues collectrices :

Sont fixés sur l'axe du rotor et connectés aux terminaisons du bobinage inducteur.

Des frotteurs en graphite restent en appui sur les anneaux grâce à des ressorts.

Cette configuration autorise le raccordement du bobinage inducteur à une source d'alimentation externe, qui en assure l'excitation.

Afin d'assurer le bon fonctionnement du dispositif anneaux/frotteurs, il est crucial de conserver une pression uniforme sur les frotteurs.

Par conséquent, le ressort est conçu pour exercer cette pression de manière constante tout au long de l'utilisation des frotteurs.

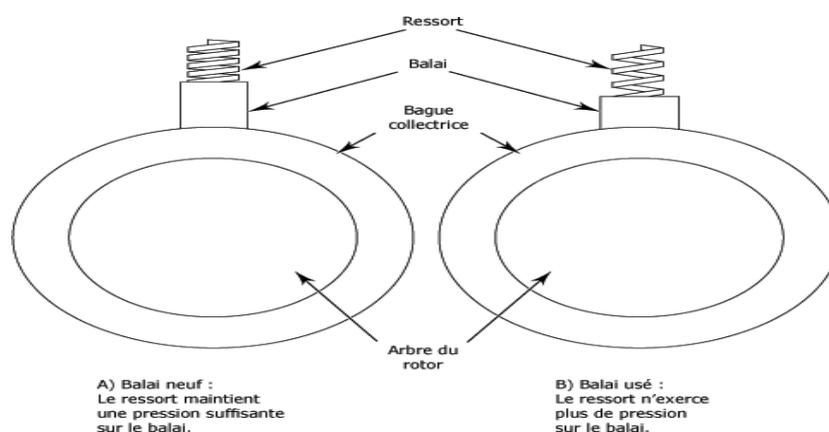


Figure 12: les bagues collectrices

II.2.4. Excitatrices :

Pour activer les alternateurs, il est nécessaire de recourir à une source d'énergie externe. Cette tâche est dévolue à l'excitatrice, qui est en réalité une petite génératrice à courant continu. Elle est responsable de l'alimentation des bobinages inducteurs de l'alternateur.

La tension générée par l'excitatrice est transmise aux bobinages inducteurs via les balais et les bagues collectrices, assurant ainsi la circulation du courant nécessaire.

Les excitatrices sont classées en deux types principaux :

- **Excitatrices mobiles** : L'excitatrice mobile, installée directement sur l'axe de l'alternateur, permet de contrôler le courant d'excitation de la génératrice, ce qui ajuste à son tour le courant dans le rotor de l'alternateur.
- **Excitatrices statiques** : Quant à l'excitatrice statique, il s'agit d'un dispositif plus moderne. Elle est constituée d'une source d'énergie électrique équipée de redresseurs à base de semi-conducteurs. Son principal atout est l'élimination des composants mécaniques en mouvement et des balais, réduisant ainsi les frais de maintenance.

II.2.5. Ventilateur :

Le générateur synchrone se distingue par son dispositif d'auto ventilation intégré. Un ventilateur centrifuge, positionné entre la roue polaire et le palier avant, assure la circulation de l'air au sein de l'appareil. L'air est aspiré à l'arrière de la machine et expulsé du côté du bout de l'arbre. Le ventilateur peut être constitué d'un noyau fixé sur l'arbre avec une flasque en acier soudée, sécurisée sur le moyeu à l'aide de vis à têtes hexagonales, ou bien d'un ventilateur monobloc en alliage d'aluminium serré sur l'arbre. L'air est évacué radialement sous l'effet de la force centrifuge.

II.3. Principe de fonctionnement de l'alternateur :

Nous allons détailler le fonctionnement d'un alternateur monophasé afin de saisir pleinement le fonctionnement d'un alternateur triphasé. La section suivante présentera ce concept en profondeur.

II.4. Fonctionnement d'un alternateur monophasé :

Pour simplifier l'explication, imaginons que le stator de l'alternateur monophasé ne contient qu'une seule boucle de fil, désignée par MN. Cette boucle traverse le stator en entrant par l'encoche A et en ressortant par A'. Elle continue son chemin en entrant dans l'encoche opposée en B' et en ressortant en B. Ce modèle simplifié permet de visualiser comment le flux magnétique, généré par le rotor en mouvement, traverse la boucle MN et induit un courant électrique alternatif selon le principe de l'induction électromagnétique. Dans cette configuration, lorsque le rotor tourne, le champ magnétique varie à travers la boucle MN, créant ainsi une tension électrique qui oscille, produisant du courant alternatif.[9]

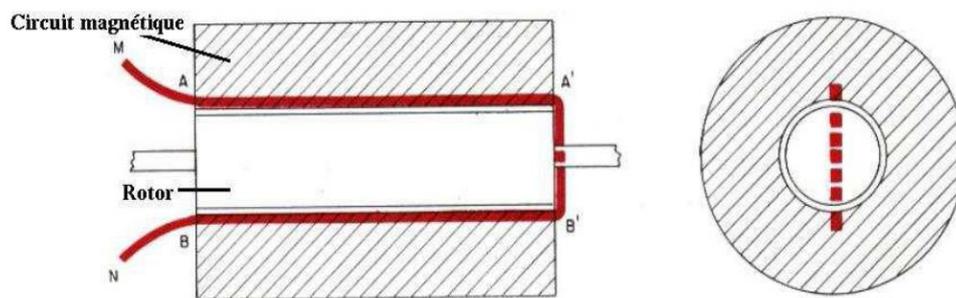


Figure 13: spire stator MN

Lorsqu'un courant continu est appliqué au rotor et que celui-ci est mis en rotation à une vitesse un champ magnétique est produit. Ce champ, lorsqu'il se déplace devant un conducteur, induit une force électromotrice (f.é.m.) dans le conducteur. Voici les caractéristiques de cette f.é.m. induite :

- **Valeur proportionnelle** : La valeur de la f.é.m. est directement proportionnelle à l'intensité du champ magnétique (H) et à la vitesse de rotation de l'aimant. Cela signifie que plus le champ est fort et plus la vitesse de rotation est élevée, plus la f.é.m. induite sera importante.
- **Sens déterminé par la règle du tire-bouchon** : Le sens de la f.é.m. induite est déterminé par la règle du tire-bouchon (ou règle de la main droite), qui stipule que si

l'on pointe le pouce de la main droite dans le sens de la vitesse de rotation de l'aimant, les doigts courbés indiqueront le sens du champ magnétique induit.

En conséquence, la f.é.m. générée dans le conducteur AA' est proportionnelle à (H) et à la vitesse du rotor, ce qui peut être exprimé par la relation suivante :

$$e_1 = K_1 H v \quad (1)$$

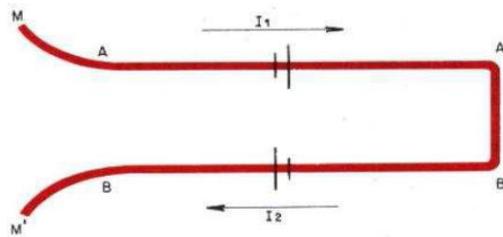


Figure 14: Sens du courant dans MN

Dans un alternateur, l'utilisation de plusieurs spires dans la bobine du stator a pour but d'augmenter la force électromotrice (f.é.m.) totale induite. Chaque spire contribue à la f.é.m. globale, et leur somme produit une tension plus élevée que celle générée par une seule spire.

Lorsque le bobinage du rotor est alimenté en courant continu, il se comporte comme un aimant avec des pôles Nord et Sud. La répartition du bobinage autour de la périphérie du rotor crée un champ magnétique qui varie en intensité autour du rotor. Dans un alternateur à deux pôles, le champ magnétique n'est pas uniforme sur toute la périphérie ; il est plus fort près des pôles magnétiques et s'affaiblit entre eux.

La **Figure 15: Champ H d'un rotor** illustrerait probablement la variation du champ magnétique autour du rotor. En général, cette variation est représentée par une courbe sinusoïdale, où la valeur du champ magnétique change en fonction de la position angulaire par rapport aux pôles du rotor.

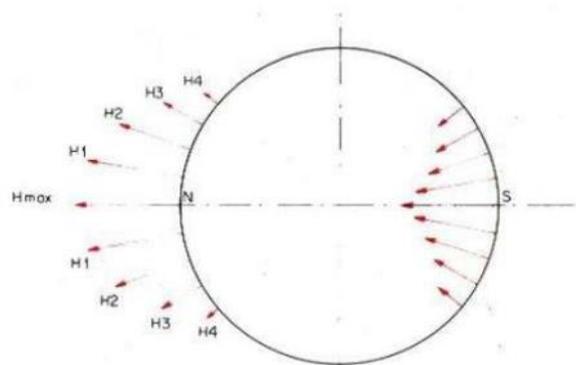


Figure 15: Champ H d'un rotor

En résumé, la f.é.m. induite dans chaque spire est proportionnelle à la vitesse de rotation du rotor et à l'intensité du champ magnétique à cet endroit précis. La f.é.m. totale est la somme des contributions de toutes les spires, ce qui permet d'obtenir une tension de sortie plus élevée pour l'alternateur.

Imaginons que la circonférence du rotor soit segmentée en 36 parties équivalentes. Si le rotor effectue une rotation complète en une seconde, et que le pôle nord est face au conducteur AA' du stator au début du cycle (temps zéro), la force électromotrice (f.é.m.) induite sera maximale et égale à $K H_{max} \omega$

À mesure que le rotor tourne, la f.é.m. induite dans le conducteur AA' variera comme suit :

- $\frac{1}{36}$ éme de seconde après elle sera à : $K H_1 \omega$
- $\frac{2}{36}$ éme de seconde après elle sera à : $K H_2 \omega$
- $\frac{3}{36}$ éme de seconde après elle sera à : $K H_3 \omega$

Et ainsi de suite, jusqu'à ce que le pôle sud soit face au conducteur AA', soit à $\frac{18}{36}$ de seconde.

À ce moment, la f.é.m. reprendra la valeur $K H_{\max} \omega$ mais son sens sera inversé par rapport à celui qu'elle avait au temps zéro. Ce cycle se répétera chaque seconde.

La variation de la f.é.m. peut être représentée par une courbe sinusoïdale, où la valeur de la f.é.m. fluctue en fonction de la position angulaire du rotor. À chaque instant, la f.é.m. est proportionnelle à la composante du champ magnétique perpendiculaire au conducteur et à la vitesse de rotation du rotor.

En résumé, la f.é.m. induite dans le conducteur varie périodiquement avec la rotation du rotor, passant par une valeur maximale lorsque les pôles magnétiques sont alignés avec le conducteur, et s'inversant lorsque le pôle opposé se trouve en face. Cette alternance crée un courant alternatif qui est la base du fonctionnement des alternateurs.

La figure suivante donne les positions du rotor dans le stator aux différents points de fonctionnement A, B, C, D et E.

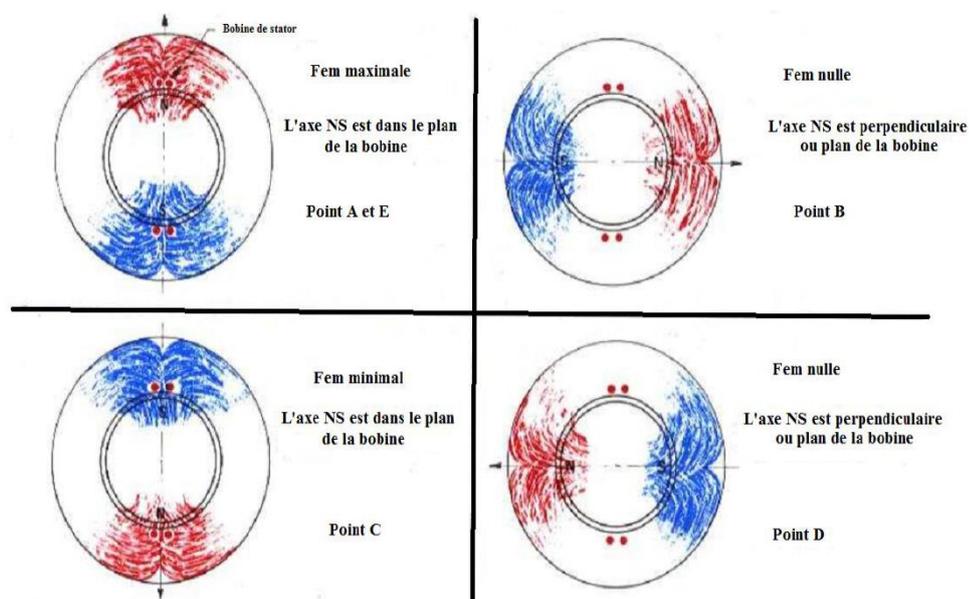


Figure 16: Positions du rotor

Le courant inducteur (i), également connu sous le nom de courant d'excitation de l'alternateur, est celui qui satisfait à l'équation et est directement lié à l'intensité maximale du champ magnétique H_{\max} selon la relation :

$$I = K H_{max} \quad (2)$$

Où (K) est une constante de proportionnalité.

La force électromotrice maximale E_{max} est fonction du courant d'excitation et de la vitesse de rotation du rotor. Elle est souvent exprimée en termes de nombre de tours n effectués par le rotor par unité de temps (tours par seconde), comme suit :

$$E_{max} = K i n \quad (2.1)$$

Cela signifie que la force électromotrice maximale est proportionnelle à la fois au courant d'excitation et à la vitesse angulaire du rotor. L'augmentation de l'un ou de l'autre de ces paramètres entraînera une augmentation de la force électromotrice générée par l'alternateur. Cette relation est fondamentale pour comprendre comment contrôler la sortie électrique d'un alternateur dans des applications pratiques.

II.5. Fonctionnement d'un alternateur triphasé :

L'enroulement statorique triphasé est une configuration clé dans la conception des alternateurs et des moteurs électriques. Dans cette configuration, trois enroulements distincts (A1, A2, A3) sont placés autour du stator, chacun étant décalé de 120° par rapport aux autres.

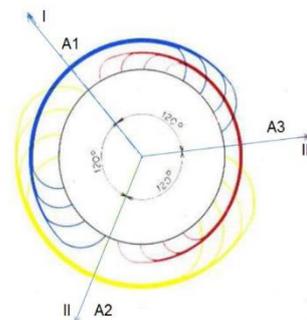


Figure 17: stator triphasé

Dans un système triphasé, chaque bobine génère une force électromotrice (f.é.m.) qui a la même valeur maximale et la même période. Cependant, les f.é.m. induites dans les trois bobines sont déphasées de 120° ou d'un tiers de période les unes par rapport aux autres. Cela

signifie que si l'on considère un rotor effectuant un tour par seconde, les f.é.m. induites dans les bobines A1, A2 et A3 auront des courbes sinusoïdales décalées dans le temps.

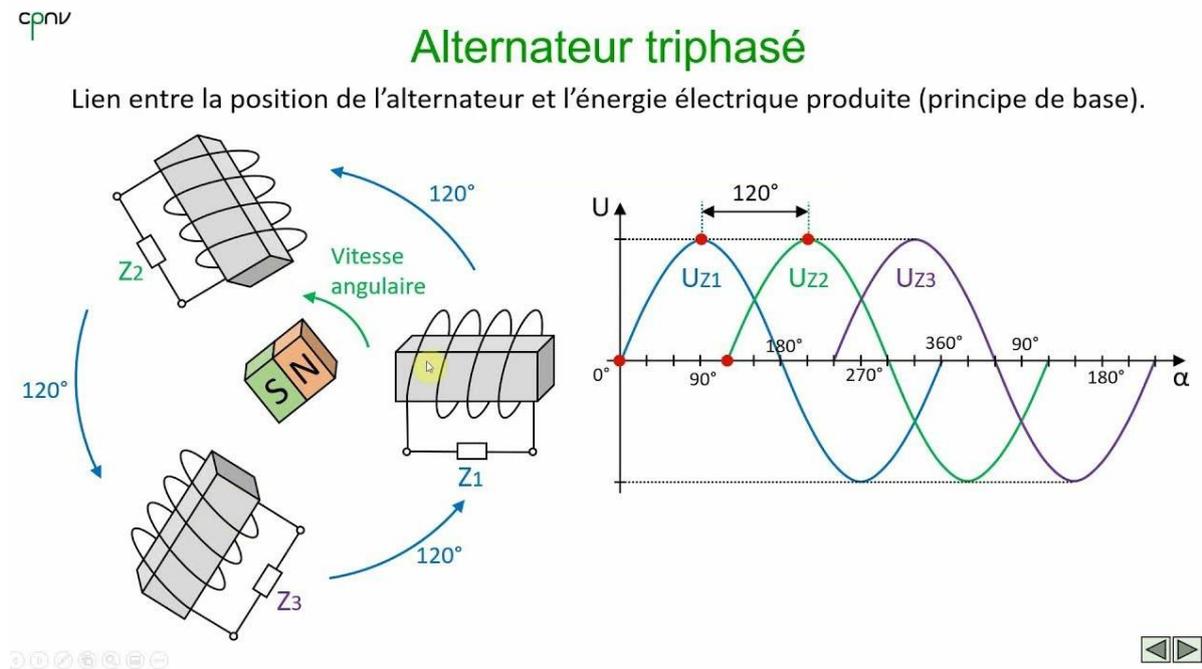


Figure 18

II.6. L'induction magnétique et les champs tournants :

L'effet de l'induction électromagnétique découle des interactions entre conducteurs, courants et champs magnétiques. Cet effet se traduit de trois manières distinctes :

- Un conducteur en mouvement à travers un champ magnétique génère une tension électrique (phénomène générateur).
- Un conducteur électrifié situé dans un champ magnétique est sujet à un mouvement (phénomène moteur).

