

Rapport projet PFA :

Régulation de tension d'un alternateur de puissance

Réalisé par :

BARTAY Hafsa

OUEDRAOGO Hamade

OUMERHOUCHE Omar

TCHAKALA Haliz

TABLE DE MATIÈRE

Table de matière.....	2
Liste des figures :	4
Introduction générale :	6
CHAPITRE I : Principes de fonctionnement de l’alternateur	7
1. Construction et caractéristiques des alternateurs :	7
1.1. Les constitutions de l’alternateur :	7
1.2. Les caractéristiques de l’alternateur :	10
1.3. Les types de l’alternateur :	13
2. Principe de fonctionnement de l’alternateur :	14
2.1. Production de la f.é.m. :	14
2.2. Fonctionnement de l’alternateur à vide :	17
2.3. Fonctionnement en charge de l’alternateur :	18
2.4. Couplage de l’alternateur au réseau :	19
3. Excitation des alternateurs :	20
3.1. Système d’excitation courant continu (DC) :	20
3.2. Système d’excitation à courant alternatif (AC) :	21
3.3. Système d’excitation statique :	22
4. Les centrales électriques :	24
4.1. Principe de fonctionnement des centrales électriques :	24
4.2. Centrale nucléaire :	24
4.3. Centrale thermique à flamme :	25
4.4. Centrale hydraulique :	26
4.5. Centrale éolienne :	27
CHAPITRE II : Modélisation de l’alternateur	29
1. Principe de la production des f.é.m. triphasées équilibrées :	29
1.1. Schéma équivalent de l’alternateur :	30

1.2.	Diagramme de tensions et nouvelle expression de la f.é.m. au niveau d'une phase : 30	
1.3.	Diagramme de fonctionnement en charge de l'alternateur :	31
2.	Bilan de puissances de la machine synchrone	32
Chapitre III. Régulation de tension d'un alternateur		35
1.	Le Régulateur PID :	35
1.1.	Loi de commande du régulateur PID :	35
1.2.	Fonction de transfert du régulateur PID :	36
1.3.	Les actions PID :	36
2.	Régulation de tension d'un alternateur :	37
2.1.	Pourquoi règle-t-on la tension à certaines valeurs de référence ?	38
2.2.	Les causes des variations de tension :	38
2.3.	Les moyens de réglages des tensions :	39
2.4.	Génération de la consigne de la valeur de la tension :	39
2.5.	Mesure des grandeurs rapportées au régulateur :	40
3.	Régulateur automatique de tension (AVR) :	40
3.1.	Amplificateur :	40
3.2.	Excitatrice :	41
3.3.	Générateur :	41
3.4.	Capteur :	41
4.	Etude de la stabilité du système :	42
5.	Réponse indicielle du système sans régulation :	43
6.	Régulation de tension à vide :	44
7.	Régulation de tension en charge :	47
Conclusion générale :		52

LISTE DES FIGURES :

<u>Figure :</u>	<u>Page</u>
Fig1. L'induit et l'inducteur d'un alternateur	P :7
Fig2. Rotor et stator d'un alternateur	P :8
Fig3. Le raccordement d'un alternateur triphasé tournant à vide	P :11
Fig4. Les caractéristiques en charge d'un alternateur	P :12
Fig5. Fonctionnement de l'alternateur à vide	P :17
Fig6. Variation de la f.é.m	P :18
Fig7. Système d'excitation de type DC	P :20
Fig8. Excitation de type AC avec redresseur non commandé	P :21
Fig9. Excitation de type AC avec redresseur commandé	P :21
Fig10. L'excitation AC de type Brushless	P :22
Fig11. Excitatrice statique par redresseur commandé à source de tension	P :23
Fig12. Centrale nucléaire	P :25
Fig13. Centrale thermique à flemme	P :26
Fig14. Centrale hydraulique	P :27
Fig15. Centrale éolienne	P :28
Fig16. Les enroulement du stator	P :30
Fig17. Schéma monophasé équivalent	P :30
Fig18. Schéma synoptique d'un régulateur PID	P :36
Fig19. Schéma Bloc du système d'excitation	P :39
Fig20. Schéma Bloc du système d'excitation	P :41

Fig21. Schéma Bloc de régulation de tension	P :42
Fig22. Schéma indicielle du système sans régulation	P :43
Fig23. Schéma des paramètres du correcteur.	P :44
Fig24. Schéma de Réponse indicielle du système avec changement de K_p, K_i et K_d.	P :46
Fig25. Bloc Simulink.	P :47
Fig26. Schéma des réponses indicielles suivant les valeurs de T_g.	P :48
Fig27. Schéma des signaux d'erreur suivants les valeurs de T_g.	P :48
Fig28. Schéma des réponses indicielles suivant les valeurs de T_g (Cas2).	P :49
Fig29. Schéma des signaux d'erreur suivants les valeurs de T_g (Cas2).	P :49
Fig30. Schéma des réponses indicielles suivant les valeurs de T_g (Cas3).	P :50
Fig31. Schéma des signaux d'erreur suivants les valeurs de T_g (Cas3).	P :50

INTRODUCTION GENERALE :

La régulation regroupe l'ensemble des techniques utilisées visant à contrôler une grandeur physique. Exemples de grandeur physique : Pression, température, niveau etc....L'opérateur réalise les fonctions suivantes : mesure, transmission de l'information, réflexion et réglage.



Sur ce fait nous allons pour notre projet d'initiation, réaliser une régulation de tension d'un alternateur de puissance en utilisant la commande proportionnelle intégrale dérivée (PID).

On va commencer notre rapport, en introduisant les principes de fonctionnement de l'alternateur, tout en mentionnant ces caractéristiques et son principe de fonctionnement ainsi que les différents types des centrales. Par la suite, on va présenter sa modélisation.

Et finalement, dans le 3eme et dernier chapitre, nous allons présenter les caractéristiques du régulateur PID, afin de pouvoir réaliser par la suite la simulation sous l'environnement Simulink/Matlab.

CHAPITRE I : PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT DE L'ALTERNATEUR

○ Introduction au 1^{er} chapitre :

L'alternateur est une machine synchrone qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique, par lequel les centrales de production de l'électricité sont équipées (turbo-alternateur).

Dans ce premier chapitre, nous allons présenter les constitutions, fonctionnements et types des alternateurs triphasés, ainsi que les différentes centrales électriques.

1. CONSTRUCTION ET CARACTERISTIQUES DES ALTERNATEURS :

1.1. LES CONSTITUTIONS DE L'ALTERNATEUR :

Du point de vue électrique, les alternateurs se composent de deux éléments distincts : **l'inducteur et l'induit**.

L'inducteur a pour rôle de produire le champ magnétique. Il est donc constitué d'électro-aimants disposés de manière à créer alternativement des pôles nord et sud.

L'induit est constitué de l'ensemble des enroulements dans lesquels la tension est induite.

Comme vous l'avez appris précédemment, l'inducteur de la majorité des alternateurs est mobile, tandis que l'induit constitue la partie fixe de la machine.

La figure suivante montre l'induit et l'inducteur d'un alternateur.

Alternateur à inducteur mobile :

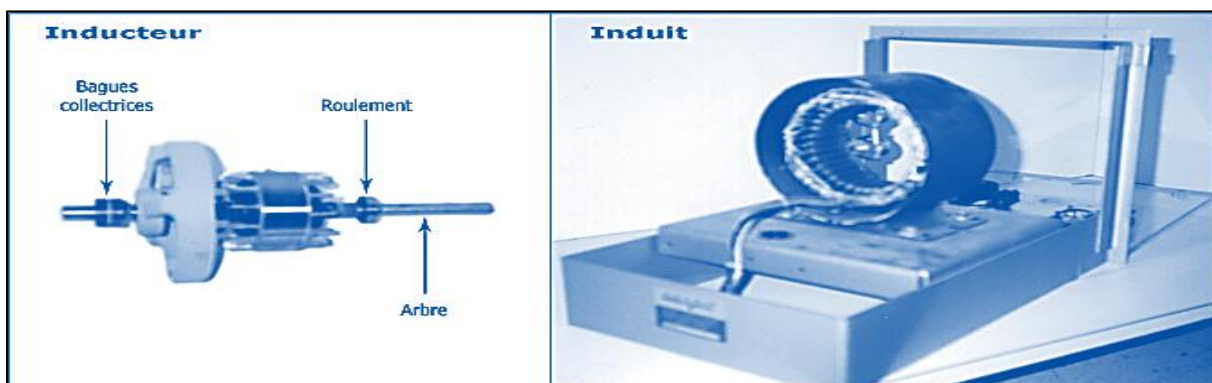


Fig1. L'induit et l'inducteur d'un alternateur

Du point de vue mécanique, les deux principaux composants d'un alternateur **sont le rotor et le stator**.