Une variation du champ magnétique entourant un conducteur immobile provoque l'apparition d'une tension électrique dans ce dernier (inductance mutuelle). Dans le cadre de cette recherche, l'objectif sera d'approfondir :

- L'action génératrice
- L'action motrice
- L'inductance mutuelle ; dues à l'induction électromagnétique.

II.7. Les lois Lenz-faraday :

Les principes énoncés par Faraday et Lenz constituent la pierre angulaire de l'électromagnétisme, décrivant la génération de courants électriques par des variations de champs magnétiques. Voici une explication reformulée de ces lois fondamentales :

II.7.1. Loi de Faraday :

La loi de Faraday, également appelée loi d'induction électromagnétique, stipule qu'une variation du flux magnétique traversant une boucle conductrice provoque l'apparition d'une force électromotrice (f.é.m.) dans cette boucle. Mathématiquement, cette loi se formule ainsi :

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (3)$$

Où :

- e représente la f.é.m. induite
- Φ Le taux de variation du flux magnétique à travers la boucle.

II.7.2. Loi de Lenz :

La loi de Lenz détermine la direction de la f.é.m. induite et du courant résultant. Selon cette loi, la f.é.m. induite s'oppose toujours au changement qui l'a engendrée. Autrement dit, si le flux magnétique à travers la boucle s'accroît, la f.é.m. induite générera un courant dont le champ magnétique antagoniste s'opposera à cette augmentation. À l'inverse, si le flux diminue, le courant induit produira un champ magnétique visant à préserver le flux existant. [9][10]

L'association des lois de Faraday et de Lenz nous offre une vision exhaustive de l'induction électromagnétique, expliquant non seulement la grandeur de la f.é.m. induite mais également sa direction. Ces lois jouent un rôle crucial dans le fonctionnement des générateurs électriques, des transformateurs et d'une multitude d'autres appareils électromagnétiques.[11]

II.7.3. L'action génératrice :

Lors du déplacement d'un conducteur à travers un champ magnétique, une tension se forme à ses bornes.

Cette tension, appelée force électromotrice (f.é.m.), est le fruit d'une conversion d'énergie mécanique en énergie électrique, caractérisant ainsi une action génératrice.

Considérez l'illustration suivante : un conducteur se meut horizontalement entre les pôles d'un aimant fixe. À ce moment précis, il traverse les lignes du champ magnétique, ce qui engendre une tension à ses extrémités.

Dans le cas où le conducteur se déplacerait parallèlement aux lignes du champ (verticalement), aucune tension ne serait induite, puisqu'il n'intercepterait aucune ligne de champ. De la même façon, si le conducteur s'immobilisait, la tension induite disparaîtrait également.

a) Valeur de la tension induite :

La tension induite dans un conducteur est influencée par plusieurs éléments, notamment :

- **La dimension** du conducteur qui traverse le champ magnétique.
- **La rapidité** avec laquelle le conducteur se déplace.
- **La puissance** du champ magnétique auquel le conducteur est exposé.

Pour déterminer la tension induite, on utilise la formule mathématique suivante :

$$E = B * l * v * \sin \theta \quad (4)$$

Où :

- **E** est la tension induite.
- **B** est l'induction magnétique.
- **l** est la longueur du conducteur.
- **v** est la vitesse de déplacement du conducteur.
- **θ** est l'angle entre le conducteur et la direction du champ magnétique.

b) Sens de la tension induite :

La direction de la tension induite est déterminée par :

- La direction dans laquelle le conducteur se meut.
- L'orientation des lignes du champ magnétique.

Pour visualiser ces concepts, imaginez un diagramme illustrant les quatre scénarios possibles où la direction de la tension induite varie en fonction de la trajectoire du conducteur et de l'orientation des lignes de champ magnétique. Chaque scénario représente une combinaison différente de mouvement du conducteur et de direction des lignes de champ, démontrant comment ces facteurs influencent la tension induite.

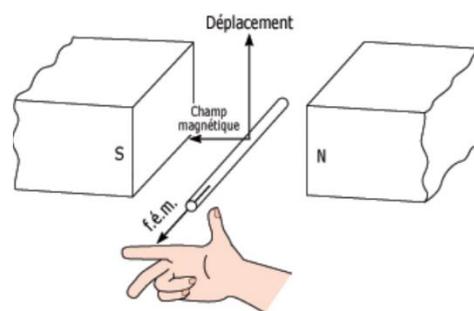


Figure 19: Règle des trois doigts de Fleming

En consultant le schéma dans la **Figure 19**, on peut évaluer la polarité de la f.é.m. induite grâce à la méthode des trois doigts de Fleming, qui se résume de la manière suivante :

1. Disposer le pouce, l'index et le majeur perpendiculairement entre eux.
2. Orienter le pouce dans la direction du mouvement du conducteur.
3. Aligner l'index parallèlement aux lignes du champ magnétique.
4. Dans cette position, le majeur indiquera le côté positif du conducteur.

c) Tension induite dans un cadre :

Le fonctionnement des alternateurs repose sur le déplacement d'une structure conductrice au sein d'un champ magnétique. La **Figure 20** illustre un cadre conducteur qui se meut dans le champ magnétique émanant d'un aimant fixe. Ce mouvement crée une

tension électrique alternée, exploitée pour générer du courant alternatif. Ce principe est essentiel dans la production d'électricité et trouve son application dans de nombreux dispositifs électromécaniques.

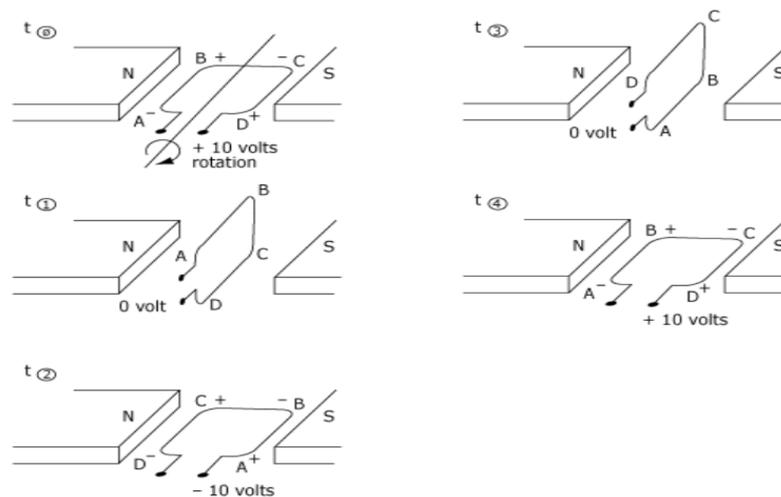


Figure 20: induction dans un cadre mobile

Au moment initial t_0 :

Les conducteurs AB et CD se déplacent de manière perpendiculaire par rapport aux lignes du champ magnétique. En conséquence, la tension induite dans chaque conducteur atteint son pic (imaginons + 5 V). Les forces électromotrices induites dans AB et CD présentent des polarités opposées.

Concrètement, alors que le conducteur AB traverse les lignes de champ de bas en haut, le conducteur CD les traverse de haut en bas. Les tensions induites dans les deux conducteurs s'associent comme si elles étaient deux batteries connectées en série, résultant en une tension globale de + 10 V.

- **Au moment t_1 :**

Après une rotation de 90° dans le sens horaire, les conducteurs AB et CD se déplacent parallèlement aux lignes de champ, ce qui annule la tension induite dans chacun d'eux. Ainsi, pendant la rotation du cadre de t_0 à t_1 , la tension induite chute de son maximum (10 V) à zéro.

- **Au moment t_2 :**

Suite à une autre rotation de 90° dans le sens horaire, les conducteurs AB et CD retrouvent une position perpendiculaire aux lignes de champ, ce qui rétablit les tensions induites maximales. Cependant, le sens de déplacement des conducteurs est inversé par rapport à t_0 , ce qui inverse également la polarité des tensions induites, aboutissant à une tension totale de -10 V .

- **Au moment t_3 :**

Avec un autre quart de tour, la force électromotrice du cadre est nulle, car les conducteurs se déplacent parallèlement aux lignes de champ magnétique.

- **Enfin, au moment t_4 :**

Le cadre revient à sa position initiale et la tension induite est de nouveau à $+10\text{ V}$. Ce cycle se répète à chaque rotation complète du cadre.

On peut représenter graphiquement les différentes valeurs que prend la tension. On obtient alors une courbe ondulée comme celle qui apparaît à la figure suivante :

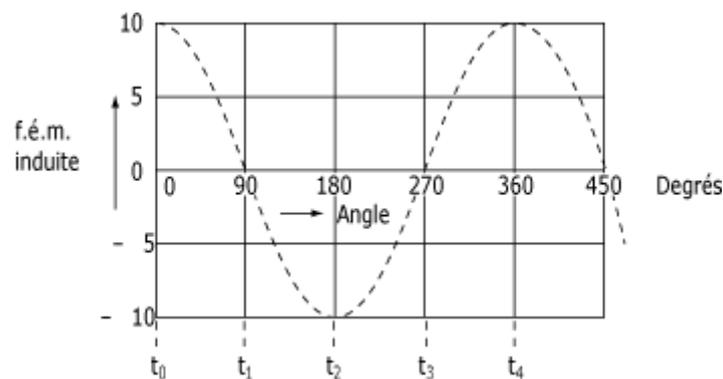


Figure 21

II.8. Les systèmes d'excitations :

Le système d'excitation doit ajuster le courant de champ pour exciter la génératrice synchrone et maintenir la tension de sortie conformément à la consigne. Il fournit également le courant continu aux bobines du rotor pour créer un champ magnétique.

L'excitation assure le contrôle de la tension et de la puissance réactive. Elle joue également un rôle dans certaines fonctions de protection du réseau, en respectant les limites des machines.

Du point de vue de l'installation électrique, le système d'excitation doit contribuer à un contrôle efficace de la tension et à l'amélioration de la stabilité du système. Cela inclut le maintien de la stabilité transitoire en cas de perturbations et de faibles signaux. Les systèmes d'excitation modernes sont capables de fournir une réponse quasi instantanée, même avec des tensions élevées (HT).

II.8.1. Éléments d'un système d'excitation :

Le schéma ci-dessous représente les différentes parties et les éléments d'un système d'excitation appliqué pour les génératrices synchrones.

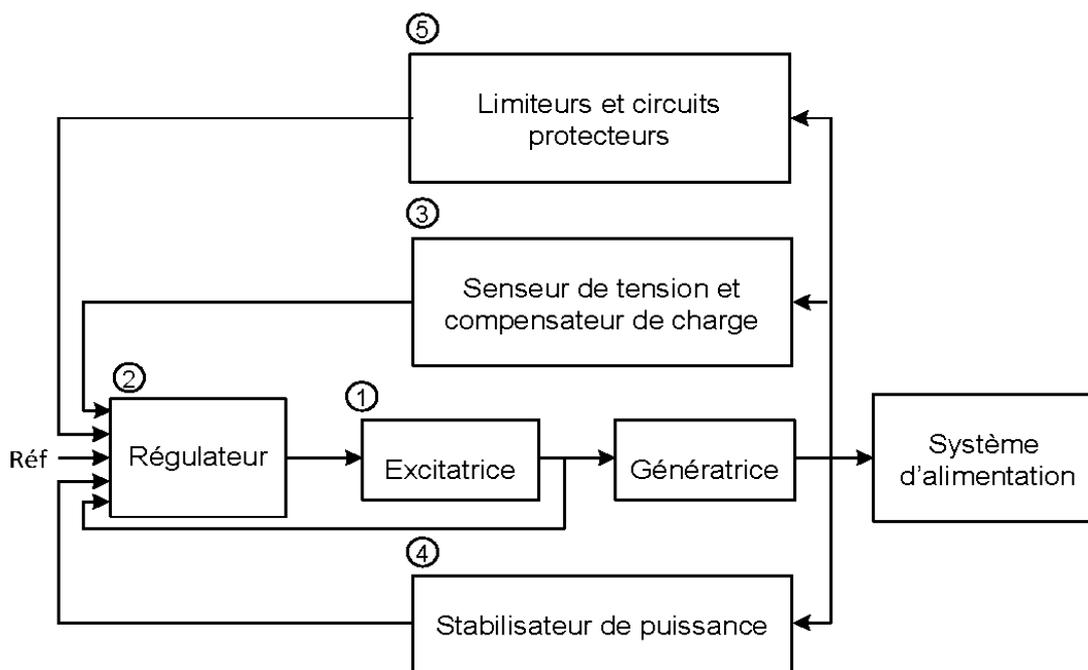


Figure 22:Schéma fonctionnel du système d'excitation d'une génératrice

1. **Excitatrice** : Fournit la puissance aux bobines qui créent le champ magnétique au rotor. Pour un générateur de 600 MW, une excitatrice d'environ 1 MW est typiquement nécessaire.

2. **Régulateur** : Contrôle et stabilise le signal d'entrée de l'excitatrice.
3. **Capteur de tension et compensateur de charge** : le capteur de tension mesure la tension aux bornes de la machine, la filtre et la redresse en une valeur continue. Cette mesure est ensuite comparée à la référence (tension souhaitée aux bornes de la machine). Le compensateur de charge est un élément facultatif qui maintient une tension constante en un point spécifique éloigné des bornes de la machine.
4. **Stabilisateur de puissance (PSS : Power System Stabilizer)** : Un stabilisateur de système de puissance (SSP) est un dispositif de contrôle conçu pour améliorer la stabilité du système en fournissant un signal supplémentaire au régulateur de vitesse. Ce signal a pour but de réduire les oscillations du système. Les entrées typiques pour le SSP incluent la variation de la vitesse de rotation, la variation de la puissance électrique ou les changements dans la fréquence du réseau. Fournit un signal d'entrée supplémentaire au régulateur du système d'excitation pour amortir les oscillations de puissance à basse fréquence du réseau électrique.
5. **Limiteurs et circuits de protection** : Assurent que les limites du circuit d'excitation et du générateur ne sont pas dépassées. Ils incluent des dispositifs tels que la limitation du courant d'excitation, les limiteurs de surexcitation, de tension et de sous-excitation.

II.8.2. Types de système d'excitation :

En fonction de la source d'alimentation, les systèmes d'excitation pour les génératrices synchrones se répartissent en trois types essentiels :

- Systemes d'excitation à courant continu (DC).
 - Systemes d'excitation à courant alternatif (AC).
 - Systemes d'excitation statique.
- a) Systemes d'excitation à courant continu (DC) :

Dans cette configuration, une **machine à courant continu** sert de source d'excitation, alimentant en courant le rotor de la génératrice synchrone via des **bagues collectrices**. Cette machine est actionnée par un moteur relié à l'arbre de la génératrice et peut fonctionner en auto excitation ou avec une source d'excitation externe. De nos jours, cette méthode d'excitation est peu employée dans les études de stabilité en raison de sa complexité de

modélisation. Elle est généralement supplantée par des excitatrices à courant alternatif ou des systèmes d'excitation statiques.

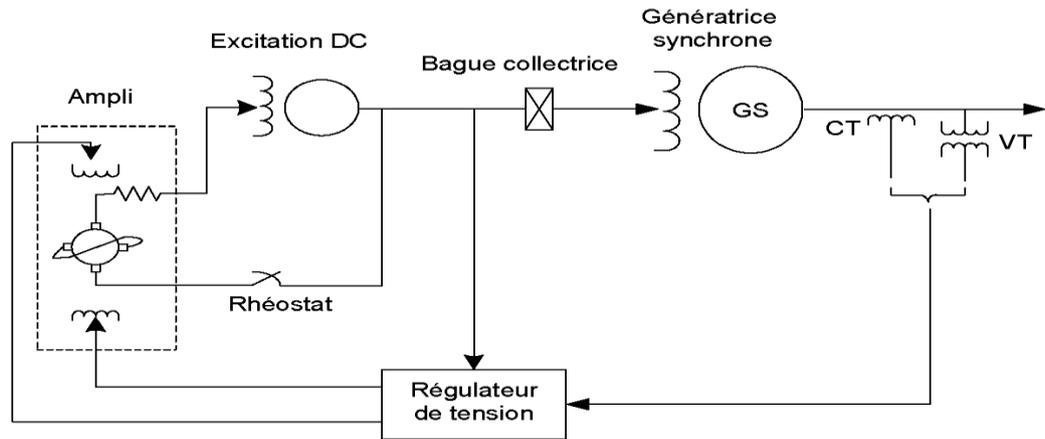


Figure 23: système d'excitation DC

b) Systemes d'excitation à courant alternatif (AC) :

L'excitatrice à courant alternatif fonctionne avec un alternateur couplé à un redresseur, fixe ou rotatif, pour générer le courant nécessaire à l'excitation du rotor de la machine synchrone. Selon le type de redresseur employé, commandé ou non, le réglage du courant de champ se fait directement sur les bobinages de l'excitatrice AC. Les schémas correspondants illustrent une excitatrice AC équipée d'un redresseur fixe non commandé et d'un redresseur commandé, chacun présentant sa propre méthode de régulation du courant de champ.

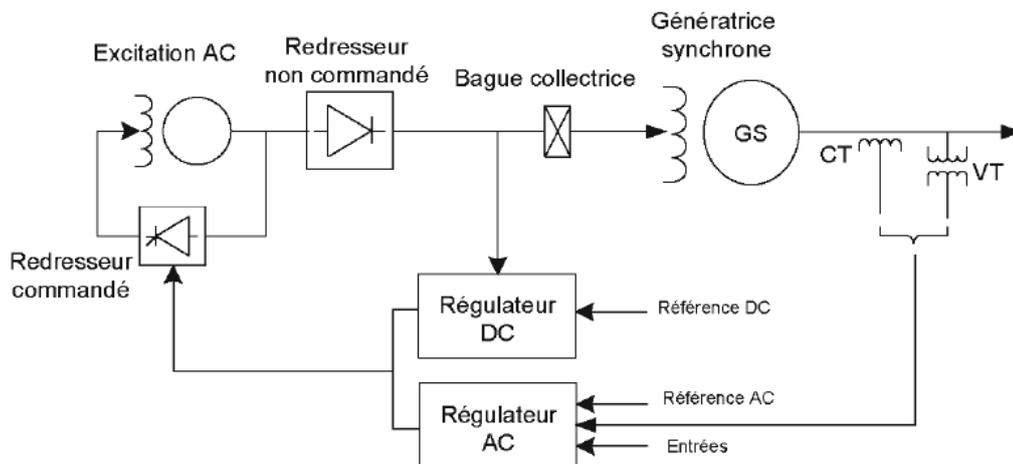


Figure 24: Excitation de type AC avec redresseur non commandé

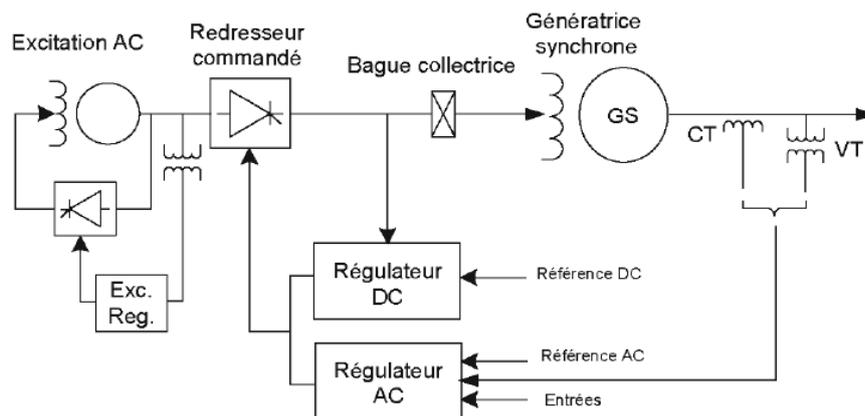


Figure 25: Excitation de type AC avec redresseur commandé

Lorsque l'excitation à courant alternatif est associée à un redresseur tournant, les bagues collectrices sont éliminées. La sortie du redresseur à diodes est directement connectée à la machine synchrone. L'illustration ci-dessous montre l'excitation AC de type "Brushless", où l'on observe une structure tournante composée de l'excitatrice principale AC et du redresseur à diodes. La sortie du redresseur de l'excitatrice pilote active le champ magnétique dans cette structure tournante.

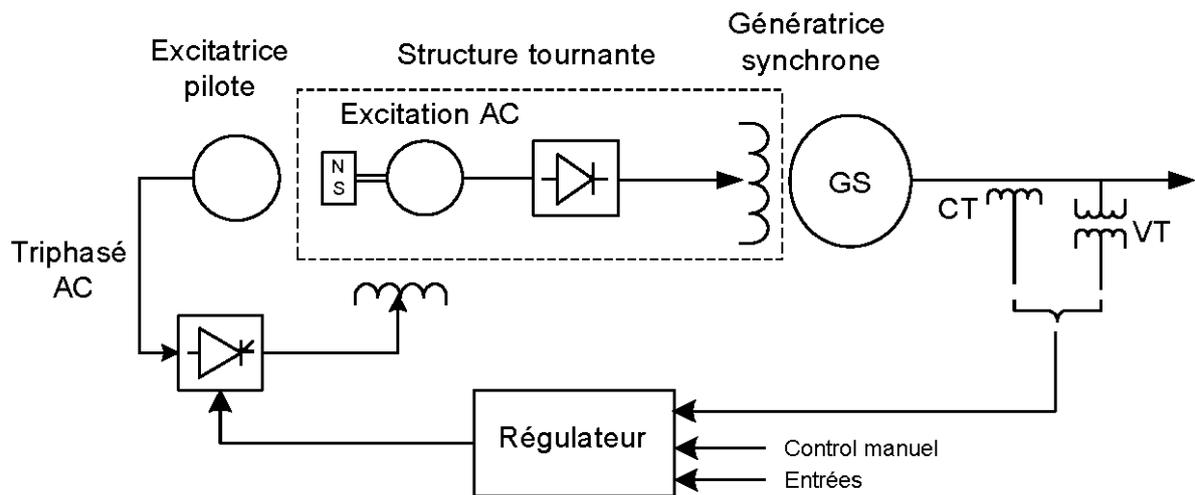


Figure 26: Système d'excitation de type Brushless

c) Systèmes d'excitation statique :

Dans les systèmes d'excitation de type statique, les éléments sont fixes et ne comportent pas de pièces mobiles. Le redresseur statique délivre le courant nécessaire à l'excitation de la génératrice synchrone via des bagues collectrices. Ce courant est lui-même fourni par la génératrice synchrone au moyen d'un transformateur d'excitation. Il existe trois variantes principales de l'excitation statique :

a) Avec redresseur commandé à source de tension :

C'est le système le plus répandu, caractérisé par l'absence de composants rotatifs à l'exception de la machine elle-même. Il utilise un générateur de tension, un autotransformateur d'excitation et un pont de thyristors pour convertir la tension AC entrante. Ce système permet l'emploi de divers types de correcteurs et régulateurs (comme PI, PID, Flous, etc.), est économique et simple à entretenir, et est particulièrement bien adapté aux petites installations hydroélectriques.

b) Avec redresseur non commandé à source combinée :

Cette configuration utilise un redresseur non commandé qui tire son alimentation d'une combinaison de sources.

c) Avec redresseur commandé à source combinée :

Semblable à la précédente, mais avec un redresseur commandé permettant un contrôle plus précis du courant d'excitation.

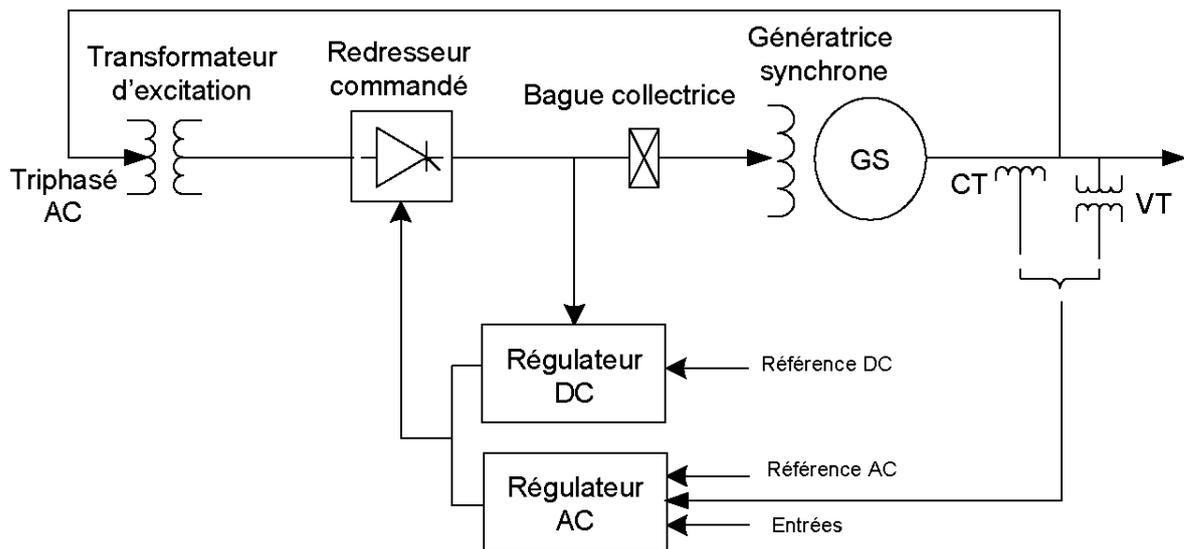


Figure 27: Excitatrice statique par redresseur commandé à source de tension

II.9. Modèle de Behn-Eschenburg d'un alternateur :

Le schéma présenté dans la figure illustre le circuit triphasé correspondant aux caractéristiques de la machine. L'analyse des équations de maille pour chaque phase met en évidence un schéma monophasé équivalent simple basé sur une inductance équivalente appelée inductance synchrone. Ce modèle est connu sous le nom de modèle linéaire de Behn-Eschenburg. Il repose sur la linéarité du circuit magnétique de la machine, ce qui permet l'utilisation légitime des inductances (propre et mutuelle). Cependant, lorsque nous mesurons la valeur efficace de la force électromotrice E , chaque phase peut être caractérisée par sa propre force électromotrice interne, sa résistance série R , son inductance propre L et son inductance mutuelle M avec les deux autres phases.

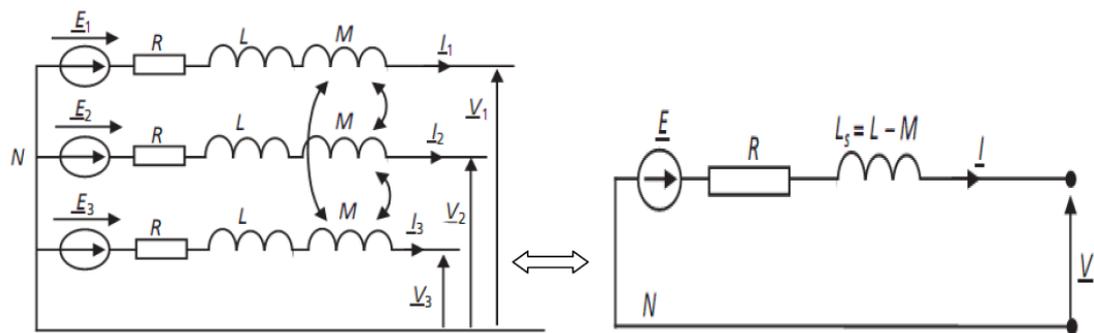


Figure 28: Schéma électrique et schéma monophasé équivalent de Behn-Eschenburg

Les relations de maille :

$$\begin{cases} E_1 = RI_1 + jL\omega I_1 + jM\omega I_2 + jM\omega I_3 + V_1 \\ E_2 = RI_2 + jL\omega I_2 + jM\omega I_1 + jM\omega I_3 + V_2 \\ E_3 = RI_3 + jL\omega I_3 + jM\omega I_1 + jM\omega I_2 + V_3 \end{cases} \quad (5.1)$$

Si la machine est équilibrée ou sans neutre,

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0 \quad (5.2)$$

C'est-à-dire :

$$E_1 = RI_1 + jL\omega I_1 + jM\omega(I_2 + I_3) + V_1 \quad (5.3)$$

$$E_1 = [R + j(L - M)\omega]I_1 + V_1 \quad (5.4)$$

Les relations de maille du schéma monophasé équivalent :

$$E = [R + jL_s\omega]I + V \quad (5.5)$$

L_s : inductance dite « synchrone »

On parle aussi de la « réactance synchrone » :

$$X_s = L_s \cdot \omega \quad (5.6)$$

Lorsque l'on analyse l'effet du courant d'excitation I_{ex} on remarque un phénomène de saturation. La représentation graphique montre la courbe caractéristique de la tension $E(I_{ex})$

et le schéma équivalent pour le mode saturé. En présence de saturation magnétique, l'inductance synchrone devient inappropriée, rendant le modèle initial inexact. Dans ce cas, le modèle est ajusté pour inclure seulement l'inductance de fuite de la machine, qui ne subit pas de saturation, et la tension à vide réelle, préalablement mesurée. L'analyse des comportements en régime saturé nécessite des techniques spécifiques qui ne sont pas abordées dans ce contexte.

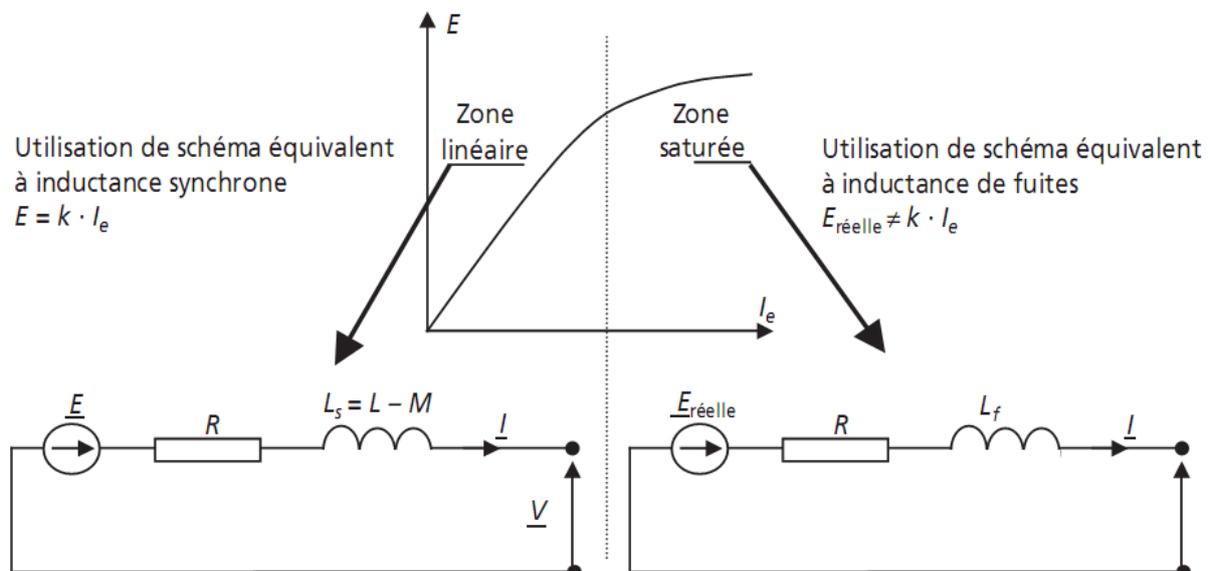


Figure 29: Zone linéaire et zone de saturation de la machine

II.10. Analyse de fonctionnement des alternateurs :

II.10.1. Caractéristique en vide :

La caractéristique à vide d'un alternateur est déterminée en le faisant fonctionner en circuit ouvert, à sa vitesse de synchronisme. Cette vitesse est cruciale car la force électromotrice (f.é.m.) générée est proportionnelle à la vitesse de rotation. Pour mesurer la tension, on utilise un voltmètre connecté aux bornes de l'induit : entre le neutre et une phase pour un montage en étoile, ou entre deux phases pour un montage en triangle. L'inducteur peut être alimenté soit par le système d'excitation de l'alternateur, soit par une source externe. Le voltmètre alternatif utilisé mesure alors la valeur efficace de la tension $U_v = E_v$, qui est la tension mesurée aux bornes de l'alternateur.

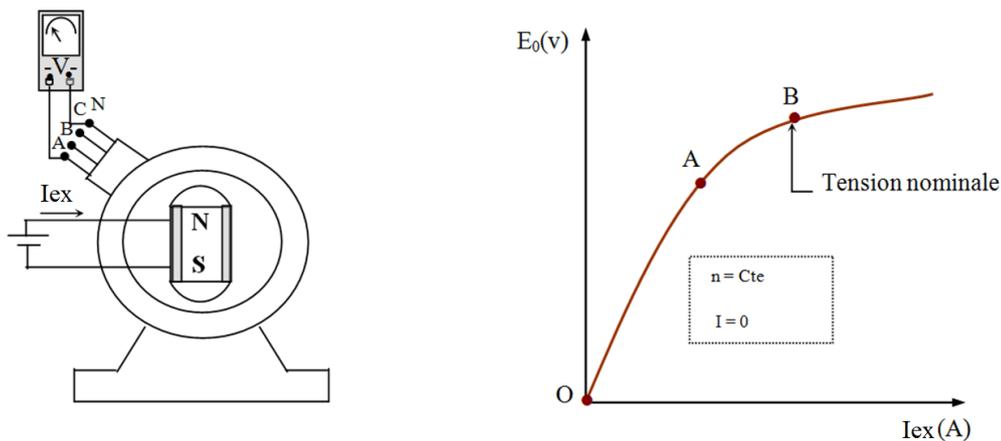


Figure 30:Caractéristique d'un alternateur à vide

La caractéristique à vide d'un alternateur se manifeste par une courbe qui commence par une section linéaire OA, où la force électromotrice (f.é.m.) E est directement proportionnelle au courant d'excitation I_{ex} . Cette relation linéaire continue jusqu'à un point de flexion AB, après lequel l'alternateur atteint un état de saturation quasi-complet. Dans cette zone de saturation, toute augmentation supplémentaire du courant d'excitation I_{ex} ne produit qu'une faible augmentation de la f.é.m. (E), malgré la poursuite de l'augmentation du courant d'excitation. Cela indique que l'alternateur ne peut plus efficacement convertir l'énergie d'excitation en f.é.m. supplémentaire.

II.10.2. Caractéristique en charge :

Dans les systèmes de génération d'énergie, on distingue deux catégories de caractéristiques liées à la charge :

- **Caractéristiques progressives** : Elles correspondent à l'augmentation de la tension aux bornes en réaction à l'accroissement du courant de charge I .
- **Caractéristiques de régulation** : Elles indiquent la nécessité d'ajuster le courant inducteur pour assurer une tension U stable.

La présence d'une baisse significative de tension interne souligne l'importance d'un système de régulation de tension performant, capable de maintenir une tension constante de l'alternateur, du fonctionnement à vide jusqu'à la pleine charge.

Pour analyser le régulateur de tension automatique, il est pratique de représenter graphiquement la caractéristique de régulation.

$$I_{ex} = f(I)$$

, où la tension U est maintenue constante avec un facteur de puissance $\cos\varphi$ fixe. Grâce à ces courbes, il est possible de déterminer le réglage adéquat de I_{ex} en fonction du courant initial et du déphasage, afin de conserver la tension U . Ce mécanisme constitue un régulateur de tension efficace.