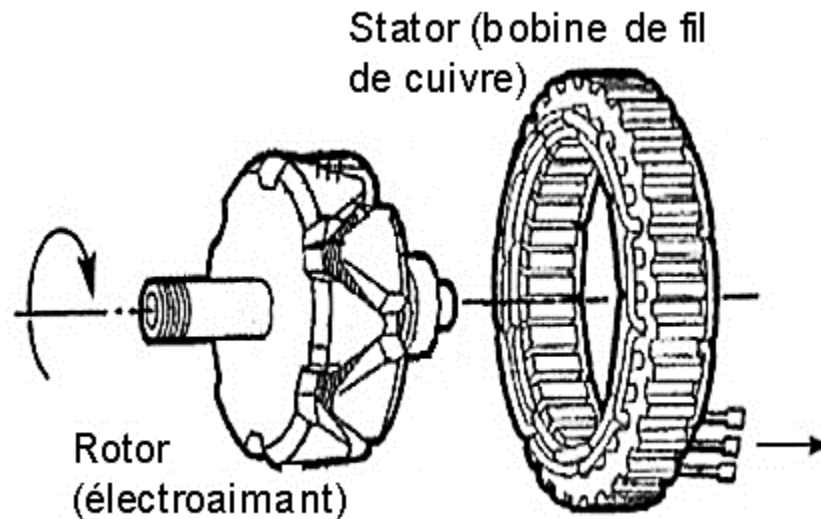
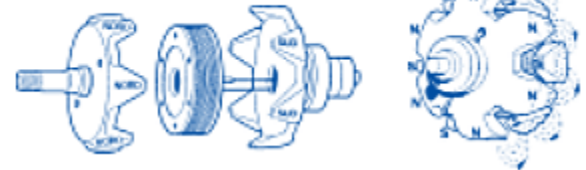


Fig2. Rotor et stator d'un alternateur

- **ROTOR** : Le rotor **constitue l'élément mobile de l'alternateur**. Il renferme les pièces polaires qui constituent l'inducteur de la machine, c'est pourquoi on l'appelle aussi "roue polaire". Il peut tourner jusqu'à 14000 tr/mn. Grâce au rapport de démultiplication des poulies, il tourne à plus de 1000 tr/mn quand le moteur est au ralenti, ce qui permet à l'alternateur de débiter suffisamment. L'enroulement du rotor fournit le Champ Magnétique nécessaire au fonctionnement de l'alternateur
- **STATOR** : Comme son nom l'indique, **le stator constitue la partie fixe** ou statique, de l'alternateur. Il s'agit donc le plus souvent de l'induit.

ROTOR



STATOR






Le stator se compose alors d'un noyau en tôle d'acier muni d'encoches destinées à recevoir



les conducteurs formant les enroulements de l'induit.

Les enroulements du stator sont fabriqués en fils de cuivre. Chaque spire de fil est isolée des autres spires. Dans le cas des alternateurs monophasés, les enroulements sont reliés en série.

Dans le cas des alternateurs triphasés, les enroulements du stator sont divisés en trois enroulements distincts, disposés à 120° les uns des autres.

- Or, y'en a d'autres composantes mécaniques qui assure la fonctionnalité totale, et sont comme suit :

Charbons : Ils frottent sur les bagues du collecteur afin de fournir un courant d'excitation au rotor. Ils s'usent et constitue la principale cause de panne. Le régulateur incorporé pilote l'excitation des charbons donc le champ magnétique. But : limiter la tension en ligne à environ 14 V.	CHARBONS 
PONT REDRESSEUR : Constitué d'un nombre de diodes variable, il sert à transformer le courant alternatif en courant continu.	PONT REDRESSEUR 
FLASQUES : Ils supportent l'axe du rotor par deux roulements.	FLASQUES 

<p>POLIE : Elle reçoit l'énergie mécanique (mouvement rotatif) en provenance du moteur.</p>	<p>POULIE</p> 
<p>VENTILATEUR : Sur la plupart des alternateurs, on retrouve un ventilateur tournant avec le rotor derrière la poulie d'entraînement. Ce ventilateur souffle de l'air à travers le boîtier de l'alternateur via les ouvertures de son extrémité arrière. L'air chaud quitte l'alternateur par les ouvertures de sa façade et sort derrière le ventilateur du moteur. Ce déplacement d'air dans le composant permet de refroidir les diodes.</p>	<p>VENTILATEUR</p> 

1.2. LES CARACTERISTIQUES DE L'ALTERNATEUR :

➤ A VIDE :

Pour décrire le comportement des alternateurs, on utilise des graphiques qui permettent d'illustrer la relation entre deux ou plusieurs variables électriques et mécaniques.

Il existe deux conditions essentielles pour qu'un alternateur puisse générer une tension :

1. L'alternateur doit tourner à sa vitesse synchrone, c'est-à-dire à la vitesse qui lui est nécessaire pour produire une tension d'une fréquence de 50 Hz.
2. L'inducteur doit être excité à l'aide d'une source externe de courant continu.

La figure suivante montre le schéma de raccordement d'un alternateur triphasé tournant à vide, c'est-à-dire n'alimentant aucun appareil :

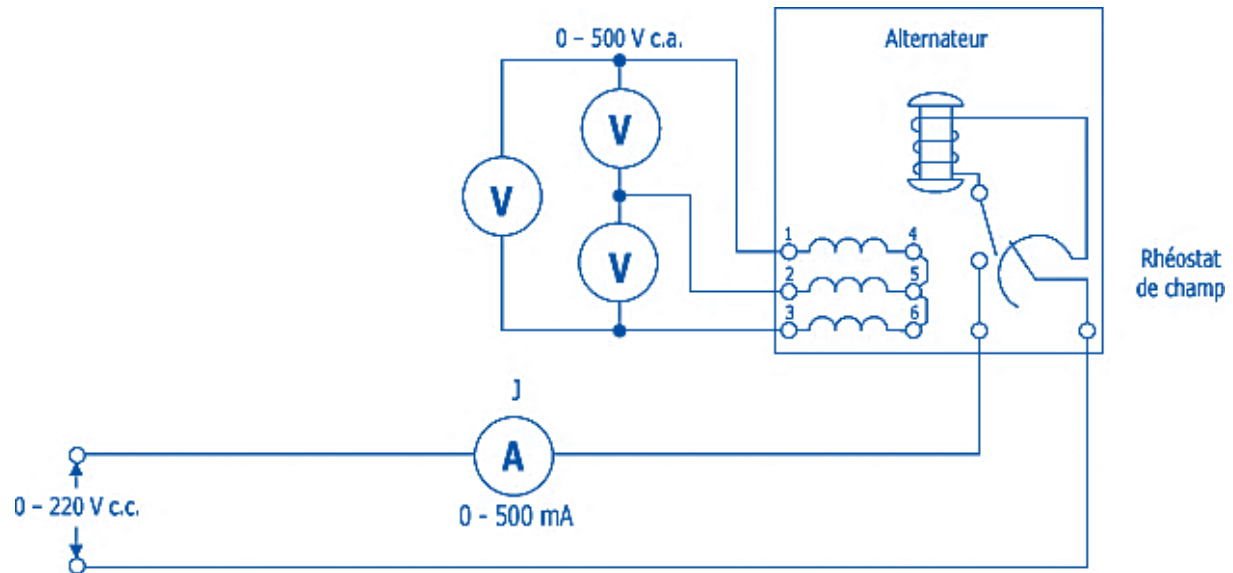


Fig3. Le raccordement d'un alternateur triphasé tournant à vide

➤ Caractéristique en charge des alternateurs :

La tension de sortie d'un alternateur n'est pas constante ; elle varie en fonction de la charge qui lui est imposée. C'est pourquoi on régularise la tension de sortie en exerçant un contrôle sur le courant d'excitation. Cette action est réalisée en agissant sur le rhéostat de champ.

Pour obtenir les caractéristiques en charge d'un alternateur, on règle la tension à sa valeur nominale (240 V) en augmentant le courant d'excitation, qu'on garde constant par la suite. On charge graduellement l'alternateur jusqu'à ce que l'on atteigne 120 % de sa puissance maximale.

La figure suivante montre les caractéristiques en charge d'un alternateur dans **trois situations** possibles :

1. Facteur de puissance unitaire.
2. Facteur de puissance arrière 0,8.
3. Facteur de puissance avant 0,8.

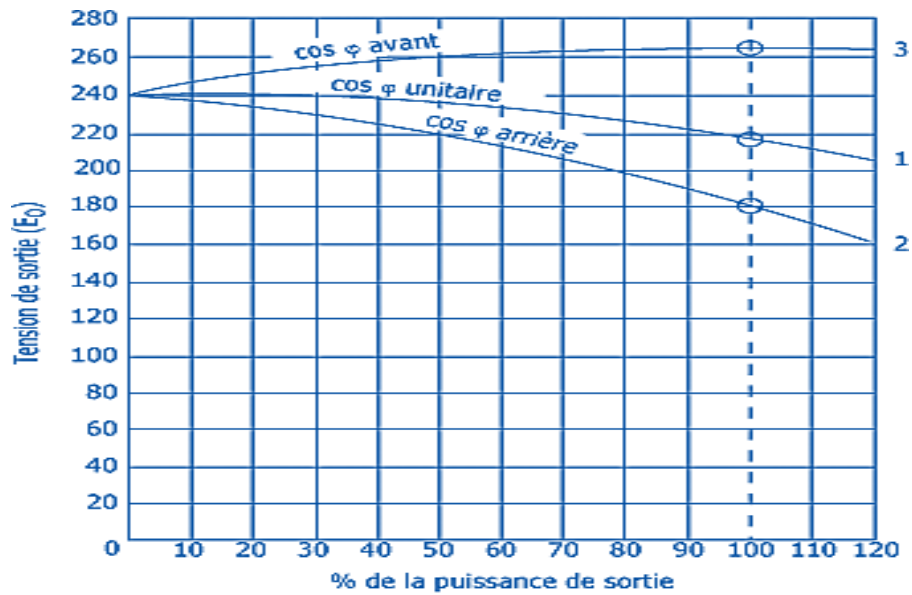


Fig4. Les caractéristiques en charge d'un alternateur

- Le facteur de puissance **unitaire** correspond à une **charge purement résistive**.
- Le facteur de puissance **arrière** correspond à une **charge inductive**, dans ce cas la réaction de l'induit affaiblit le champ inducteur, ce qui provoque une baisse de la tension de sortie.
- Enfin, le facteur de puissance **avant** correspond à une **charge capacitive**, par conséquent la réaction de l'induit augmente, car une partie de son champ magnétique s'ajoute au champ magnétique de l'inducteur. Ce phénomène entraîne l'augmentation de la tension de sortie.

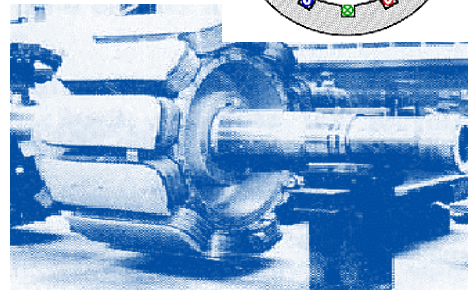
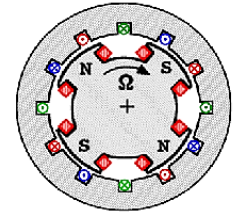
1.3. LES TYPES DE L'ALTERNATEUR :

Il existe 2 types principaux d'alternateurs :

➤ **Alternateur à rotor à pôles saillants :**

On utilise un rotor à pôles saillants tel que les bobines d'excitation, fabriquées de fils ou de barres de cuivre, sont fixées directement sur les pièces polaires. Ces bobines sont reliées en série, de façon à créer des polarités contraires entre deux pôles voisins.

Ce type d'alternateur tourne à basse vitesse, en effet sa puissance varie de 1 000 kVA à 250 MVA. Il équipe la plupart des centrales hydrauliques, les groupes de secours des administrations et les navires.

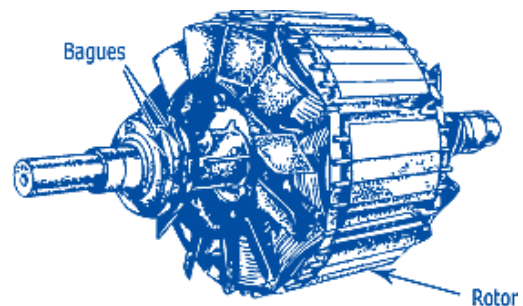
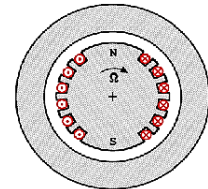


➤ **Alternateur à rotor à pôles lisses**

Les rotors à pôles lisses sont conçus pour les petits alternateurs tournant à haute vitesse.

Leur forme est cylindrique ; les bobines d'excitation s'insèrent dans les entailles usinées à cette fin.

Cette machine est appelée "turbo-alternateur" du fait de sa vitesse de rotation élevée. Leur puissance peut atteindre 1,5 GVA et ils équipent la plupart des centrales thermiques classiques et nucléaires.



2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE L'ALTERNATEUR :

2.1. PRODUCTION DE LA F.E.M. :

Le phénomène permettant à un alternateur de produire de l'électricité est **le phénomène d'induction**. En effet la création de la force électromotrice au niveau des enroulements du stator (bobines) se fait lorsqu'un système inducteur (aimant) tourne à une vitesse donnée Ω_s par rapport au stator. La loi de **Faraday-Lenz** indique que la force électromotrice produite par phase est donnée par la relation : $e(t) = -n_s \frac{d\phi(t)}{dt}$ avec : n_s le nombre de spires au niveau de chaque phase et $\phi(t)$ le flux instantané produite par le système inducteur qui traverse les spires. Cette expression instantanée du flux magnétique est sinusoïdale car l'aimant tourne à vitesse constante et a pour valeur au niveau de la phase A (considérée comme l'origine des phases) : $\phi(t) = \phi_m \cos(\omega_s t)$ avec ϕ_m le flux maximal et ω_s la pulsation électrique.

Les f.é.m. dans les différentes phases auront la même valeur mais seront décalés de $2\pi/3$. La production de ces f.é.m. dépend aussi d'un paramètre très important à savoir de bobinage car du bobinage dépendent la capacité de captage des flux générés par le rotor et la répartition sinusoïdale du flux capté par phase. On considère que chaque phase possède **b** bobines, chaque bobine **m** sections et chaque section **z_s** spires. De tous ces différents paramètres nous allons déduire un coefficient dite **coefficient** de bobinage dont dépend la valeur efficace de la f.é.m. produite dans les phases de l'alternateur. L'excitatrice possède paire(s) de pôles et un nombre N_e d'encoches au total.

Le nombre d'encoche par pôle et par phase est défini par : $m = \frac{N_e}{2p \times q}$ avec $q=3$ puisque l'alternateur est triphasé.

Le pas polaire est lui définit par l'expression $\alpha = \frac{2\pi}{2p} = \frac{\pi}{p}$

L'angle mécanique de décalage entre les encoches est donné par :

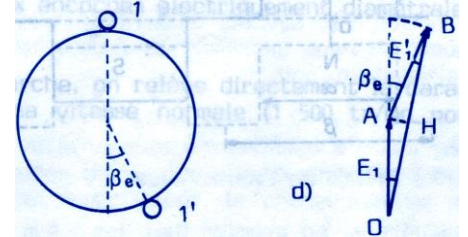
$$\beta_m = \frac{2\pi}{N_e} = \frac{2\pi}{6p \times m} = \frac{\pi}{3pm}$$

On définit ainsi les coefficients suivants :

○ **Le coefficient de raccourcissement :**

Dans ce cas l'ouverture de différentes spires est inférieure au pas polaire, si l'angle électrique d'ouverture d'une spire est $(\pi - \beta_e)$ les f.é.m. induites dans les brins actifs disposés dans les encoches 1-1' seront diminuées donc la f.é.m. est corrigée par le facteur de raccourcissement calculé par :

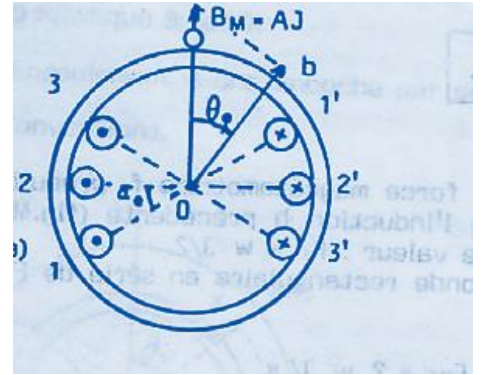
$$K_r = \cos \frac{\beta_e}{2} = \sin \left(\frac{y}{\alpha} \times \frac{\pi}{2} \right) \text{ Avec } y \text{ le pas de la bobine}$$



○ **Le coefficient de distribution :**

Les spires d'une même phase sont décalées d'un angle électrique β_e , par exemple les f.é.m. engendrées par le champ tournant dans les brins actifs qui occupent les encoches (2-2') sont en retard de β_e par rapport à celles engendrées dans les brins actifs des encoches (1-1'). Le facteur de distribution est calculé par :

$$K_d = \frac{\sin \left(m \times \frac{\beta_e}{2} \right)}{m \times \sin \left(\frac{\beta_e}{2} \right)} = \frac{\sin \left(m \times \frac{p\beta_m}{2} \right)}{m \times \sin \left(\frac{p\beta_m}{2} \right)} \text{ Car } \beta_e = p \beta_m$$



○ **Le coefficient d'inclinaison :**

Pour les encoches inclinées d'un certain angle α_i , le facteur d'inclinaison se calcule par :

$$K_i = \frac{\sin \left(\frac{p\alpha_i}{2} \right)}{p\alpha_i/2} \text{ Ce coefficient traduit l'effet de denture.}$$

○ **Le coefficient de bobinage :**

C'est le produit des trois coefficients précédemment établis. Il est défini par l'expression

$$K_b = K_d \times K_r \times K_i$$

La f.é.m. théorique produite par chaque spire est multipliée par le coefficient de bobinage pour obtenir la f.é.m. réelle. Pour avoir la f.é.m. totale produite par l'alternateur il faut multiplier par le nombre Z_s de spires. Nous allons déterminer dans un premier temps la force électromotrice théorique dans une spire. $e(t) = -\frac{d\phi(t)}{dt} = \phi_m \omega_s \sin(\omega_s t) = \phi_m \omega_s \sin(\omega_s t) = 2\pi\phi_m f_s \sin(\omega_s t)$

La valeur efficace de cette f.é.m. est donc $e = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \phi_m f_s$

La force électromotrice totale dans l'alternateur est donc :

$$E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} K_b Z_s \phi_m f_s = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} K_b \frac{Z_c}{2} \phi_m f_s = \frac{\pi}{\sqrt{2}} K_b Z_c \phi_m f_s$$

Finalement on a : **$E = K_p Z_c \phi_m f_s$** avec $K_p = \frac{\pi}{\sqrt{2}} K_b$ le coefficient de Kapp

Sachant que $f_s = p \frac{\Omega_s}{2\pi}$ on a : $E = K_p Z_c \phi_m p \frac{\Omega_s}{2\pi}$

Ceci donne au final : **$E = K \phi_m \Omega_s$**

Avec : **$K = K_p \frac{p Z_c}{2\pi}$** la constante de machine.