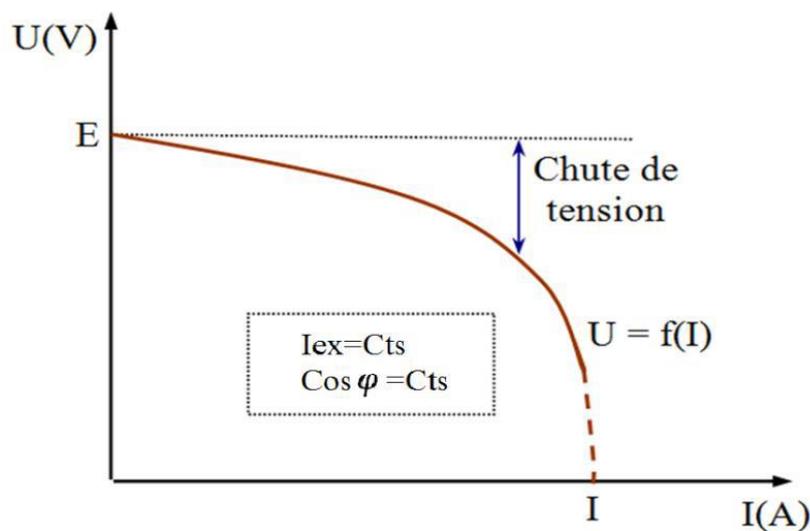
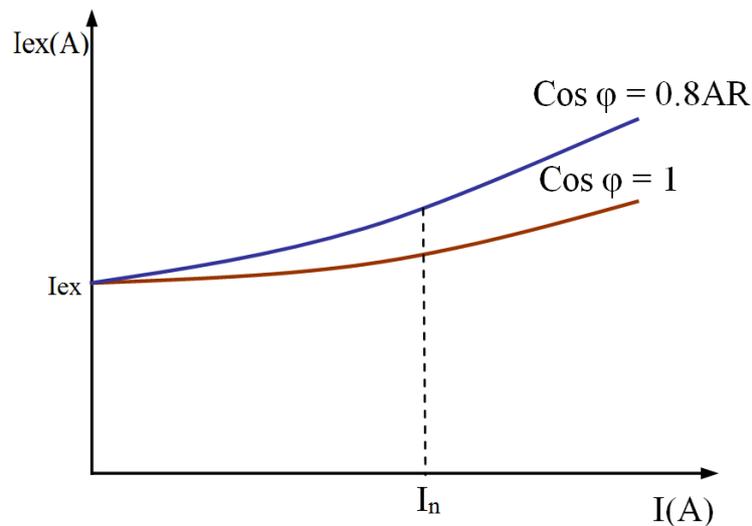


Figure 31: Caractéristiques d'un alternateur en charge



En résumé :

Dans le fonctionnement standard d'un alternateur, il est essentiel de produire une tension stable et uniforme. Face à des variations considérables de la charge, il s'avère indispensable d'implémenter un mécanisme électronique de régulation qui ajuste le courant d'excitation.

Pour prévenir la saturation de l'alternateur, il est crucial de surveiller le courant d'excitation I_{ex} . Une valeur excessive de I_{ex} peut entraîner une saturation de l'appareil, rendant ainsi impossible le contrôle de la tension E par le courant I_{ex} . Dans ce cas, le processus de régulation ne peut plus être maintenu. Il est donc impératif d'éviter toute situation de saturation pour assurer une régulation efficace.

II.11. Bilan des puissances d'un alternateur :

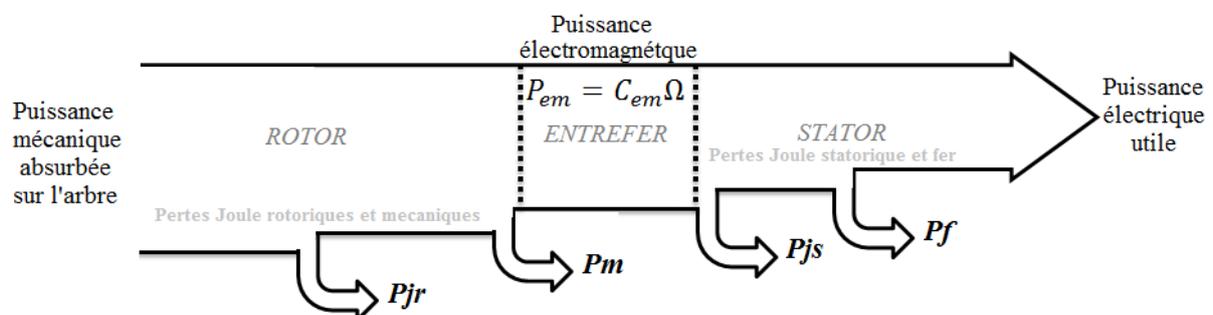


Figure 32: Bilan de puissance de l'alternateur

II.11.1. Puissance absorbée :

Dans le contexte de notre étude, la turbine à vapeur est le moteur principal de l'alternateur, lui fournissant l'énergie mécanique nécessaire pour fonctionner. Cette énergie mécanique est ensuite convertie en puissance électrique par l'alternateur. La relation entre la puissance mécanique fournie et la puissance électrique générée est décrite par l'équation :

$$P_a = C_m \Omega = C_m \frac{2\pi n}{60} \quad (6.1)$$

Où :

- (P_a) est la puissance absorbée par l'alternateur.
- (C_m) est le couple mécanique sur l'arbre de l'alternateur.
- (Ω) est la vitesse angulaire du champ tournant en rad/s.
- (n) est la vitesse de rotation du champ tournant en tr/s.

Cette formule est fondamentale pour comprendre comment la puissance est transférée de la turbine à l'alternateur et comment elle est régulée pour assurer une sortie d'énergie constante et fiable.

Lorsqu'un alternateur fonctionne sans auto excitation, il est nécessaire de prendre en compte la consommation d'énergie électrique due au processus d'excitation du rotor. La puissance totale absorbée par l'alternateur est alors la somme de la puissance mécanique et de la puissance électrique utilisée pour l'excitation :

$$P_a = C_m \Omega + U_{ex} I_{ex} = C_m \frac{2\pi n}{60} + U_{ex} I_{ex} \quad (6.2)$$

Dans cette équation :

- (P_a) est la puissance totale absorbée par l'alternateur,
- (C_m) est le couple mécanique sur l'arbre,
- (Ω) est la vitesse angulaire du champ tournant en rad/s,
- (n) est la vitesse de rotation en tr/s,
- (I_{ex}) est le courant d'excitation,

- (U_{ex}) est la tension d'excitation.

Cette formule est essentielle pour assurer que l'alternateur délivre une tension stable, même en l'absence d'auto excitation, en ajustant le courant et la tension d'excitation en fonction des besoins de la charge.

II.11.2. Puissance utile :

Lorsqu'un alternateur triphasé est en fonctionnement, il génère une puissance électrique utile P_u qui varie selon la charge connectée, et cette variation est influencée par le facteur de puissance $\cos \phi$. Les formules pour calculer cette puissance sont les suivantes :

- Pour la tension composée (ou tension de ligne) :

$$P_u = \sqrt{3}UI\cos\phi \quad (7.1)$$

- Pour la tension simple (ou tension de phase) :

$$P_u = 3VI\cos\phi \quad (7.2)$$

Ces équations sont cruciales pour déterminer la puissance délivrée par l'alternateur en fonction des caractéristiques de la charge électrique à laquelle il est connecté.

II.12. Rendement d'un alternateur :

- 1) Rendements vrais :

$$\eta = \frac{\text{puissance électrique active fournie}}{\text{puissance mécanique absorbée} + \text{puissance nécessaire à l'excitation}} \quad (8.1)$$

- 2) Rendement approché :

$$\eta = \frac{\text{puissance électrique active fournie}}{\text{puissance électrique active} + \text{pertes mesurable}} \quad (8.2)$$

II.13. Mis en équations des machines synchrones :

L'élaboration de formules mathématiques en utilisant la méthode de décomposition sur deux axes est expliquée avec suffisamment de précision. Cela permet, d'une part, de souligner que la validité du modèle mathématique est strictement limitée aux hypothèses simplificatrices prises en compte. D'autre part, cela aide à comprendre clairement la signification physique du changement de variables lié à cette décomposition.

On peut modéliser la machine selon différentes méthodes :

- Les modèles en abc, découlant des équations différentielles à coefficients périodiques régissant le fonctionnement de la machine. Ils sont utilisés essentiellement pour l'étude des régimes permanents.
- Les modèles de la transformation de PARK, utilisés couramment pour l'étude des régimes transitoires et pour la commande vectorielle des moteurs.

II.13.1. Hypothèses simplificatrices :

Le modèle retenu repose sur les hypothèses simplificatrices suivantes :

- On suppose que le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonction linéaire des courants.
- On suppose le circuit magnétique parfaitement feuilleté, ce qui permet de considérer que seuls les enroulements (inducteur, induit amortisseurs) sont parcourus par des courants et en outre on suppose que la densité de courant peut être considérée comme uniforme dans la section des conducteurs élémentaire (absence d'effet pelliculaire).
- L'hypothèse dite « sinusoïdale » demande à être un peu plus détaillée que dans le cas des machines à courant continu, des synchrones sont destinées à fonctionner en courant alternatif, cette hypothèse peut s'exprimer ici de façon simple suivant : on ne considère que le premier harmonique d'espace de la distribution de force magnétomotrice créée par chaque phase de l'induit.
- En fin on admettra que l'ensemble des amortisseurs peut être représenté par deux enroulements fermés en court-circuit sur eux-mêmes, l'un dit « amortisseur d'axe direct

», selon 'O_d' (indice D), l'autre dit « amortisseur d'axe en quadrature » selon 'O_q' (indice Q).

II.13.2. Convention de signe :

Les conventions associées aux équations électriques et magnétiques sont les mêmes que pour la machine à courant continu :

- Un courant positif crée à travers son propre enroulement un flux positif.
- Une f.é.m. positive fait circuler un courant positif.
- L'inducteur est considéré comme récepteur, l'induit comme générateur (convention sans objet pour les amortisseurs, ceux-ci étant en court-circuit).

1) Description de l'alternateur triphasé :

La machine synchrone dotée de pôles lisses et d'un inducteur bobiné est caractérisée par :

- Trois bobines fixes sur le stator**, identifiées par les lettres a, b et c.
- Une bobine inductrice rotative**, marquée par la lettre f.
- Deux bobines d'amortissement rotatives**, désignées par D et Q, qui sont en court-circuit.

L'axe 'O_d' correspond à l'axe du bobinage inducteur, tandis que l'axe 'O_q' se trouve entre deux pôles. Ces deux axes sont perpendiculaires l'un à l'autre. Les bobines d'amortissement D et Q sont également situées sur ces axes. Ils sont fixés au rotor et tournent conjointement avec celui-ci. Les axes O_a, O_b et O_c correspondent respectivement aux trois bobines a, b et c du stator. La figure ci-dessous illustre les bobines fixes et rotatives de la machine synchrone triphasée équipée d'un système d'amortissement.

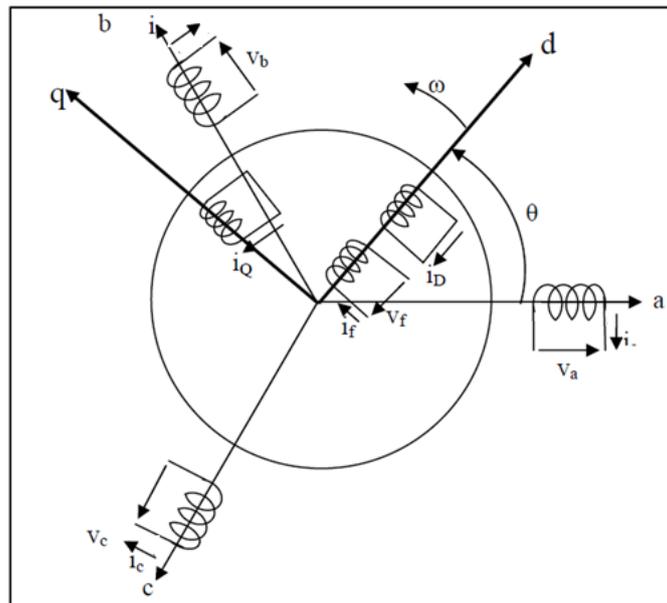


Figure 33: machine synchrone triphasé avec amortisseur

II.14. Modèle en a, b, c d'une machine synchrone à pôles lisse :

Le modèle en a, b, c est directement issu des équations différentielles avec des coefficients qui varient de façon périodique, ce qui dicte le fonctionnement de la machine synchrone. On peut simplifier la conception d'une machine à pôles saillants pour obtenir le modèle d'une machine à pôles lisses.

II.14.1. Equations électriques :

Induit (stator) :

$$\begin{cases} V_a = R_a I_a + \frac{d\phi_a}{dt} \\ V_b = R_b I_b + \frac{d\phi_b}{dt} \\ V_c = R_c I_c + \frac{d\phi_c}{dt} \end{cases} \quad (9.1)$$

Inducteur (rotor) :

$$\begin{cases} V_f = R_f I_f + \frac{d\phi_f}{dt} \\ 0 = R_d I_d + \frac{d\phi_d}{dt} \\ 0 = R_q I_q + \frac{d\phi_q}{dt} \end{cases} \quad (9.2)$$

Telle que :

- R_a, R_b, R_c : Résistance d'une phase du stator.
- R_f, R_d, R_q : Résistance de l'inducteur, de l'amortisseur de l'axe D, de l'amortisseur de l'axe Q.
- ϕ_K (K=a, b, c, f, d, q) : flux 'enroulement traversant l'enroulement.

II.14.2. Equations magnétique :

$$\begin{cases} \phi_s = [L_{ss}]I_s + [M_{sr}]I_r \\ \phi_r = [L_{rr}]I_r + [M_{rs}]I_s \end{cases} \quad (10.1)$$

Dans le cadre de l'hypothèse de non-saturation et de l'assumption que le circuit magnétique est feuilleté, les flux magnétiques sont reliés aux courants par des relations matricielles. Dans ces relations, les coefficients 'L'et 'M'sont des fonctions dépendantes de l'angle θ . Voici une expression généralisée de ces relations :

$$\begin{pmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \\ \phi_f \\ \phi_d \\ \phi_q \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} L_a & M_{ba} & M_{ca} & M_{fa} & M_{da} & M_{qa} \\ M_{ab} & L_b & M_{cb} & M_{fb} & M_{db} & M_{qb} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c & M_{fc} & M_{dc} & M_{qc} \\ M_{af} & M_{bf} & M_{cf} & L_f & M_{df} & M_{qf} \\ M_{ad} & M_{bd} & M_{cd} & M_{fd} & L_d & M_{qd} \\ M_{aq} & M_{bq} & M_{cq} & M_{fq} & M_{dq} & L_q \end{bmatrix} * \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_f \\ I_d \\ I_q \end{pmatrix} \quad (10.2)$$

II.14.3. Définitions des matrices inductance :

Indépendamment de la position du rotor, la perméabilité du circuit magnétique reste invariable. De ce fait, les inductances propres au stator et au rotor demeurent fixes, tout

comme les inductances mutuelles entre les bobinages du stator et du rotor. Les seules grandeurs qui fluctuent sont les inductances mutuelles entre ces bobinages. On suppose que cette variation suit une loi sinusoïdale, dont la périodicité est en rapport direct avec le nombre de paires de pôles. Les matrices d'inductances utilisées sont identiques à celles employées pour une machine à pôles saillants.

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_a & M_{ba} & M_{ca} \\ M_{ab} & L_b & M_{cb} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix} \quad (10.3)$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_f & M_{df} & 0 \\ M_{fd} & L_d & 0 \\ 0 & 0 & L_q \end{bmatrix} \quad (10.4)$$

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{fa} & M_{da} & M_{qa} \\ M_{fb} & M_{db} & M_{qb} \\ M_{fc} & M_{dc} & M_{qc} \end{bmatrix} \quad (10.5)$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T \quad (10.6)$$

Avec :

$$L_a = L_b = L_c = L_{a0}; M_{ab} = M_{bc} = M_{ca} = M_{ab0}$$

- L_a, L_b, L_c sont des inductances propres des phases
- M_{ab} : l'inductance mutuelle entre les phases a et b
- M_{bc} : l'inductance mutuelle entre les phases b et c
- M_{ca} : l'inductance mutuelle entre les phases c et a
- $M_{af} = M_{fa} * \cos \varnothing$: L'inductance mutuelle entre l'inducteur et la phase a.
- $M_{bf} = M_{fa} * \cos(\varnothing - \frac{2\pi}{3})$: L'inductance mutuelle entre l'inducteur et la phase b.
- $M_{cf} = M_{fa} * \cos(\varnothing + \frac{2\pi}{3})$: L'inductance mutuelle entre l'inducteur et la phase c.
- $M_{ad} = M_{ad} * \cos \varnothing$: L'inductance mutuelle entre l'amortisseur d et la phase a.
- $M_{bd} = M_{ad} * \cos(\varnothing - \frac{2\pi}{3})$: L'inductance mutuelle entre l'amortisseur d et la phase b.
- $M_{cd} = M_{ad} * \cos(\varnothing + \frac{2\pi}{3})$: L'inductance mutuelle entre l'amortisseur d et la phase c.
- $M_{aq} = M_{aq} * \cos \varnothing$: L'inductance mutuelle entre l'amortisseur q et la phase a.