2.2. FONCTIONNEMENT DE L'ALTERNATEUR A VIDE :

On dit que l'alternateur fonctionne à vide quand le courant au niveau du stator est nul. Pour se faire on coupe l'alimentation de l'alternateur au réseau comme le montre la figure ci-dessous :

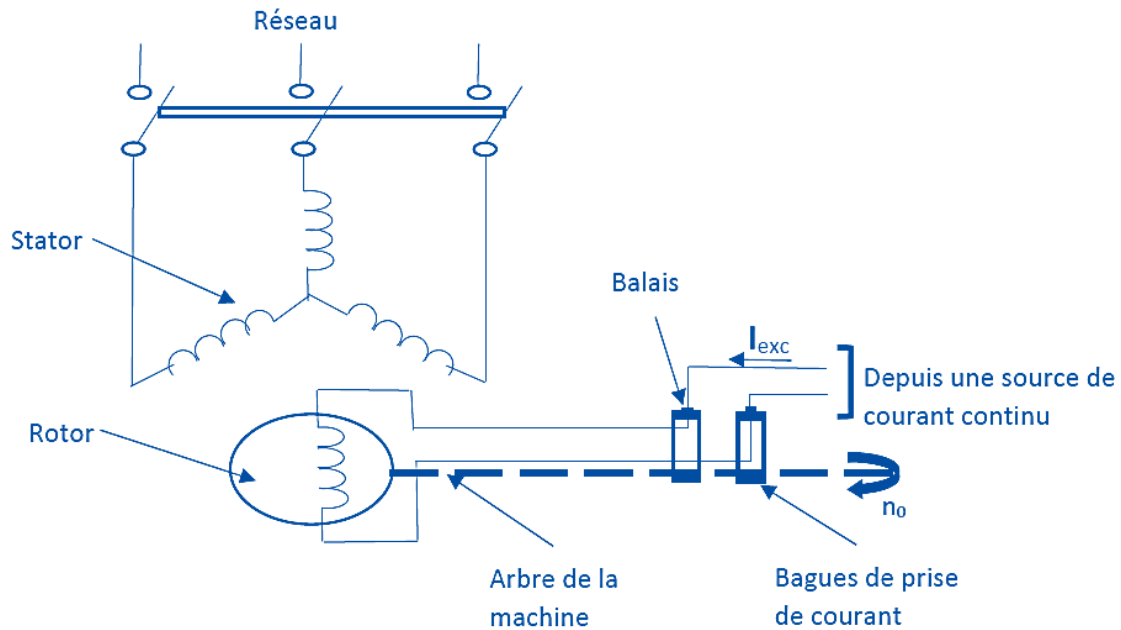


Fig5. Fonctionnement de l'alternateur à vide

Le rotor tourne à une vitesse constante n_0 . On fait varier le courant inducteur I_r au niveau du stator. Cette variation du courant inducteur fait bien évidemment varier le flux magnétique inducteur ce qui provoque ainsi une variation de la f.é.m. au niveau du stator comme le montre la figure ci-dessous :

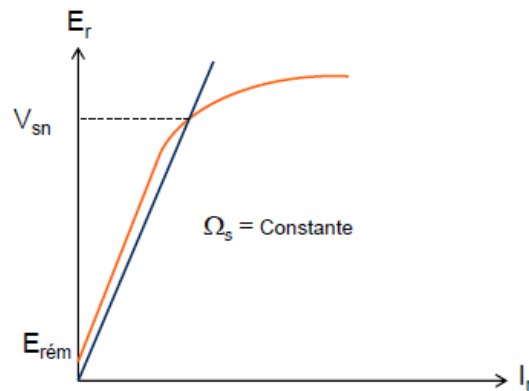


Fig6. Variation de la f.é.m

Il est important de noter le courant d'excitation et la f.é.m. sont proportionnels jusqu'à ce que la f.é.m. n'atteigne sa valeur nominale V_{sn} . La courbe obtenue est similaire à celle de la caractéristique magnétique.

On a donc $E_r = k_v \times I_r$ lorsque $E_r < V_{sn}$ avec k_v un coefficient constant

On donne aux épanouissements polaires du rotor une forme telle que la répartition du flux magnétique suit la circonférence du stator de la machine soit aussi voisine que possible d'une répartition sinusoïdale.

2.3. FONCTIONNEMENT EN CHARGE DE L'ALTERNATEUR :

Lorsque le stator débite un certain courant I_s dans une charge équilibrée on a une superposition de deux forces magnétomotrices à savoir :

La force magnétomotrice au niveau du rotor : $F_r = n_r I_r$ avec n_r le nombre de spire du rotor

La force magnétomotrice au niveau du stator : $F_s = K_s I_s$ avec K_s un coefficient de l'alternateur

La force magnétomotrice résultante F est la somme vectorielle entre F_r et F_s .

Le flux résultant représentant la réaction magnétique de l'induit s'écrit :

$$\underline{\Phi_c} = \underline{\Phi_r} + \underline{\Phi_s}.$$

Ceci provoque **une atténuation du flux utile**.

Lorsque l'alternateur fonctionne en charge on peut le modéliser avec un certain nombre de composants électriques. Nous verrons ceci dans une partie ultérieure.

2.4. COUPLAGE DE L'ALTERNATEUR AU RESEAU :

Coupler un alternateur au réseau revient à mettre en parallèle cet alternateur avec d'autres alternateurs appartenant au réseau et ayant le même système de f.é.m. et le même système des tensions du réseau de puissance infinie : V_A , V_B , V_C .

Il est donc impératif de respecter les grandeurs existantes du réseau comme la fréquence et la valeur de la tension. Il est illusoire de penser à modifier ces dernières. Pour ajuster la fréquence il nous suffira de jouer sur la vitesse du moteur d'entraînement et pour la tension il nous faudra jouer sur la valeur du courant d'excitation.

Nous avons donc un certain nombre de conditions obligatoire que doit remplir un alternateur avant qu'on ne l'accroche au réseau à savoir :

- **La même fréquence que les autres alternateurs couplés au réseau :** comme nous l'avons vu précédemment cette fréquence dépend du nombre de paires de pôles de l'alternateur et aussi de la fréquence de rotation du rotor de ce dernier.
- **La même tension que les autres alternateurs couplés au réseau :** cette égalité entre les différentes tensions est assurée par le réglage du courant d'excitation I_r du rotor. Comme nous l'avons vu précédemment, l'alternateur délivre une tension donnée si deux conditions sont respectées. La première condition est la présence de flux magnétique au niveau de stator et la seconde est la variation de ce dernier au niveau du stator. La première condition est assurée par le réglage du courant d'excitation I_r et la seconde par la rotation du rotor.
- **La même succession de phases que les autres alternateurs couplés au réseau :** en effet il est simple de comprendre que si deux alternateurs possèdent la même fréquence et la même tension, que les vecteurs V_1 et V_1' sont identiques et ils tournent à la même vitesse, le potentiel entre V_1 et V_1' est donc nul. Par contre, en fonction de l'ordre de succession des phases nous pourrions avoir des potentiels différents sur les autres phases or deux sources de tensions en parallèles doivent avoir exactement les mêmes tensions.

- **Un déphasage nul à l'instant d'accrochage du générateur :** pour que les potentiels entre les sources de tensions soient égaux dans le domaine complexe parce qu'autrement la mise en parallèle n'a aucun sens.

3. EXCITATION DES ALTERNATEURS :

L'excitation est très importante dans l'alternateur parce que le système peut régler la quantité de puissance réactive cédée ou absorbée par l'alternateur.

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

3.1. SYSTEME D'EXCITATION COURANT CONTINU (DC) :

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

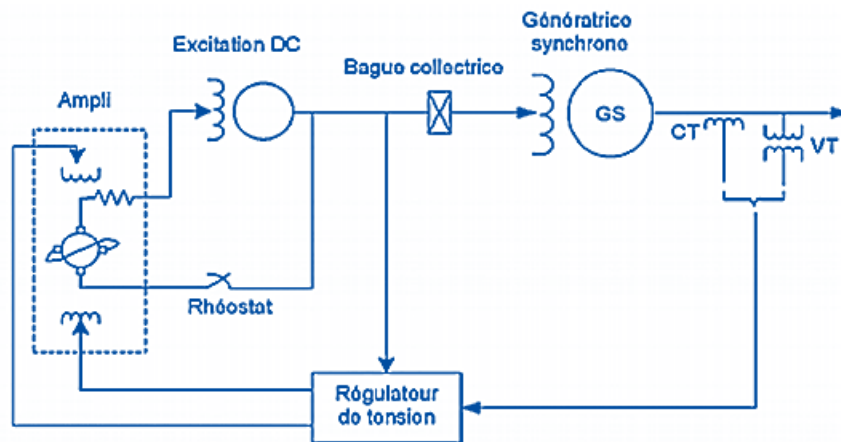


Fig7. Système d'excitation de type DC

Actuellement, ce type d'excitation est rarement utilisé pour fin d'étude de la stabilité car il exige une modélisation complexe. Il est souvent remplacé par l'excitatrice de type AC ou l'excitatrice statique.

3.2. SYSTEME D'EXCITATION A COURANT ALTERNATIF (AC) :

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

Les Figures montrent l'excitatrice de type AC muni d'un redresseur stationnaire non commandé et commandé respectivement :

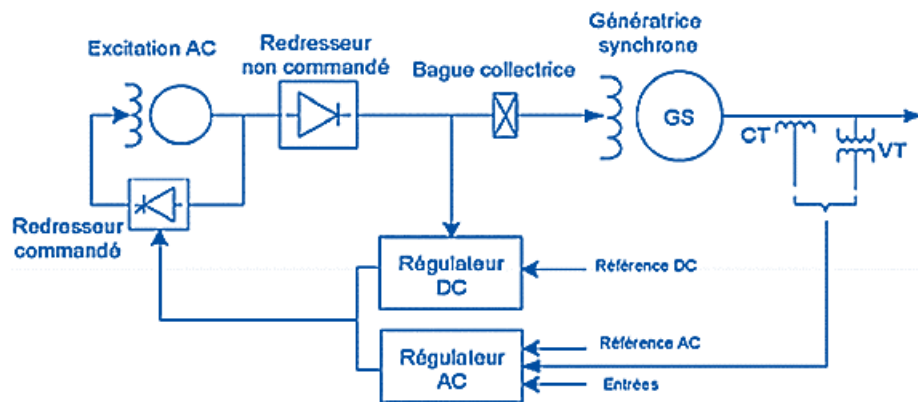


Fig8. Excitation de type AC avec redresseur non commandé

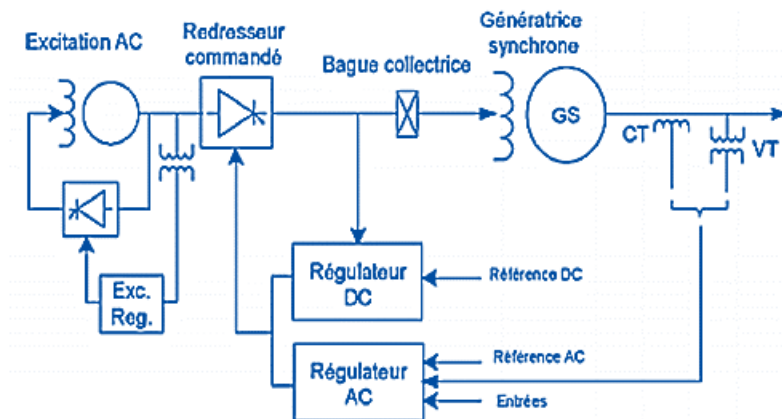


Fig9. Excitation de type AC avec redresseur commandé

Dans le cas de l'excitation à courant alternatif avec redresseur tournant, les bagues collectrices sont éliminées et la sortie du redresseur à diodes est directement reliée à la

machine synchrone. La Figure illustre l'excitation AC de type Brushless où l'on observe la structure tournante composée de l'excitatrice principale AC et du redresseur à diodes, tel que la sortie du redresseur de l'excitatrice pilote active le champ à la structure tournante.