- $M_{bd} = M_{aq} * \cos(\varnothing - \frac{2\pi}{3})$: L'inductance mutuelle entre l'amortisseur q et la phase b.
- $M_{cd} = M_{aq} * \cos(\varnothing + \frac{2\pi}{3})$: L'inductance mutuelle entre l'amortisseur q et la phase c.
- L_f : l'inductance propre de l'inducteur.
- L_d : l'inductance propre de l'amortisseur d.
- L_q : l'inductance propre de l'amortisseur q.
- M_{fd} : L'inductance mutuelle entre l'inducteur et l'amortisseur D.
- $M_{fq} = 0$: L'inductance mutuelle entre l'inducteur et l'amortisseur Q.
- $M_{dq} = 0$: L'inductance mutuelle entre les deux amortisseurs.

II.15. Modèle en repère de PARK d'une machine synchrone à pôles lisse :

La transformation de Park est une méthode qui convertit un système triphasé en un système biphasé par une transformation suivie d'une rotation. Cette technique facilite la transition d'un système de coordonnées fixe (abc) à un système de coordonnées tournant (dq0), ce qui simplifie considérablement l'analyse du modèle de la machine en raison de la complexité inhérente à l'étude des systèmes triphasés. Dans ce nouveau système de coordonnées, les bobinages du stator dans le repère abc sont remplacés par deux bobinages en quadrature, notés dq0.

La matrice de passage P est notée comme suit :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (11.1)$$

La matrice inverse P^{-1} sera :

$$P^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (11.2)$$

La transformation de PARK se fait comme suit :

$$[I_{dq0}] = P[I_{abc}] = [I_d \quad I_q \quad I_0]^T \quad (11.3)$$

$$[\Phi_{dq0}] = P[\Phi_{abc}] = [\Phi_d \quad \Phi_q \quad \Phi_0]^T \quad (11.4)$$

$$[v_{dq0}] = P[v_{abc}] = [v_d \quad v_q \quad v_0]^T \quad (11.5)$$

La matrice de passage de Park, lorsqu'elle n'est pas orthogonale, peut être convertie en une matrice orthogonale en normalisant chaque vecteur colonne par sa norme. Cette procédure aboutit à ce qu'on appelle la transformation de Park modifiée. Cette transformation modifiée assure que les puissances instantanées restent invariantes entre les deux systèmes de coordonnées (abc) et (dq₀), garantissant ainsi une équivalence physique.

Voici comment cela peut être exprimé mathématiquement :

$$P_M(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (11.6)$$

Les bobinages du rotor restent inchangés car ils sont intrinsèquement disposés le long de deux axes qui sont perpendiculaires entre eux. Lorsqu'on applique la transformation de Park, elle est valable pour les tensions, les courants et les flux magnétiques, ce qui donne les résultats suivants :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = [P_M] \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (11.7)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = [P_M] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (11.8)$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_d \\ \Phi_q \\ \Phi_0 \end{bmatrix} = [P_M] \begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix} \quad (11.9)$$

On pose :

$$[R] = \begin{bmatrix} -r_a & 0 & 0 \\ 0 & -r_a & 0 \\ 0 & 0 & -r_a \end{bmatrix}; V_{dq0} = \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix}; \Phi_{dq0} = \begin{bmatrix} \Phi_d \\ \Phi_q \\ \Phi_0 \end{bmatrix}; i_{dq0} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (11.10)$$

Tel que : $r_a = r_b = r_c$

Le système d'équations devient :

$$V_{dq0} = [R] * i_{dq0} + \frac{d\Phi_{dq0}}{dt} \quad (12.1)$$

En remplaçant les équations précédentes dans la relation suivant on obtient :

$$V_{dq0} = [P_M] * [R] * [P_M]^{-1} * i_{dq0} + [P_M] * \frac{d[[P_M]^{-1} * \Phi_{dq0}]}{d\phi} \quad (12.2)$$

$$V_{dq0} = [R] * i_{dq0} + \frac{d\Phi_{dq0}}{dt} + W_s * \Phi_{dq0} * [P_M] * \frac{d[[P_M]^{-1}]}{d\phi} \quad (12.3)$$

Avec :

$$\frac{d[[P_M]^{-1}]}{d\phi} = \begin{bmatrix} -\sin \theta & -\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 0 \\ -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 0 \\ -\sin\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) & -\cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) & 0 \end{bmatrix} \quad (12.4)$$

$$[P_M] * \frac{d[[P_M]^{-1}]}{d\phi} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12.5)$$

Après l'intégration de l'équation spécifique dans le contexte approprié, on parvient à formuler la loi d'Ohm généralisée pour le stator. Cette version étendue de la loi d'Ohm prend en compte les caractéristiques propres au stator de la machine synchrone, et peut être exprimée comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_a & 0 & 0 \\ 0 & -r_a & 0 \\ 0 & 0 & -r_a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_d \\ \phi_q \\ \phi_0 \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_d \\ \phi_q \\ \phi_0 \end{bmatrix} \quad (12.6)$$

Soit :

$$\begin{cases} V_d = -r_a I_d + \frac{d\phi_d}{dt} - \omega_r \phi_q \\ V_q = -r_a I_q + \frac{d\phi_q}{dt} + \omega_r \phi_d \\ V_0 = -r_a I_0 + \frac{d\phi_0}{dt} \end{cases} \quad (12.7)$$

Etant donné que l'axe homopolaire nul, on ne prend que les deux premières équations du système. On obtient le nouveau modèle dans le repère de Park :

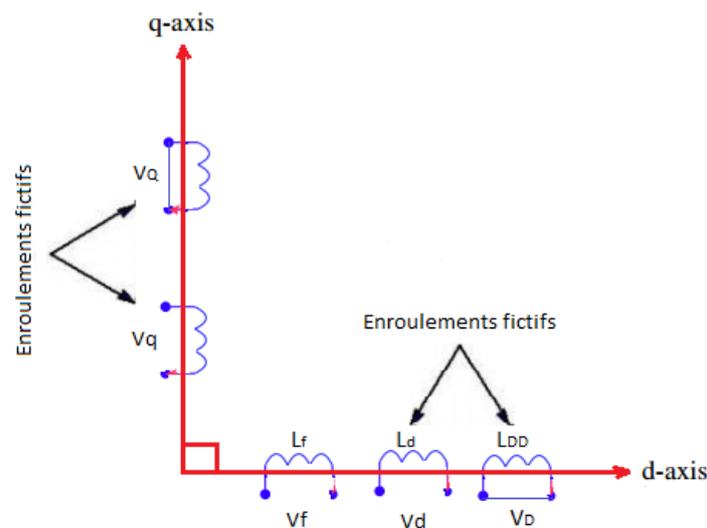


Figure 34:Modèle de la machine synchrone dans le repère (dq₀)

Pour représenter les équations qui régissent le comportement du rotor et du stator dans une machine synchrone, on utilise généralement un ensemble d'équations couplées. Ces équations décrivent les relations entre les tensions, les courants et les flux magnétiques dans les deux parties de la machine. Voici un exemple général de telles équations :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_d = -r_a I_d + \frac{d\phi_d}{dt} - \omega_r \phi_q \\ V_q = -r_a I_q + \frac{d\phi_q}{dt} + \omega_r \phi_d \\ V_0 = -r_a I_0 + \frac{d\phi_0}{dt} \\ 0 = -r_D I_D + \frac{d\phi_D}{dt} \\ 0 = -r_Q I_Q + \frac{d\phi_Q}{dt} \end{array} \right. \quad (12.8)$$

Les variations des flux et la rotation entraînent l'apparition des f.é.m. statiques ($\frac{d\phi_d}{dt}$, $\frac{d\phi_q}{dt}$) dans les expressions de tension V_d et V_q , ainsi que des f.é.m. dynamiques ($\omega_r \phi_q$, $\omega_r \phi_d$) [1]. Le modèle de l'alternateur est maintenant de la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_d \\ \phi_q \\ \phi_f \\ \phi_D \\ \phi_Q \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} -\phi_q \\ \phi_d \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Détermination des expressions des flux en fonction des courants :

Les flux magnétiques totaux qui traversent la bobine équivalente du stator le long de l'axe direct et de l'axe de quadrature (notés ϕ_d et ϕ_q), de même que les flux à travers l'enroulement d'excitation et les enroulements d'amortissement situés sur les axes (d) et (q) (notés (ϕ_f), (ϕ_D) et (ϕ_Q)), peuvent être décrits en utilisant les courants ainsi que les inductances propres et mutuelles des enroulements concernés :

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_d = -L_d I_d + M_{df} I_f + M_{Dd} I_D \\ \phi_q = -L_q I_q + M_{Qq} I_Q \\ \phi_f = L_f I_f - M_{df} I_d + M_{fD} I_D \\ \phi_D = L_D I_D - M_{dD} I_d + M_{Df} I_f \\ \phi_Q = L_Q I_Q - M_{Qq} I_q \end{array} \right. \quad (13.1)$$

Les formules qui décrivent les flux magnétiques en relation avec les courants peuvent être représentées sous une forme matricielle, comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Phi_d \\ \Phi_q \\ \Phi_f \\ \Phi_D \\ \Phi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_d & 0 & M_{df} & M_{dD} & 0 \\ 0 & -L_q & 0 & 0 & M_{qQ} \\ -M_{df} & 0 & L_f & M_{fD} & 0 \\ -M_{dD} & 0 & -M_{Df} & L_D & 0 \\ 0 & -M_{qQ} & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (13.2)$$

En intégrant les flux de la relation précédente dans le système d'équations, on parvient à établir le modèle qui décrit le fonctionnement de l'alternateur en se basant sur les courants. Cette intégration permet de relier directement les grandeurs électromagnétiques aux paramètres électriques du générateur.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -L_d & 0 & M_{df} & M_{dD} & 0 \\ 0 & -L_q & 0 & 0 & M_{qQ} \\ -M_{df} & 0 & L_f & M_{fD} & 0 \\ -M_{dD} & 0 & -M_{Df} & L_D & 0 \\ 0 & -M_{qQ} & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + w_r \begin{bmatrix} 0 & L_q & 0 & 0 & -M_{qQ} \\ -L_d & 0 & M_{df} & M_{dD} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (13.3)$$

Le système peut être écrit sous la forme simplifiée suivante :

$$\mathbf{V} = [\mathbf{R}_a] * \mathbf{I} + [\mathbf{A}] * \frac{d\mathbf{I}}{dt} + [\mathbf{G}] * \mathbf{I} \quad (13.4)$$

Avec :

$$\begin{aligned}
[R_a] &= \begin{bmatrix} -r_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_q \end{bmatrix}; [A] = \begin{bmatrix} -L_d & 0 & M_{df} & M_{dD} & 0 \\ 0 & -L_q & 0 & 0 & M_{qQ} \\ -M_{df} & 0 & L_f & M_{fD} & 0 \\ -M_{dD} & 0 & -M_{Df} & L_D & 0 \\ 0 & -M_{qQ} & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix}; \\
[G] &= w_r \begin{bmatrix} 0 & L_q & 0 & 0 & M_{qQ} \\ -L_d & 0 & M_{df} & M_{dD} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13.5)
\end{aligned}$$

La tension mesurée aux bornes du générateur, notée \mathbf{V}_t est définie par l'équation ci-après. Cette formulation permet d'exprimer la tension en fonction des différents paramètres électriques et magnétiques du générateur.

$$V_t = (V_d^2 + V_q^2)^{\frac{1}{2}} \quad (14.1)$$

Le courant statorique est :

$$I_m = (I_d^2 + I_q^2)^{\frac{1}{2}} \quad (14.2)$$

La puissance sortant du générateur est :

$$P_e = V_d I_d + V_q I_q \quad (14.3)$$

II.16. Blocs Simulink :

Les équations mentionnées ont été utilisées pour établir les schémas Simulink correspondant à l'alternateur en trois cas :

- À vide.
- En charge.

Résultats de la simulation :

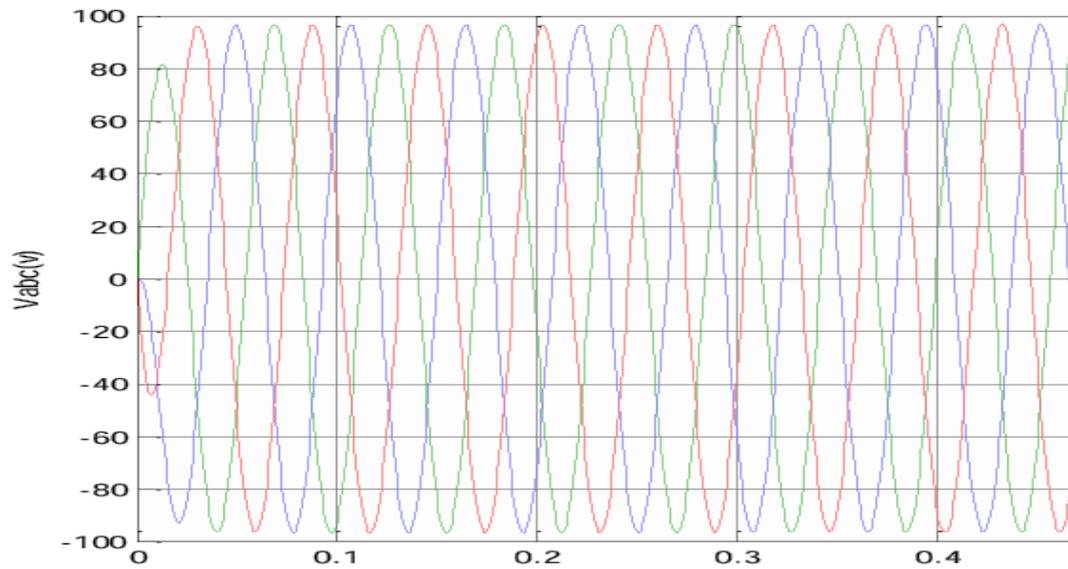


Figure 37 : les tensions des phases V_a , V_b et V_c

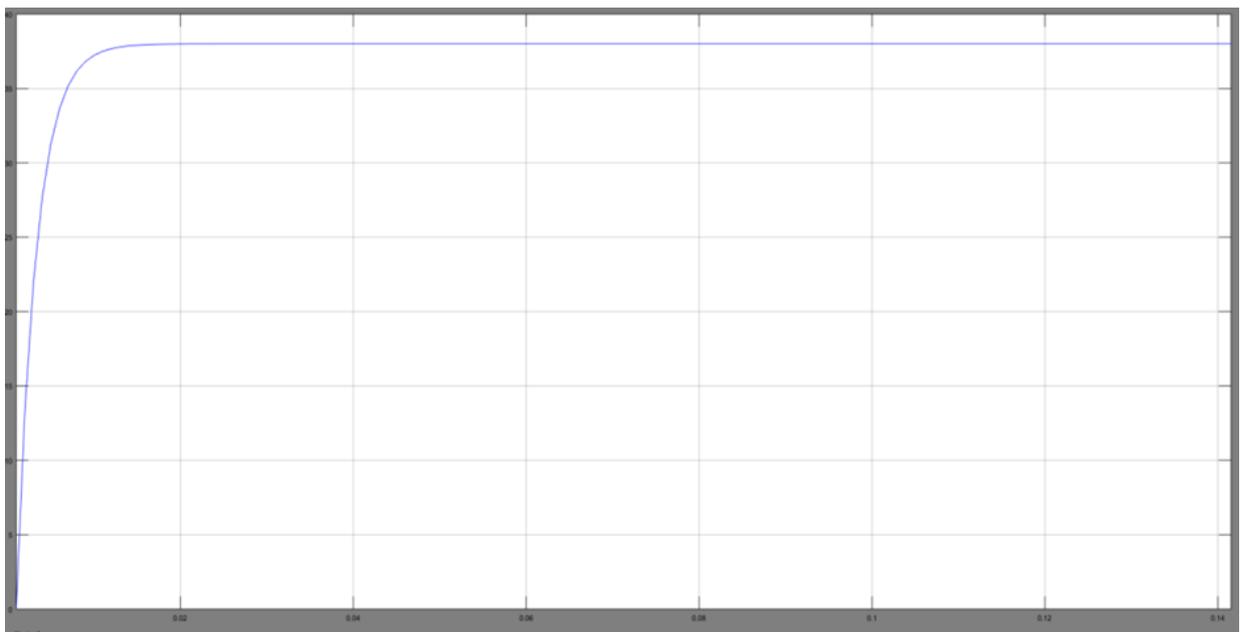


Figure 38 : le courant d'excitation I_f

II.16.2. Schéma Bloc en charge :

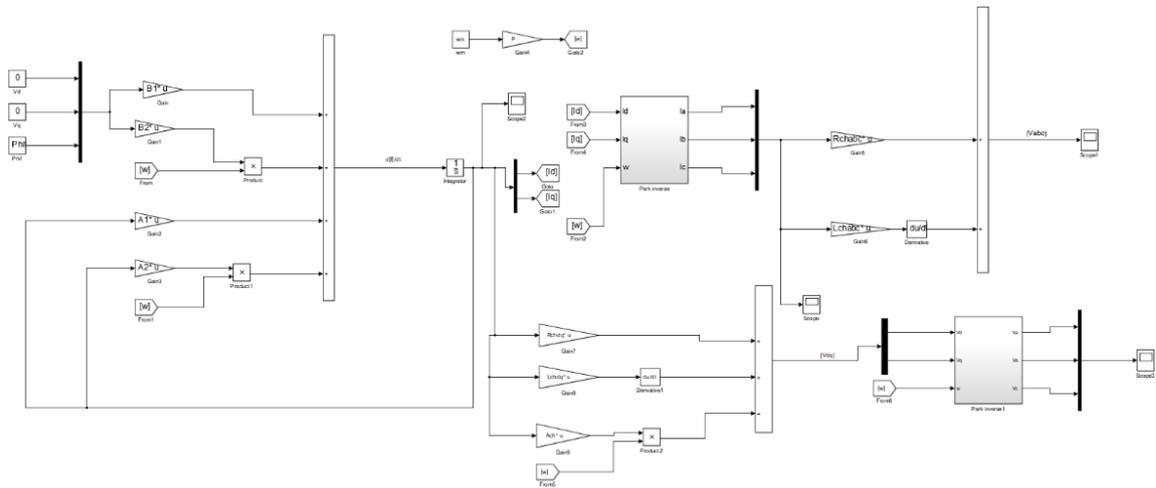


Figure 39 : Modèle Simulink de l'alternateur en charge

La charge utilisée dans cette simulation a les paramètres écrit dans le Script du Matlab suivant :