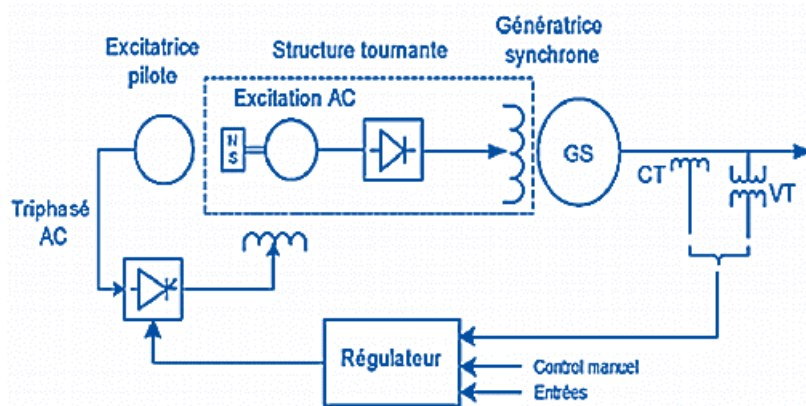


Fig10. L'excitation AC de type Brushless

3.3. SYSTEME D'EXCITATION STATIQUE :

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

- (a) avec redresseur commandé à source de tension.
- (b) avec redresseur non commandé à source combinée.
- (c) avec redresseur commandé à source combinée.

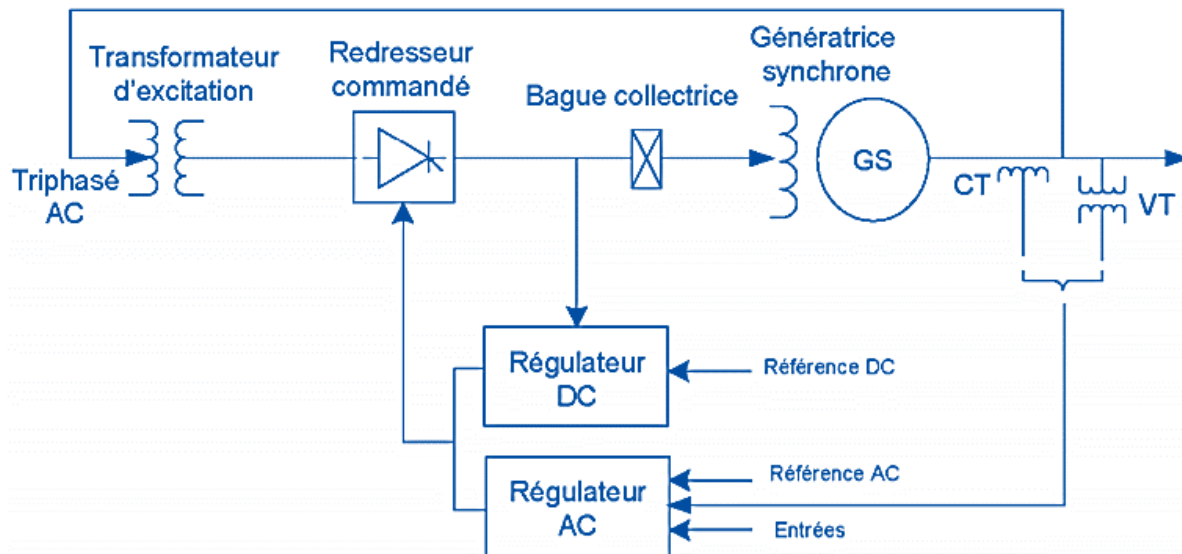


Fig11. Excitatrice statique par redresseur commandé à source de tension

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

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

4. LES CENTRALES ELECTRIQUES :

4.1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES CENTRALES ELECTRIQUES :

Une centrale électrique est un site industriel destiné à la production d'électricité. Elle fonctionne grâce à :

- Un réservoir d'énergie dite primaire qui sera transformée en énergie mécanique
- Une turbine qui possède de l'énergie mécanique du fait de son mouvement rotatif à l'exception des centrales éoliennes
- Un alternateur qui transforme l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique.

Le type de turbine définit le type de la centrale électrique. On distingue essentiellement :

- Une turbine à vapeur dans une centrale thermique (à combustible fossile ou nucléaire).
- Une turbine à combustion aussi appelée turbine à gaz dans une centrale thermique.
- Une turbine hydraulique, dans une centrale hydroélectrique.
- L'éolienne est aussi une sorte de turbine.

4.2. CENTRALE NUCLEAIRE :

Une centrale nucléaire produit de l'électricité grâce à la chaleur qui se dégage de la fission des atomes d'uranium. La centrale fonctionne avec trois circuits d'eau : le circuit primaire, le circuit secondaire et le circuit de refroidissement. Le combustible d'une centrale nucléaire est conditionné sous forme de petites particules d'uranium empilé dans de longs tubes métalliques appelés crayons. Ces tubes sont placés dans une cuve en acier rempli d'eau et constitue ainsi le cœur du réacteur. Sous l'effet de la fission des atomes d'uranium, les tubes chauffent l'eau à 320°, mise sous pression pour la maintenir à l'état liquide, cette eau est ensuite dirigée jusqu'au générateur de vapeur. Au contact des tuyaux parcourus par l'eau très chaude du circuit primaire, l'eau du circuit secondaire s'échauffe à son tour et se transforme en vapeur. La vapeur ainsi produite fait tourner une turbine qui fait à son tour tourner un alternateur. En sortant de la turbine la vapeur est retransformée en eau grâce au circuit de refroidissement pour être renvoyée vers le générateur de vapeur pour un nouveau cycle. Cette vapeur passe pour cela dans un condenseur ; ce condenseur est soit alimenté par de l'eau froide prélevée dans la mer ou dans le fleuve soit par de l'eau refroidit par le courant d'air qui circule dans de grande tour appelé aéroréfrigérant.

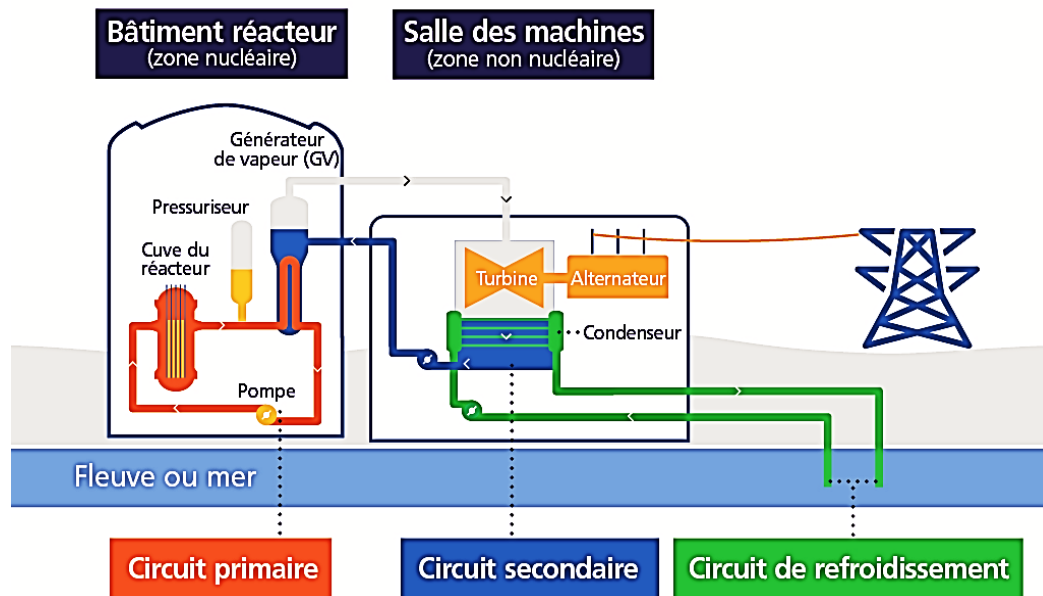


Fig12.Centrale nucléaire

4.3. CENTRALE THERMIQUE A FLAMME :

Dans une centrale thermique à flamme, on chauffe de l'eau liquide pour la transformer en vapeur d'eau à l'aide d'un combustible fossile (charbon, pétrole gaz naturel). La combustion du combustible fossile à l'aide d'un comburant dioxygène produit du dioxyde de carbone et de l'eau. La vapeur d'eau formée dans la chaudière est alors sous pression et elle va se déplacer vers le circuit de refroidissement où elle est condensée en eau liquide. Cette opération entraîne une forte pression du côté de la chaudière et une dépression au niveau du condenseur. C'est grâce à cela que la vapeur peut se déplacer de la chaudière vers la turbine. L'eau liquide est ainsi récupérée et recyclée dans la chaudière pour recommencer un autre cycle. En se déplaçant la vapeur d'eau va entraîner une turbine qui à son tour fait tourner un alternateur.