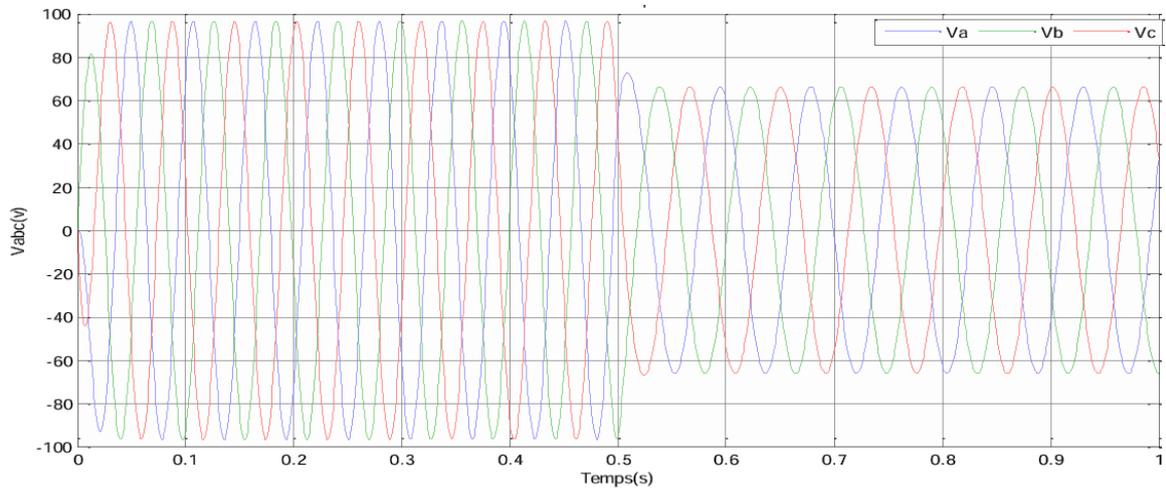
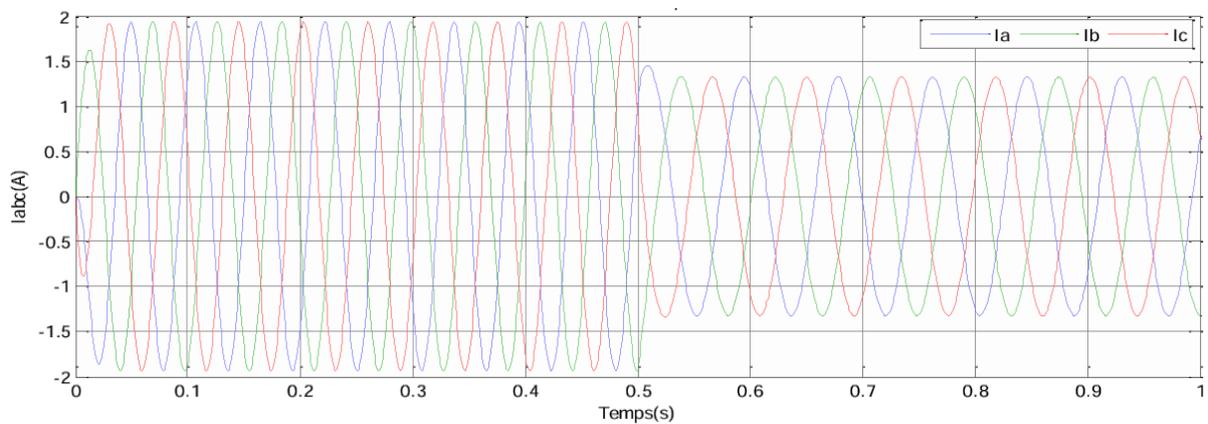
```

Current Folder
├── para_a_vide_part4.slx
├── para_en_charge_cc.m
├── para_en_charge_cc_part5.m
└── para_en_charge_part4.slx

Workspace
Name Value
-----
para_en_charge_part4.slx (Simulink Model)

Editor - C:\Users\HATEM GHOU\\Desktop\mémoire :
para_en_charge_cc_part5.m
- c1c;
- clear;
- Vm=0;
- wm=2*pi*50/4;
- Rch=1;
- Lch=0.0002;
- Rs=0.6+Rch;
- Ld=1.4e-3+Lch;
- Lq=2.8e-3+Lch;
- J=0.02;
- F=0.0014;
- P=4;
- PhiF=0.8;
- A1=[-Rs/Ld 0; 0 -Rs/Lq];
- A2=[0 Lq/Ld; -Ld/Lq 0];
- B1=[-1/Ld 0 0; 0 -1/Lq 0];
- B2=[0 0 0; 0 0 1/Lq];
- Rchabc=[Rch 0 0; 0 Rch 0; 0 0 Rch];
- Lchabc=[Lch 0 0; 0 Lch 0; 0 0 Lch];
- Rchdq=[Rch 0; 0 Rch];
- Lchdq=[Lch 0; 0 Lch];
- Ach=[0 -Lch; Lch 0];
    
```

Figure 40 : paramètres de la charge entraîné par le générateur

Résultats de la simulation :**Figure 41 : Les tensions V_a , V_b et V_c** **Figure 42 : les courants I_a , I_b et I_c** **Interprétation :**

Les valeurs des tensions et des courants pour chaque phase sont illustrées dans la figure 41 et 42. Lorsque l'alternateur n'est pas chargé, il n'y a pas de demande de puissance active de la part de la charge, ce qui signifie que tous les courants sont nuls. Au moment où l'alternateur passe à une charge à $t = 0$ s, une hausse des courants (I_a , I_b et I_c) est observée.

Cette phase transitoire dure approximativement 0,5 s, après laquelle ces courants parviennent à un nouvel état stable.

Pour les tensions, les trois phases sont en état optimale (100 = 18500V) lorsque aucune charge est appliquée. Après une 0.5 seconds. On applique une charge qui causé une baisse de tension jusqu'à (65 = 12000V).

II.17. Conclusion :

Le chapitre explore en détail le fonctionnement des alternateurs dans les centrales de production d'énergie électrique. Il commence par analyser les caractéristiques en vide et en charge des alternateurs, mettant en évidence l'importance de la vitesse de synchronisme et du courant d'excitation pour générer une tension stable. La régulation de tension automatique est également abordée, soulignant son rôle crucial dans le maintien d'une tension constante en fonction de la charge. La puissance utile générée par un alternateur triphasé est expliquée en fonction du facteur de puissance, et le rendement de l'alternateur est discuté en détail.

Les résultats obtenus par simulation ont montré que lorsque la génératrice subit une variation de charge (perturbation), cette variation introduit une perturbation (baisse de tension) au niveau de la tension de la génératrice. Afin de garder la tension et la fréquence du réseau à une valeur constante pour obtenir une bonne qualité d'écoulement d'énergie électrique, il nécessaire d'introduire la notion de commande et de régulation afin de maintenir le niveau d'équilibre. Le chapitre suivant sera consacré à la stabilité.

Chapitre III :

Régulation de la vitesse de rotation et la tension de sortie du générateur par l'AVR

III.1. Introduction :

Dans les systèmes de distribution d'électricité de grande envergure, il est crucial de préserver la **fréquence** et la **tension** à des niveaux standards pour assurer une performance optimale et maintenir l'équilibre entre l'énergie générée et celle utilisée. Le défi majeur avec l'électricité réside dans sa capacité de stockage limitée, nécessitant ainsi la production immédiate de l'énergie requise pour répondre aux fluctuations de la demande et aux éventuelles pannes.

Lorsque la consommation d'énergie s'intensifie, cela entraîne une baisse de tension et réduit la fréquence du réseau en ralentissant la rotation des turbines. Des dispositifs de mesure détectent ces variations de vitesse et activent des régulateurs qui ajustent la quantité de vapeur alimentant les turbines, permettant ainsi de rétablir la vitesse à son niveau nominal. De même, la tension de sortie est ajustée par un dispositif d'excitation pour la stabiliser.

III.2. Système de contrôle :

Les systèmes de régulation comprennent deux composants clés, illustrés dans la **Figure 43**:

- Le premier est un dispositif qui contrôle la tension de sortie de l'alternateur via son système d'excitation. Peu importe les variations de charge, cette tension doit rester proche de 18 500 V.
- Le second est un dispositif qui ajuste la vitesse de rotation pour la garder stable, en modifiant la puissance mécanique fournie. La vitesse opérationnelle de la génératrice est liée à la fréquence du réseau (50Hz) et est établie à 3 000 tours/minute.

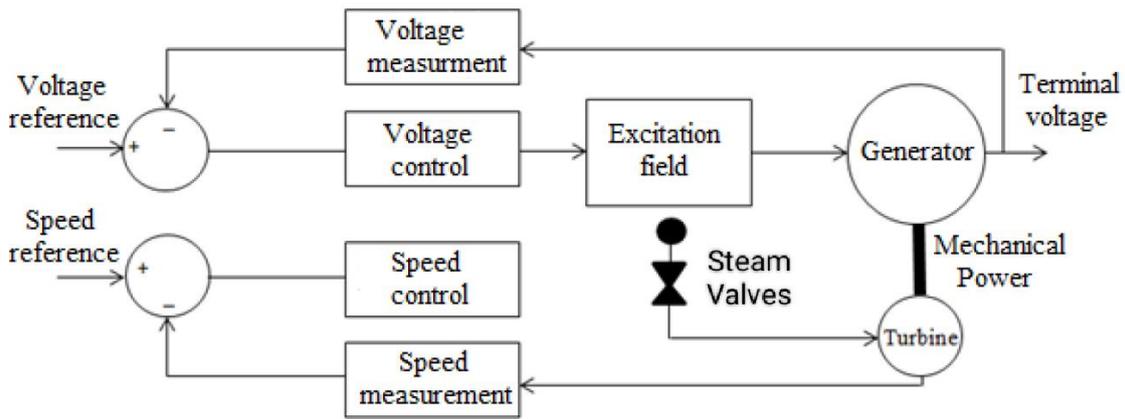


Figure 43 : le circuit de contrôle du système turbine-alternateur

III.3. Les régulateurs PID :

III.3.1. Présentation de la régulateur PID :

Le régulateur PID (Proportionnel Intégral Dérivé) est couramment employé dans le secteur industriel. Ce type de régulateur se distingue par ses trois actions : P, I et D. L'attrait de ce régulateur réside dans la combinaison des bénéfices de ces trois actions fondamentales. L'action P permet d'accroître la rapidité, tandis que l'action I améliore la précision en éliminant l'erreur en régime permanent. Enfin, l'action D autorise des performances de rapidité supérieures. Ainsi, le régulateur PID permet une régulation de haute performance.

L'idée derrière cet élément de contrôle est d'ajuster délibérément l'erreur persistante entre la valeur cible et la valeur mesurée. Il existe trois configurations distinctes de régulateurs PID :

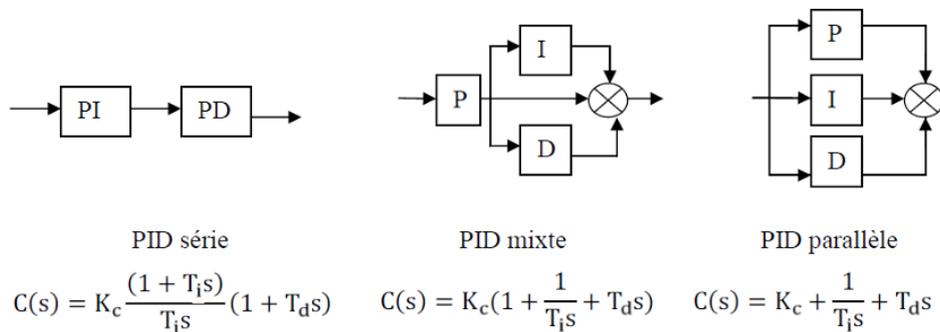


Figure 44 : structures du régulateur PID

III.3.2. Les actions PID :

Dans le domaine des systèmes de contrôle, les régulateurs PID sont fréquemment utilisés. Pour une certaine catégorie de systèmes à contrôler, il est nécessaire de prendre en compte les effets des différentes actions : proportionnelle, intégrale et dérivée.

Un régulateur PID, qui est une combinaison de trois actions, est couramment utilisé pour améliorer les performances des systèmes de contrôle. Il remplit principalement trois fonctions :

- Il génère un signal de commande en prenant en compte la différence entre le signal de sortie et la consigne.
- Grâce au terme intégrateur, il élimine l'erreur statique.
- Grâce au terme dérivatif, il anticipe les variations de la sortie.

Un régulateur PID est la somme de trois termes :

1. Le terme proportionnel :

$$P = K_p * e(t)$$

2. Le terme intégral :

$$I = K_i * \int_0^T e(t) dt$$

3. Le terme dérivé :

$$D = K_d * \frac{de(t)}{dt}$$

Les gains K_p , K_i , K_d étant exprimés en seconds (s)

Le Tableau suivant donne un aperçu des avantages et des limites des actions de base des régulateurs :

Action	Avantages	Inconvénients
P	Action immédiate pour suivre la consigne	Crée une erreur statique
I	Réduit l'erreur statique	Action lente
D	Améliore la rapidité et la stabilité (réduit l'over shoot)	Sensible au bruit

Tableau 1 : les avantages et les inconvénients des actions P, I et D

III.4. Régulation de la tension de sortie de l'alternateur :

Le régulateur automatique de tension (AVR) est essentiel pour maintenir une tension stable et assurer la qualité de l'énergie fournie. L'AVR joue un rôle crucial dans la protection des équipements électriques contre les fluctuations de tension, en maintenant la tension de sortie à un niveau constant.

Le fonctionnement de l'AVR repose sur un ensemble de capteurs électroniques qui ajustent en permanence les paramètres de l'allumage et l'injection du vapeur pour maintenir le régime de croisière de la turbine. Cela permet de limiter les fluctuations de tension à la sortie du générateur et de garantir une alimentation électrique stable et fiable pour les équipements connectés.

En résumé, l'AVR est un dispositif qui transforme les niveaux de tension d'entrée fluctuants d'une source d'alimentation en une sortie constante pour la charge connectée, ce qui est crucial pour la durée de vie des appareils et la stabilité du système de puissance.

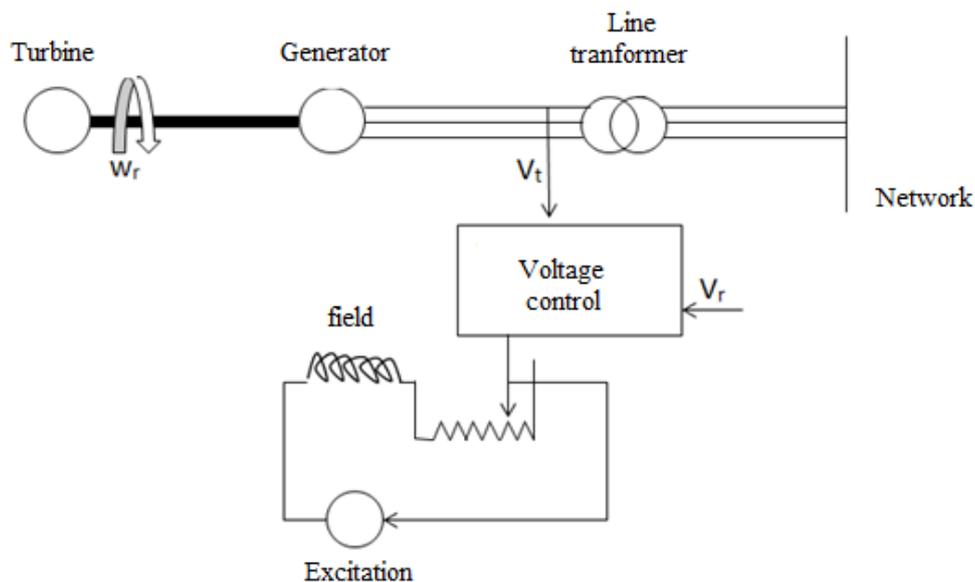


Figure 45 : représentation du groupe de régulation

Le modèle schématique suivant semble être un système de régulation de tension classique. Voici une explication de chaque composant :

- **Capteur de tension :**

Il détecte la tension actuelle du système et la convertit en un signal électrique qui peut être utilisé par le reste du circuit de contrôle.

- **Comparateur (Sommateur) :**

Il compare la tension détectée par le capteur avec une valeur de référence et génère un signal d'erreur qui représente la différence entre la tension mesurée et la tension désirée.

- **Amplificateur :**

Il amplifie le signal d'erreur pour qu'il puisse être utilisé efficacement par le régulateur PID.

- **Régulateur PID (Proportionnel-Intégral-Dérivatif) :**

Le régulateur PID ajuste le signal de commande en fonction du signal d'erreur. L'objectif est de minimiser l'erreur et de stabiliser rapidement la tension à la valeur souhaitée.

- **Système de limitation de tension :**

Il empêche le signal de commande de dépasser certaines limites, protégeant ainsi le système contre les surtensions ou les sous-tensions dangereuses.

Ensemble, ces composants forment une boucle de régulation qui maintient la tension à un niveau stable, ce qui est essentiel pour la fiabilité et l'efficacité des systèmes électriques.

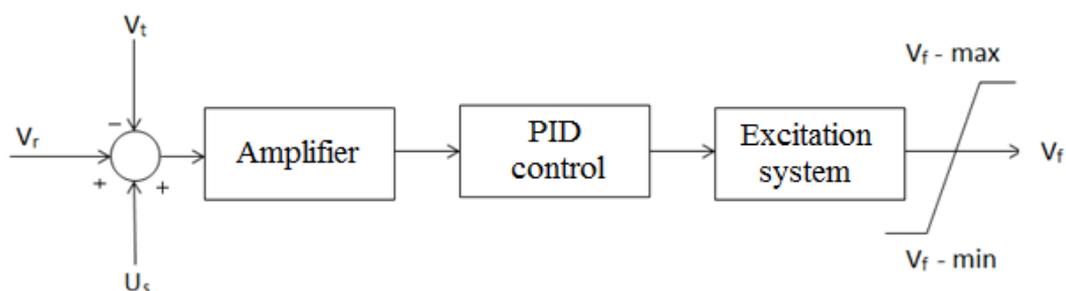


Figure 46 : Modèle schématique d'un régulateur AVR

Où :

"La grandeur V_r représente la tension de consigne utilisée comme référence pour satisfaire les conditions d'équilibre. Le régulateur de tension compare la tension de sortie de l'alternateur V_t avec la tension de consigne V_r . L'erreur résultante est amplifiée pour générer la tension d'excitation V_f nécessaire au maintien de l'équilibre souhaité. Cette tension d'excitation est limitée entre deux valeurs grâce à un système de limitation ($V_{f \min}$, $V_{f \max}$).

En outre, un signal complémentaire (U_s) peut être ajouté au nœud de sommation. Ce signal, appelé stabilisateur de puissance (PSS), introduit une tension proportionnelle à la vitesse de rotation à l'entrée du régulateur de tension (AVR) du générateur. Le PSS génère un couple en phase avec la variation de la vitesse rotative, corrige la décroissance du couple d'amortissement et atténue les faibles oscillations en ajustant rapidement le système d'excitation au bon moment.

Dans le domaine de la modélisation des éléments d'un système de puissance, des études ont été menées sur trois types de systèmes d'excitation fréquemment utilisés :

- **Le système d'excitation statique à source de potentiel :** (Potential-Source Static Excitation System) : Il présente un temps de réponse très court pour la tension d'excitation.
- **Le système d'excitation statique à excitation par diode-redresseur :** Il existe en deux formes, le Nominal Response Excitation System (NRES) et le High Initial Response (HIR). Le temps de réponse de la tension d'excitation pour le NRES est compris entre 0,2 et 0,5 seconde, ce qui est plus lent que celui du HIR.
- **Le système d'excitation sans balais :** (Brushless Excitation System) : Son comportement est similaire à celui du deuxième modèle. Des modèles mathématiques sont disponibles pour ces trois types de systèmes d'excitation : le type IEEE ST1 pour le premier modèle, le type IEEE AC1 pour le système sans balais et le type IEEE AC2 pour le modèle HIR. » [18][19]

IEEE, qui signifie Institute of Electrical and Electronics Engineers, est une organisation professionnelle qui développe et propose des normes dans divers domaines techniques. Par exemple, IEEE ST1 fait référence à un modèle de système d'excitation spécifique défini par l'IEEE. Le modèle ST1 est une adaptation du système d'excitation ST1A de la norme IEEE 421

Des modèles mathématiques sont disponibles pour ces trois types de systèmes d'excitation : le type IEEE ST1 pour le premier modèle, le type IEEE AC1 pour le système sans balais et le type IEEE AC2 pour le modèle HIR. » [18][19]

Pour notre étude, nous avons opté pour le modèle IEEE ST1, qui est largement documenté dans la littérature. Ce modèle se distingue par sa réactivité et sa sensibilité. En effet, sa rapidité de réponse lui permet d'ajuster rapidement la tension d'excitation en cas de perturbations, tandis que sa sensibilité lui permet de détecter de petites variations.

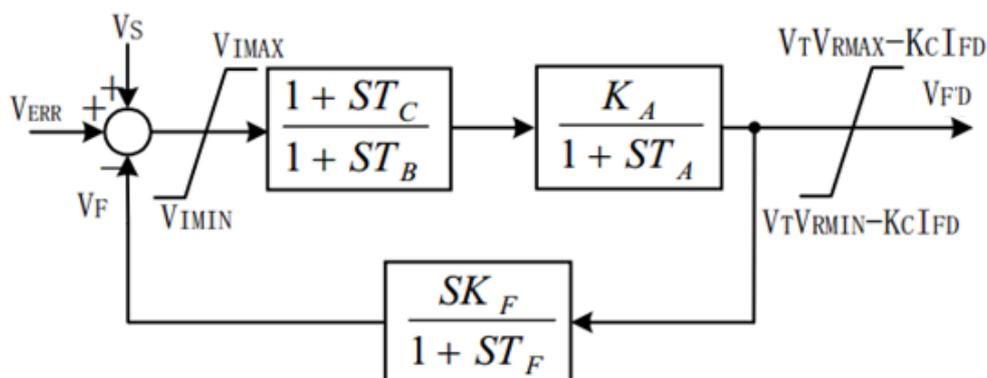


Figure 47 : modèle du système d'excitation IEEE-type ST1

Pour contrôler la tension d'excitation V_{FD} , nous utilisons un modèle simplifié qui néglige les constantes de temps (T_C , T_B , T_F). Ce modèle est représenté par l'équation suivante :

$$V_f = K_p \cdot (V_r - V_t)$$

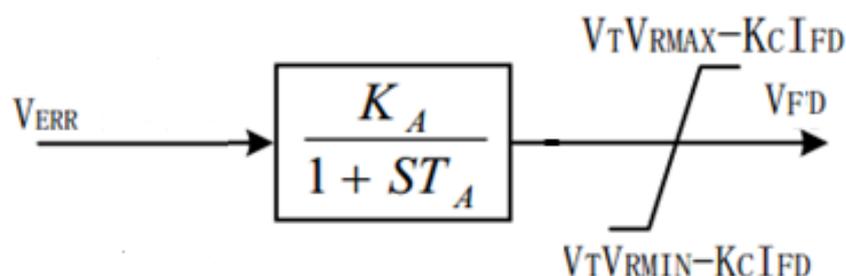


Figure 48 : modèle simplifié du système d'excitation IEEE-type ST1

En remplaçant le modèle simplifié du système d'excitation par le modèle d'un régulateur automatique de tension, nous obtenons le modèle suivant :

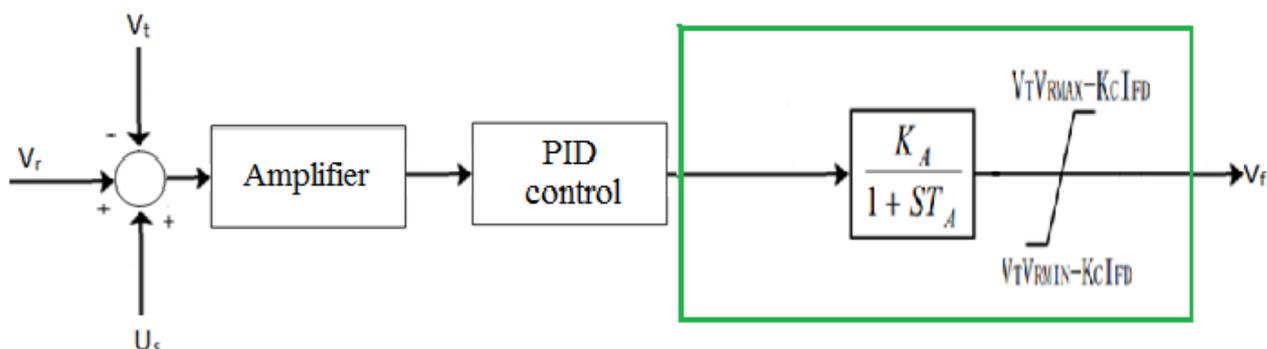


Figure 49 : Modèle schématique d'un régulateur AVR

III.5. Régulation de la vitesse de rotation de l'alternateur :

La régulation de la vitesse de rotation d'un ensemble turbo-alternateur est essentielle pour garantir la stabilité de la fréquence du réseau à 50 Hz et protéger l'alternateur contre le décrochage. Pour ce faire, on utilise un contrôleur PID dont la principale tâche est de maintenir la vitesse de rotation autour de 3000 tr/min. La boucle de régulation comprend un régulateur PID, un servomoteur et une turbine. La figure ci-dessous illustre le principe de régulation de la vitesse :[17]

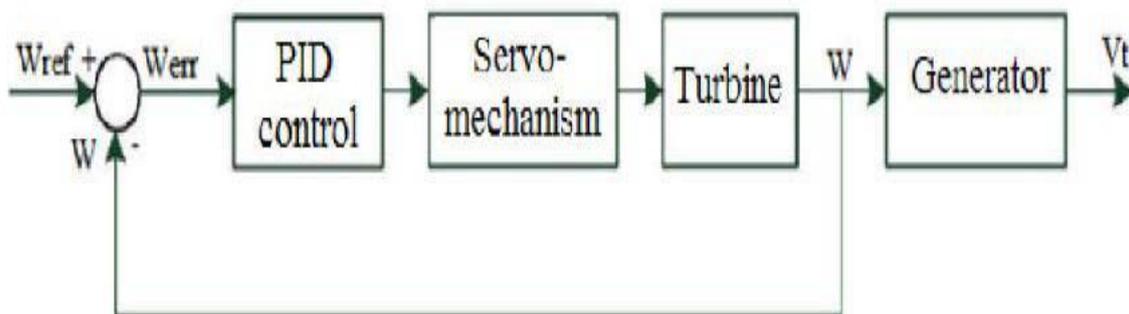


Figure 50 : Principe de contrôle de la vitesse

Le contrôleur PID surveille la vitesse de rotation et ajuste la position de la vanne de la turbine pour maintenir la vitesse autour de sa valeur nominale. Son rôle essentiel est d'optimiser le fonctionnement de la turbine.

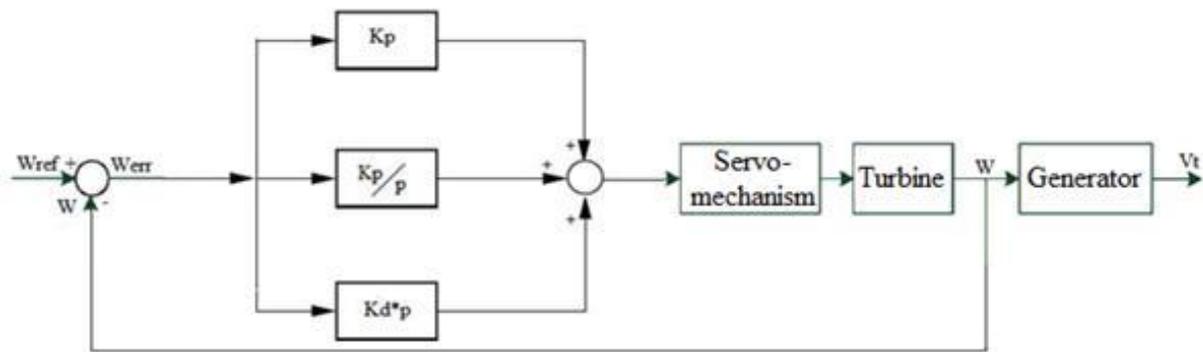


Figure 51 : Contrôleur PID et servomoteur

III.6. Détermination des paramètres du contrôleur :

Le **contrôleur PID** surveille la vitesse de rotation et ajuste la position de la vanne de la turbine pour maintenir la vitesse autour de sa valeur nominale. Son rôle essentiel est d'optimiser le fonctionnement de la turbine.

$$F(P) = \frac{Y(P)}{\varepsilon(P)} = K_p + \frac{K_i}{p} + K_d p = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p \right)$$

Où :

- **K_p** : Les influences augmentent le temps. La diminution du temps de montée entraîne un dépassement plus important avec une erreur statique améliorée.
- **T_i** : Définit la vitesse à laquelle l'erreur est intégrée. Plus le T_i est petit, plus le signal de correction augmente rapidement.
- **T_d** : Il définit le temps d'application pour chaque "saut" du signal d'erreur.
- $T_i = \frac{K_p}{K_i}$; $T_d = \frac{K_p}{K_d}$

Détermination des paramètres au moyen de la méthode d'approche successive :

Pour optimiser la réponse du contrôleur, nous devons ajuster ses actions et observer les effets sur la mesure enregistrée jusqu'à obtenir la réponse souhaitée.

Procédure :

Pour régler le contrôleur PID, nous commençons par des valeurs très faibles et annulons les actions dérivée (D) et intégrale (I). Ensuite, nous appliquons une étape de consigne. Si le gain est suffisamment faible, la réponse est bien amortie. Nous augmentons ensuite le gain et appliquons un autre pas de consigne, répétant ce processus jusqu'à ce que des dépassements apparaissent sur la sortie. Nous réglons alors le contrôleur à la moitié de la valeur obtenue lorsque le dépassement se produit.[18][19]

Nous appliquons la même procédure pour le temps d'intégration (T_i) et revenons à un tiers de la valeur d'origine des dépassements. Après avoir utilisé la méthode d'approche successive, nous obtenons les paramètres optimaux suivants :

1. Pour réguler la tension de sortie résultante :

- **Gain proportionnel (K_p) : 200**
- **Temps d'intégration (T_i) : 0.014 s**
- **Temps de dérivation (T_d) : 0.025 s**

2. Pour réguler la vitesse de l'ensemble turbine-générateur :

- **Gain proportionnel (K_p) : 20**
- **Temps d'intégration (T_i) : 0.01 s**
- **Temps de dérivation (T_d) : 0.013 s**

Les Schéma bloc et résultats de simulation :

Pour simuler le comportement de l'alternateur, nous associons le schéma fonctionnel de la commande de tension et celui de la commande de vitesse. Voici les étapes à suivre : [20]

1. **Modélisation dynamique** : Utilisez un logiciel de simulation tel que MATLAB/Simulink pour créer un modèle de l'alternateur. Assurez-vous d'inclure les éléments tels que les tensions de sortie (V_a , V_b , V_c), les courants (I_a , I_b , I_c) et la vitesse (ω_r).
2. **Commande de tension** : Mettez en place un régulateur de tension (AVR) pour maintenir la tension de sortie à la valeur souhaitée. Le schéma fonctionnel de la commande de tension vous guidera dans cette étape.

3. **Commande de vitesse** : Utilisez un régulateur PID (Proportionnel-Intégral-Dérivé) pour contrôler la vitesse de l'alternateur. Le schéma fonctionnel de la commande de vitesse vous aidera à assembler les composants nécessaires.
4. **Simulation** : Lancez la simulation et observez les réponses de l'alternateur en termes de tensions, courants et vitesse. Vous pouvez ajuster les paramètres du régulateur pour obtenir des performances satisfaisantes et la stabilité.

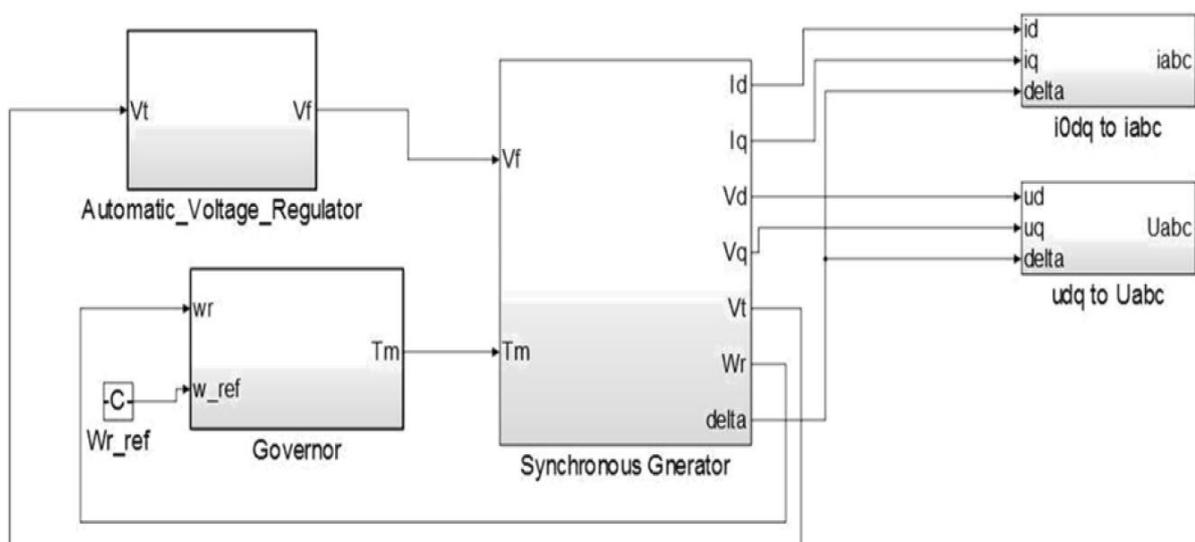


Figure 52 : Structure combinée du générateur et blocs de contrôle dans Simulink

La régulation de la tension de sortie est représentée comme suite :