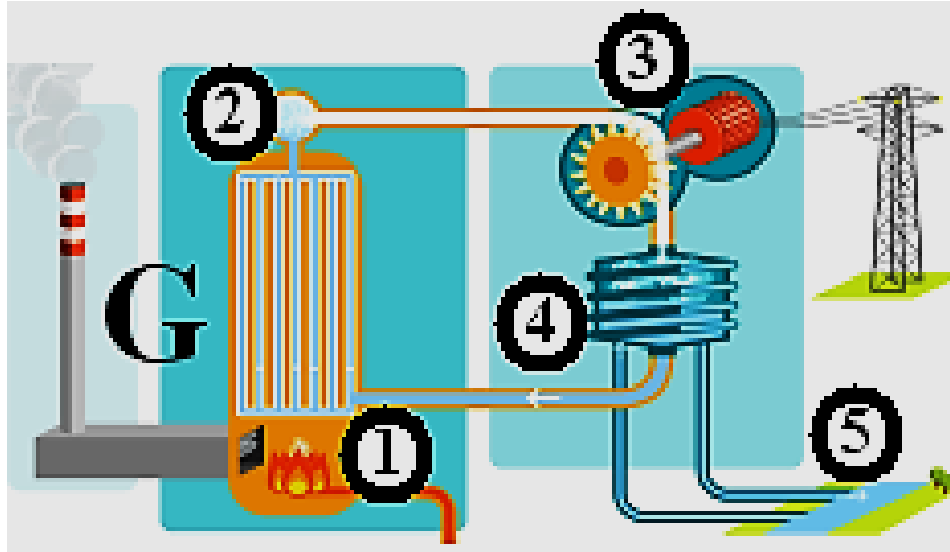


Fig13. Centrale thermique à flamme

4.4. CENTRALE HYDRAULIQUE :

Une centrale hydraulique produit de l'électricité en utilisant la force de l'eau. Un barrage retient l'écoulement naturel de l'eau. De grande quantité d'eau s'accumulent et forment un lac de retenue. Une fois l'eau stockée et en fonction des besoins, des vannes sont ouvertes au niveau du barrage pour que l'eau s'engouffre dans de longs tuyaux appelés conduites forcées. Ces tuyaux conduisent l'eau vers la centrale hydraulique. Dans la centrale, à la sortie de la conduite, la force de l'eau fait tourner une turbine qui à son tour fait tourner l'alternateur.

Une station de transfert d'énergie par pompage (**STEP**) fonctionne en circuit fermé. Son principe repose sur un double réservoir d'eau. L'eau du bassin supérieur située en amont est turbinée aux heures de très forte consommation puis recueillies dans une retenue en aval. La retenue supérieure constitue donc une réserve d'énergie. La puissance de la centrale dépend de la hauteur de la chute d'eau entre les deux bassins et de son débit. A la demande, la turbine est mise en mouvement, prend de la vitesse en quelques minutes et entraîne dans sa rotation un alternateur qui produit de l'électricité ; enfin l'énergie produite par cet alternateur est évacuée vers le réseau de transport d'électricité par l'intermédiaire d'un transformateur. Aux heures de faibles consommations, l'eau est pompée et remontée dans la retenue en amont.

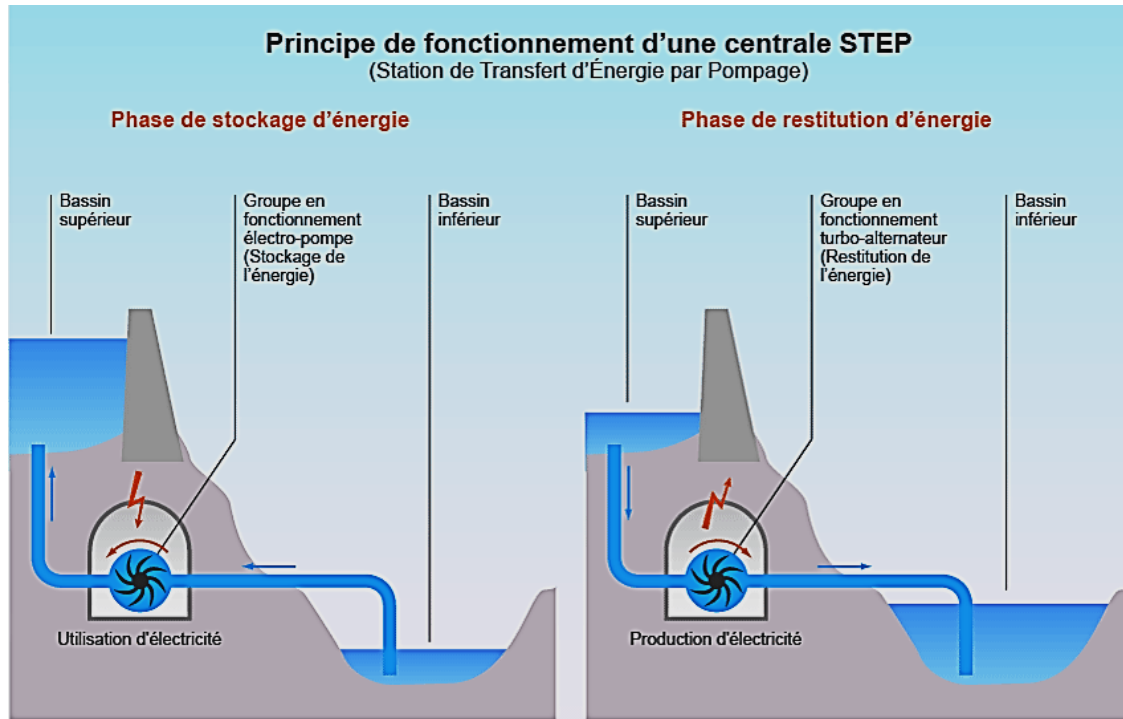


Fig14. Centrale hydraulique

4.5. CENTRALE EOLIENNE :

Une centrale éolienne produit de l'électricité grâce à la force du vent. Il existe deux grands types d'installations : le parc terrestre et le parc implanté en mer. En haut du mat de l'éolienne, l'hélice appelée aussi rotor composée en générale de trois pales, se met à tourner sous l'effet du vent d'au moins 10 km/h. La nacelle sur laquelle elle s'est fixée s'oriente automatiquement pour être toujours face au vent et les pales pivotent pour capter un maximum de vent. Si le vent dépasse 90km/h l'éolienne s'arrête automatiquement de fonctionner pour des questions de sécurité. Dans la nacelle l'hélice fait tourner un axe ; sa vitesse de rotation n'étant pas suffisante pour générer de l'électricité, un multiplicateur augmente cette vitesse jusqu'à 1500tr/min et la transmet à un second axe qui fait à son tour tourner un alternateur.

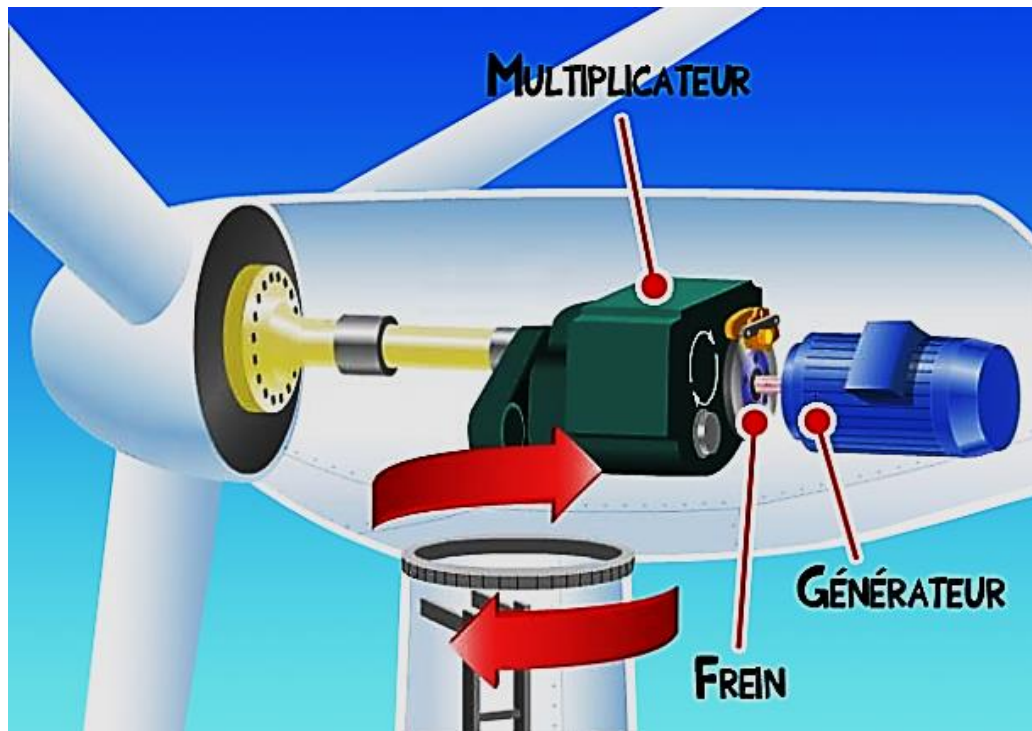


Fig15.Centrale éolienne

○ Conclusion du 1^{er} chapitre :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la technologie et le principe de fonctionnement de l'alternateur. L'alternateur est l'élément principal dans l'opération de production de l'énergie électrique qu'on utilise quotidiennement dans notre vie.

Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation de l'alternateur.

CHAPITRE II : MODELISATION DE L'ALTERNATEUR

○ Introduction au 2^{eme} chapitre :

La régulation de tension de l'alternateur de puissance nécessite d'avoir un modèle mathématique, ce modèle devra prendre en compte les paramètres techniques de l'alternateur à étudier.

Nous allons présenter dans ce chapitre les principes de la production des f.é.m et leur bilan de puissance.

1. PRINCIPE DE LA PRODUCTION DES F.E.M. TRIPHASEES EQUILIBREES :

Nous avons vu au niveau du chapitre 1 le principe de production des f.é.m. au niveau des 3 phases ; dans cette partie nous allons modéliser cette production des f.é.m. à partir des éléments électriques de base à savoir : les résistors, les bobines et les capacités.

Les tensions produites au niveau des phases 1, 2 et 3 de l'alternateur sont respectivement :

- $e_1(t) = e\sqrt{2} \cos(\omega t)$
- $e_2(t) = e\sqrt{2} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$
- $e_3(t) = e\sqrt{2} \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$ Avec e la valeur efficace de la tension produite par chaque phase de l'alternateur dont nous avons déterminé sa valeur au niveau du chapitre précédent.

Les f.é.m. produites forment donc un système triphasé équilibré.

Lorsque l'alternateur est connecté à une charge elle soumet cette tension à la charge. Les différents enroulements au niveau du stator de l'alternateur vont créer un champ magnétique donné, nous allons donc modéliser ces enroulements par une bobine d'inductance L_s . Ces enroulements sont des fils de cuivre et possèdent une certaine longueur non négligeable. Nous modélisons donc ces enroulements par un résistor de résistance R_s .

Les enroulements du stator correspondent donc à une charge RL qui engendre un certain nombre de pertes.

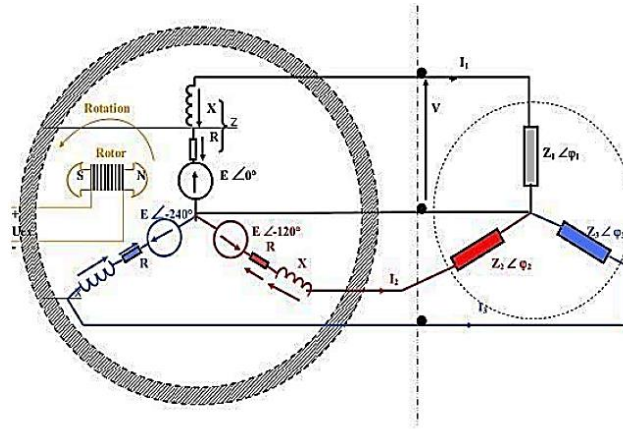


Fig16. Les enroulement du stator

1.1. SCHEMA EQUIVALENT DE L'ALTERNATEUR :

Nous allons modéliser le schéma équivalent monophasé d'un alternateur connecté à une charge **Z**.

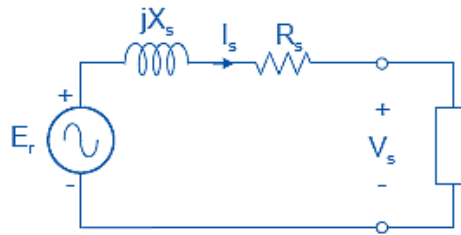
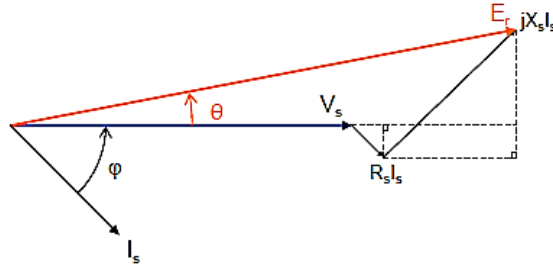


Fig17. Schéma monophasé équivalent

Nous avons évidemment dans le plan complexe $\underline{E}_r = \underline{V}_s + \underline{R}_s \underline{I}_s + j \underline{X}_s \underline{I}_s$ avec $\underline{X}_s = L \omega$

1.2. DIAGRAMME DE TENSIONS ET NOUVELLE EXPRESSION DE LA F.E.M. AU NIVEAU D'UNE PHASE :

Nous avons le diagramme de Fresnel suivant :



En faisant une projection sur les axes x et y et en utilisant le théorème de Pythagore nous avons :

$$E_r^2 = (V_s + R_s I_s \cos\phi + X_s I_s \sin\phi)^2 + (X_s I_s \cos\phi - R_s I_s \sin\phi)^2$$

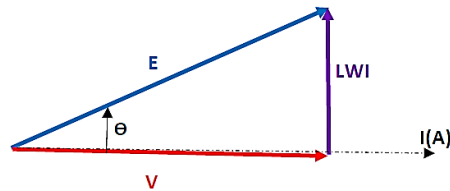
La chute de tension est équivalente à la tension au niveau des enroulements du stator et est égale à :

$$\Delta V_s = E_r - V_s = R_s I_s \cos\phi + X_s I_s \sin\phi$$

1.3. DIAGRAMME DE FONCTIONNEMENT EN CHARGE DE L'ALTERNATEUR :

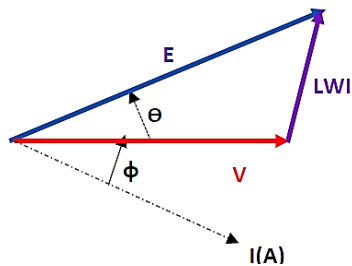
Ces diagrammes diffèrent selon la nature de la charge :

- **Cas d'une charge résistive :**



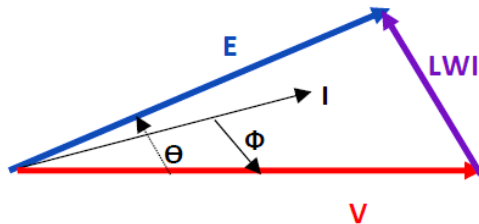
L'alternateur produit uniquement de la puissance réactive

- **Cas d'une charge inductive :**



L'alternateur produit de la puissance active et de la puissance réactive.
L'alternateur est surexcité.

- **Cas d'une charge capacitive :**



L'alternateur produit de la puissance active et absorbe de la puissance réactive.
 L'alternateur est sous excité.

2. BILAN DE PUISSANCES DE LA MACHINE SYNCHRONES

➤ Puissance reçue

L'alternateur reçoit une puissance mécanique P_M qui lui est fournie par le moteur d'entraînement.

$$P_M = C_M \cdot \Omega$$

Avec C_M : le couple mécanique

Ω : la vitesse de rotation angulaire

➤ Puissance utile

Une partie de la puissance absorbée par l'alternateur est restituée sous la forme de puissance électrique P qui est reçue par la charge.

$$P = U I \sqrt{3} \cos \varphi$$

U : étant la tension entre phase

I : le courant de ligne

Cos φ : le facteur de puissance de la charge

➤ Pertes constantes

Les pertes mécaniques **p_m** dépendent de la fréquence de rotation et les pertes fers **p_{fs}** dépendent de la fréquence et du flux dans la machine. Pour une machine synchrone utilisée à fréquence et tension constantes, elles varient peu entre le fonctionnement vide et le fonctionnement en charge. On les considère donc comme constantes.

➤ Pertes par effet joule

- **Pertes joule stator :**

Si **r** est la résistance d'une phase du stator alors :

$P_{js} = 3 \times r \times I^2$ pour le couplage étoile.

$P_{js} = 3 \times r \times J^2$ pour le couplage triangle.

Si **R** est la résistance mesurée entre phases du stator couplé alors :

$P_{js} = \frac{3}{2} \times R \times I^2$ quel que soit le couplage.

- **Pertes Joule Inducteur**

$$P_{je} = U_e \times I_e \quad \text{avec}$$

U_e : la tension continue aux bornes de l'inducteur en V.

I_e : le courant continu d'excitation en A.

➤ Expression du rendement :

Si l'alternateur est auto-excité, c'est-à-dire s'il ne reçoit de puissance que du moteur qui l'entraîne, le rendement est alors égal :

$$\eta = \frac{3V_s I_s \cos \varphi}{CM \cdot \Omega}$$

Si l'alternateur n'est pas auto-excité, il faut ajouter à la puissance mécanique reçue la puissance P_{je} qui a été fournie au circuit d'excitation.

Dans le cas général, nous pouvons aussi exprimer le rendement en fonction des différentes pertes de puissance :

$$\eta = \frac{3V_s I_s \cos \phi}{3V_s I_s \cos \phi + p_{fs} + p_{je} + p_{js} + p_m}$$

○ Conclusion du 2^{eme} chapitre :

Dans ce chapitre nous avons présenté le bilan des puissances et les caractéristiques de cette machine. Le chapitre suivant sera dédié à la régulation de tension d'alternateur de puissance ainsi qu'il sera validé par simulation sous l'environnement Matlab/Simulink.

CHAPITRE III. REGULATION DE TENSION D'UN ALTERNATEUR

○ Introduction au 3^{eme} chapitre :

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

La régulation est l'action de régler automatiquement une grandeur de telle sorte que celle-ci garde constamment sa valeur ou reste proche de la valeur désirée, quelles que soient les perturbations qui peuvent survenir.

La régulation automatique est la technique utilisée pour contrôler une ou plusieurs grandeurs physiques d'un système telles que la tension, la température, la pression, le niveau, etc., en vue d'en imposer le comportement et de maintenir ces grandeurs à des niveaux prédéfinis.

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

1. LE REGULATEUR PID :

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

Les contrôleurs PID sont couramment utilisés pour améliorer les performances des systèmes AVR (Automatic Voltage Regulator) qui est un régulateur automatique de tension. En utilisant un contrôleur proportionnel, le temps de montée d'une réponse peut être réduit.