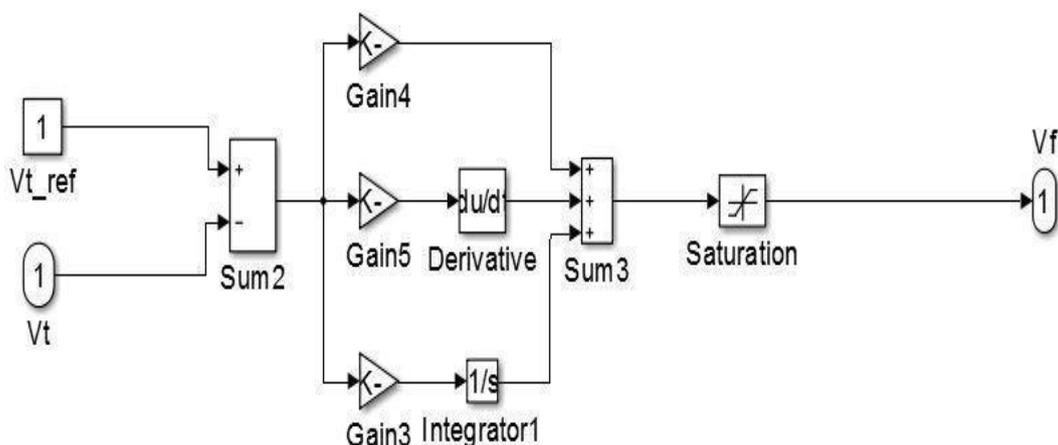


Figure 53 : Structure du régulateur de tension de sortie dans Simulink

Le contrôle de vitesse est schématisé dans Matlab/Simulink comme le suivant :

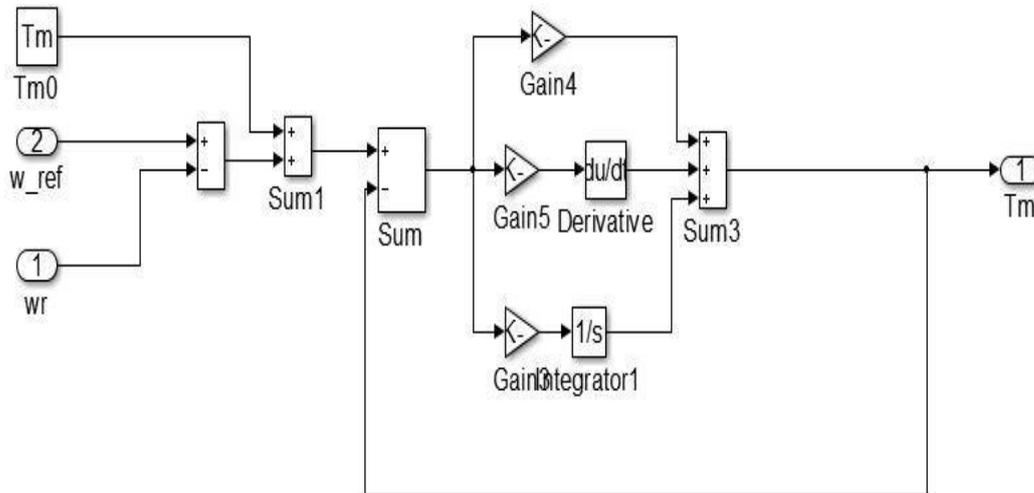


Figure 54 : Structure du régulateur de vitesse (ω_r) dans Simulink

III.6.1. La tension de sortie :

Résultats de la simulation :

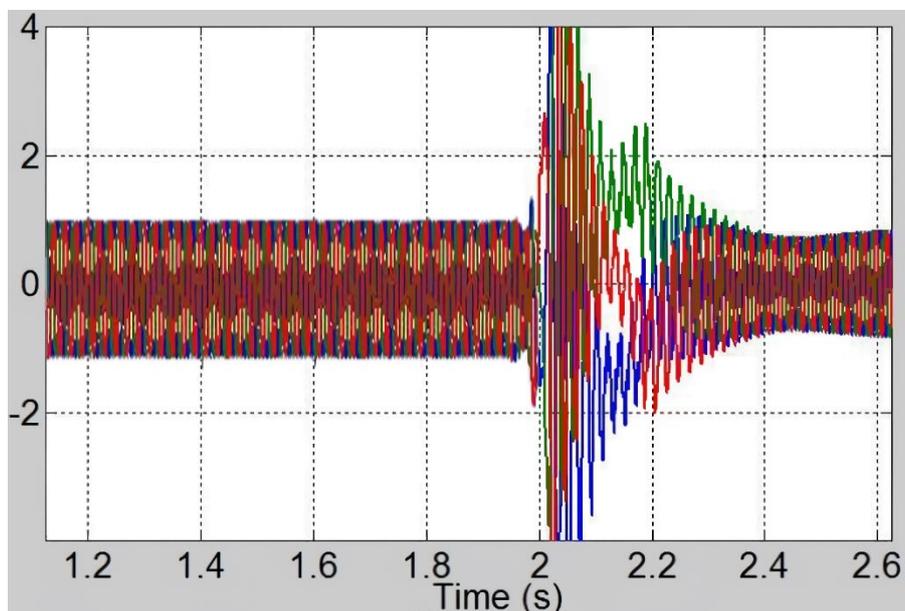


Figure 55 : les tensions de sortie V_a , V_b et V_c

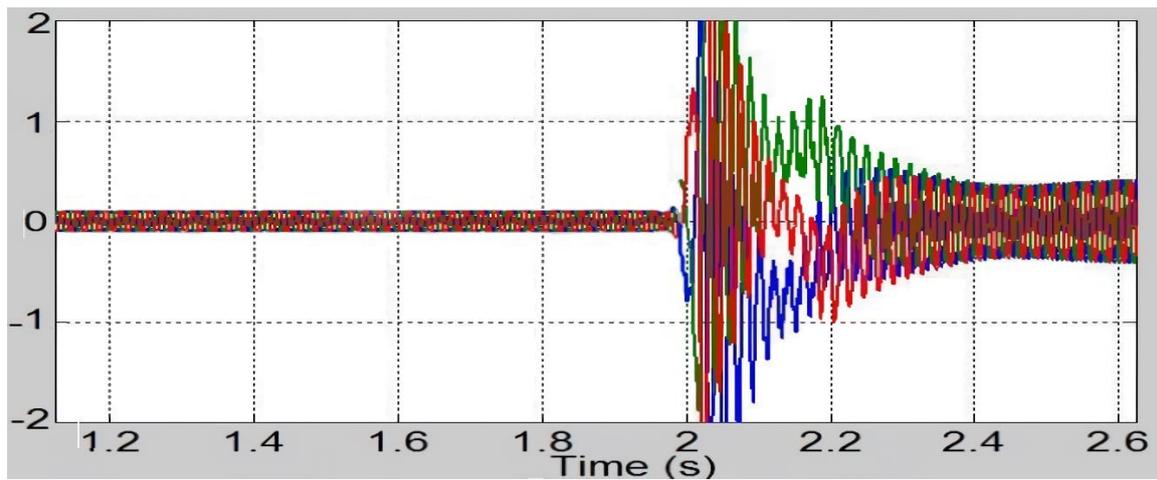


Figure 56 : les courants phases I_a , I_b et I_c zoomé

Interprétation :

Lorsque l'alternateur est en charge, les tensions des trois phases évoluent selon un schéma particulier, mais n'atteignent pas la tension souhaitée.

À partir du temps deux seconds (2s), l'AVR commence à agir sur les tensions à la valeur de la tension de référence. On observe que la valeur de la tension a atteint la tension de référence.

Le courant dans le régime à vide est nul contrairement au régime en charge. Il va augmenter à une valeur précise après l'influence de l'AVR à partir du temps (2s)

III.6.2. La Vitesse de rotation (ω_r) :

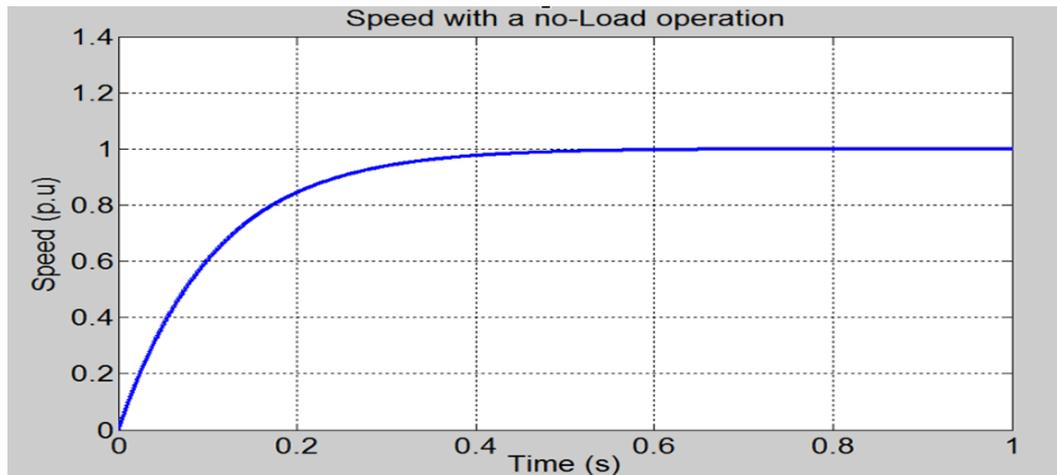


Figure 57 : la vitesse de rotation à vide (sans charge)

Lorsqu'une charge est ajoutée, cela perturbe la vitesse de l'alternateur. Le contrôleur PID agit sur le couple d'entraînement pour le ramener à sa valeur initiale. Cette valeur est atteinte suite à la perturbation causée par le système de contrôle de vitesse pendant la même durée.[21]

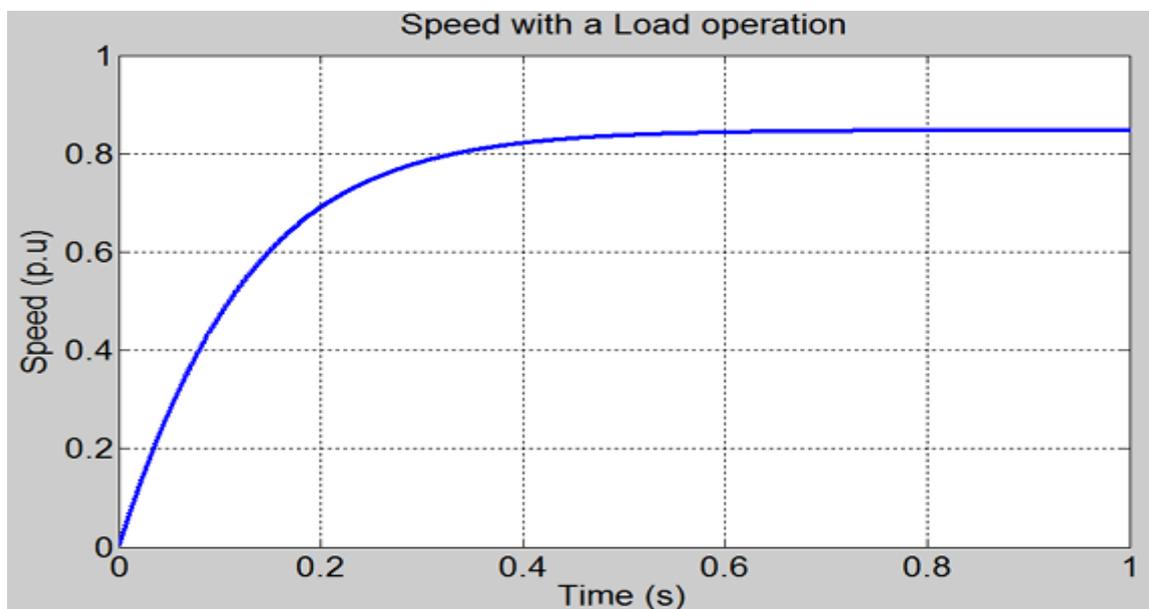


Figure 58 : la vitesse de rotation avec charge et sans AVR

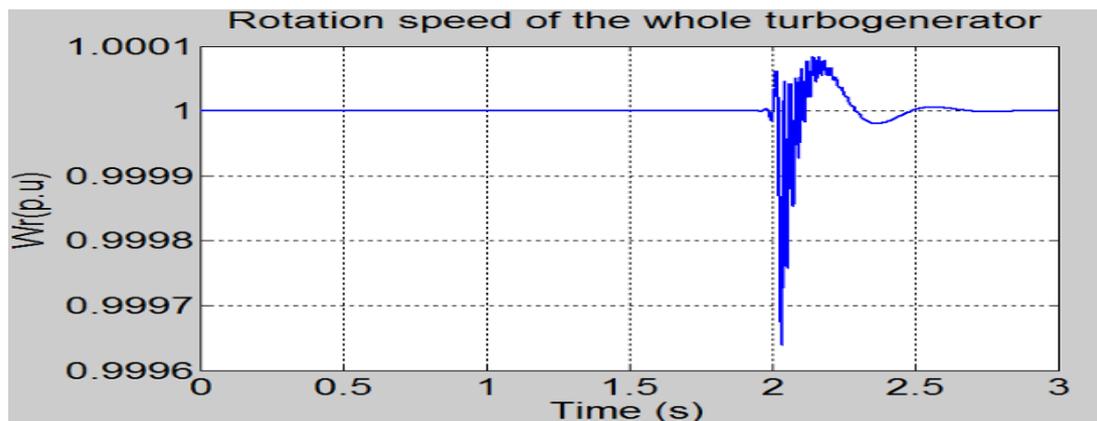


Figure 59 : la vitesse de rotation avec charge et avec l'AVR

Interprétation :

On observe que la vitesse de rotation à vide (sans charge) est égale à 1p.u (3000 tr/min), après l'application du charge la vitesse diminue à 0.8pu (2400 tr/min).

Après l'installation du AVR, dans le temp 2 seconds, les coefficients du AVR commencent à influencer sur la vitesse de rotation et causé l'augmentation de la vitesse à nouveau à 1pu (3000 tr/min).

III.7. Conclusion :

Les résultats essentiels sont issus du fonctionnement attendu du modèle global. Ce modèle a été utilisé pour améliorer la tension de sortie et la vitesse de rotation des générateurs synchrones. Les graphiques et les courbes, représentant les courants des trois phases et la tension d'une phase montrent des similitudes.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons étudié **Modélisation et simulation d'un turboalternateur commandé par un régulateur automatique de tension.**

La modélisation du turboalternateur sert à simuler l'appareil physique onéreux. Dans notre étude, le modèle développé représente un système triphasé. Pour le simplifier, la transformation de Park a été appliquée pour le réduire à un système biphasé. Ce modèle a été vérifié par des simulations à vide et en charge à l'aide du logiciel Matlab Simulink.

De plus, un autre modèle basé sur le système d'excitation IEEE ST1 a été développé avec tous ses composants. Pour la régulation de tension, un régulateur automatique appelé AVR a été utilisé. Un système de contrôle PID pour réguler la vitesse de l'alternateur a également été mis en œuvre selon la **Figure 54**. Les courbes montrent des similitudes, validant ainsi le modèle.

Il est important de noter que cette étude se concentre particulièrement sur les alternateurs haute puissance. Nous avons développé une synthèse pour les régulateurs afin de contrôler la tension de sortie et la vitesse de l'ensemble turbine-générateur. Nos résultats, basés sur des valeurs nominales, sont satisfaisants.

Bibliographie

- (1) - ANCEL (J.) - Bobinages des machines tournantes. Schémas. - dans Génie électrique, Archives (1974).
- (2) - DE FURSAC (P.) - Bobinages des machines tournantes. Technologies. - dans Génie électrique, Archives (1978).
- (3) - BARRET (P.) - Machines synchrones. Fonctionnement en régime permanent. Dans Génie électrique, Archives (1978).
- (4) - BARRET (P.) - Machines synchrones. Excitation. - dans Génie électrique, Archives (1973).
- (5) - HEUILLARD (J.-F.) - Machines synchrones. Dimensionnement électromagnétique. - [D 495] dans Génie électrique, Archives (1982).
- (6) - HEUILLARD (J.-F.) - Refroidissement des machines tournantes, Calcul des températures des stators et des enroulements des rotors.
- (7) - ALAIN SCHRAMBACH, « Moteurs autres que les roues hydrauliques », Moulins de France, numéro spécial « Les Moulins no 23 », avril 2010, Éd. FFAM.
- (8) - DAVID JACKSON cycle thermodynamique d'une machine à vapeur ; production et utilisation des RX pour l'étude d'un cristal. D'après bts chimie 2005.
- (10) - JACKSON JOHN, Électrodynamique classique, Paris, Dunod, coll. « Sciences Sup »,
- (11) - J.L. DALMASSO, Machines tournantes à courant alternatif, Edition BELIN avril 1985.
- (14) - MOUFOK HOUARI TAKI Et BOUCHEKARA KHALED « contrôle et stabilisation d'un groupe turbo-alternateur par la commande LQG » mémoire d'ingénieur, université d'Oran, Algérie, 1997.
- (15) - RACHID ABDESSEMED « Modélisation et simulation des machines électriques » Livre en électrotechnique, Edition Ellipses, Paris, France 2011.

- (16) - S. BANETTA, F. PAGANUCCI, R. GIGLIOLI, A. POSSENTI « Modeling and Simulation of a Micro-Turbine Generation Set » EVS 18 Berlin, 2001.
- (17) - RAKOTOVAO B ET VOAHANGINIRINA J. RAMASIARINORO : 2014 - Production automatisée de ciment en utilisant la technologie des poudres. Mada-Hary2410-0315, volume 2 (5), pp. 33 – 53
- (18) -IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, DOI: 10.1109/TPAS.1973.293570 1973, Vol.PAS-92, N°6, Pages: 1904 – 1915.
- (19) - IEEE committee report,' Dynamic models for steam and hydro turbines in power system studies.
- (20) - M. A. M. Hassan, O.P. Malik, G. S. Hope, 'A fuzzy logic-based stabilizer for a synchronous machine', IEEE Transactions on Energy Conversion. Vol. 6, No 3, September 1991.
- (21) - JUSTE TSOTIE WAMBA, 'Modélisation et implémentation numérique du simulateur analogique de la centrale Hydro-Québec', PhD Thésis, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, déc.2013.