1.1. LOI DE COMMANDE DU REGULATEUR PID :

Le régulateur Proportionnel intégral dérivé est donné comme suit :

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

1.2. FONCTION DE TRANSFERT DU REGULATEUR PID :

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

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \frac{1 + K_i s + K_d K_i s^2}{K_i s}$$

1.3. LES ACTIONS PID :

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



Fig18. Schéma synoptique d'un régulateur PID

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

Il fournit un signal de commande en tenant compte de l'évolution du signal de sortie par rapport à la consigne.

Il élimine l'erreur statique grâce au terme intégrateur.

Il anticipe les variations de la sortie grâce au terme dérivateur.

Un régulateur PID est la somme de trois termes :

Le terme proportionnel : $p = K_p e(t)$

Le terme intégral : $D = K_p K_d \frac{de}{dt}$

Le terme dérivatif : $I = K_p \frac{1}{K_i} \int e(t) dt$

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

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

Action	Avantages	Limitations
P	Action instantanée	Ne permet pas d'annuler une erreur statique mais permet de la réduire
I	Annule l'erreur statique	Action lente Ralentit le système (effet déstabilisant)
D	Action très dynamique Améliore la rapidité apporte un effet stabilisant	Sensibilité aux bruits Forte sollicitation de l'organe de commande

2. REGULATION DE TENSION D'UN ALTERNATEUR :

L'énergie électrique est le plus souvent l'énergie la plus utilisée dans la plupart des installations aussi bien domestiques qu'industrielles. Ceci nécessite ainsi que les tensions au niveau du réseau produites par les alternateurs connectés à celle-ci aient une certaine qualité. Nous avons déjà vu dans le chapitre 2 que pour un alternateur connecté au réseau par exemple il est absolument impératif que cet alternateur ait la même tension que les autres alternateurs connectés au réseau. Or il est évident que via un certain nombre d'élément interne ou externe les tensions produites au niveau des phases de l'alternateur peuvent varier créant ainsi un certain nombre de problèmes au niveau du réseau. Il s'avère donc très important de prévoir une régulation de la tension de l'alternateur avant que celle-ci ne soit utilisée dans une installation ou dans une application donnée. Pour faire face à ces perturbations, on doit prévoir des marges de sécurité nous permettant de contourner ces aléas ou de limiter leurs impacts. Une capacité de puissance réactive associée à une capacité de production de puissance active permettant de couvrir en permanence les besoins du système, assurent un maintien de la tension en tout point du réseau dans les plages de réglage fixées.

2.1. POURQUOI REGLE-T-ON LA TENSION A CERTAINES VALEURS DE REFERENCE ?

Il existe un certain nombre de raisons pour lesquelles on règle la tension produite par l'alternateur à certaines valeurs. Ces raisons dépendent en outre des applications techniques et des consommateurs. Par exemple nous savons tous que la tension de réglage pour les utilisations d'ordre domestiques est de **220 V**. Ainsi lorsque la tension délivrée varie par exemple de 5V à 10V par rapport à la valeur de référence il n'y a pas forcément de problèmes. Mais dans l'industrie où certaines machines très sensibles dont les performances dépendent directement des valeurs des tensions ceci peut constituer un problème. En outre les principales raisons sont :

- **La minimisation des pertes sur les lignes de transports** : dans le cas où l'alternateur déséquilibre le réseau avec une tension non conforme
- **Respect des tensions délivrées à la clientèle** : comme nous l'avons vu précédemment la valeur des tensions de certaines machines impactent directement sur leur performance. Ceci implique un effort de la part du fournisseur dans la régulation de la tension produite par leurs alternateurs.
- **Eloignement des limites d'instabilité** : pour avoir une marge de phase et de gain acceptable suivant le contexte.
- **Eviter les surcharges** : Dans le cas où l'alternateur produit une tension supérieure à celle que peut supporter les charges connectées à l'alternateur.

2.2. LES CAUSES DES VARIATIONS DE TENSION :

Les variations de tension qui font qu'on fait la régulation peuvent s'expliquer par différentes causes qui peuvent être internes (c'est-à-dire dû à l'alternateur lui-même) ou externes (c'est-à-dire dû à l'environnement extérieur).

Ces causes sont essentiellement les suivantes :

- Perte de ligne électrique : dû à une variation de l'impédance des lignes de transports souvent face à des variations météorologiques.
- Les pertes de groupe : dû quant à eux à des variations de puissances actives ou réactives.
- Fluctuation de la consommation en période de forte consommation de la puissance réactive par les utilisateurs.
- À puissance active consommée constante, toute chute de tension se traduit par une variation de l'énergie réactive.

2.3. LES MOYENS DE REGLAGES DES TENSIONS :

- Batterie de condensateurs à installer sur les jeux de barres des postes THT /HT et HT/MT ou chez les clients industriels : permettent la compensation des pertes et des consommations réactives.
- Régleurs de transformateur de puissance.
- Réduction.

Le réglage de la tension se fait par zone, à chaque zone sont affectés des groupes réglant, un point pilote (représentatif de la valeur de la tension et une plage de tension de consigne

$U_{cmin} - U_{cmax}$

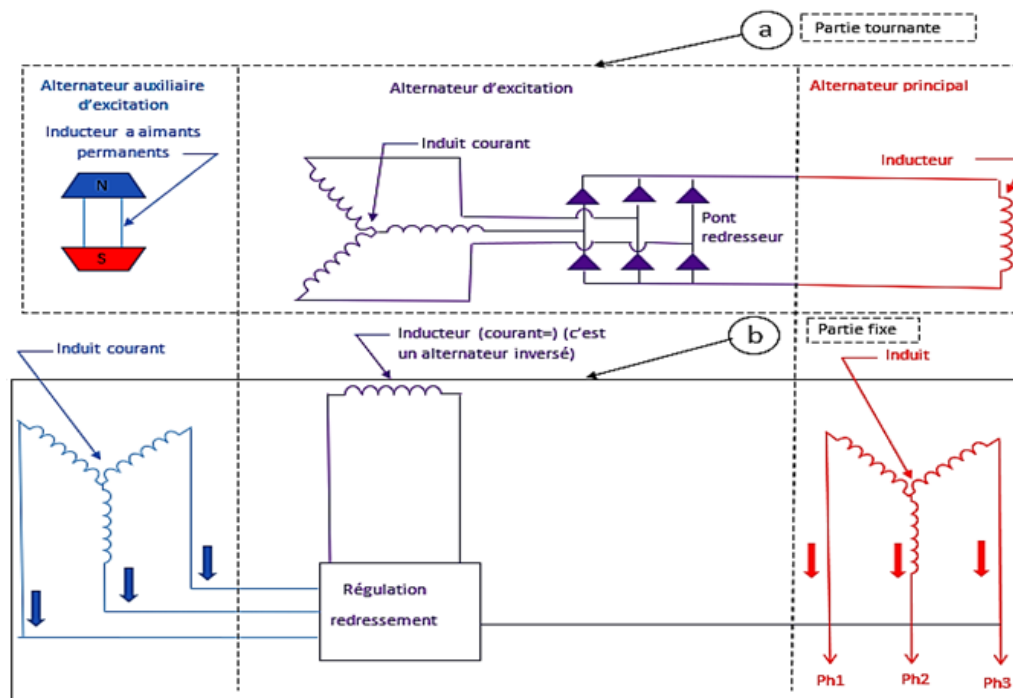


Fig19. Schéma Bloc du système d'excitation.

2.4. GENERATION DE LA CONSIGNE DE LA VALEUR DE LA TENSION :

Nous avons vu dans le 1^{er} chapitre que la f.é.m. au niveau des phases dépend de la valeur du courant d'excitation. Nous allons jouer sur cette information pour générer notre commande pour l'actionneur du régulateur qui est évidemment l'alternateur. La tension de consigne est fournie par afficheur de consigne. La mise au point du potentiomètre de consigne peut se faire à la main sur place ou moyennant la commande à moteur à partir du poste de

commande. Comme vu au chapitre 1, pour produire le courant d'excitation on peut utiliser différents types de montages. Mais quel que soit le montage ceci nécessite une régulation afin d'obtenir le courant d'excitation requis pour une commande recherchée. Par la suite nous allons modéliser cette commande par un signal échelon à partir desquels nous allons créer une boucle de régulation de la tension de sortie des alternateurs.

2.5. MESURE DES GRANDEURS RAPPORTEES AU REGULATEUR :

Comme dans chaque boucle de régulation il faut toujours mesurer les grandeurs de sorties afin de les comparer à la consigne. Ceci nécessite ainsi la présence de capteurs adaptés à chaque type de mesure. Ces capteurs doivent être capables de produire un signal analogique facilement interprétable par les différentes structures de la boucle de régulation.

- **Mesure de la tension de sortie** : Nous verrons plus en détails la fonction de transfert du capteur se chargeant de la mesure de la tension de sortie ultérieurement
- **Mesure du courant d'excitation** : Celle -ci est opérée en deux fois : en premier lieu, elle est opérée par une simulation directe du courant de champ et rapportée au régulateur de IR (inséré dans le régulateur de courant) et en second lieu par une mesure d'un champ transversal placé dans le stator de l'excitatrice principale.

3. REGULATEUR AUTOMATIQUE DE TENSION (AVR) :

Il agit sur l'excitatrice du générateur afin de maintenir la tension de sortie constante. Les composants de base d'un AVR sont : le capteur, l'amplificateur, l'excitation et le générateur. Le modèle de fonction de transfert complet d'un système AVR (sans régulateur) est représenté sur la figure ci-dessous.

3.1. AMPLIFICATEUR :

L'amplificateur compare la tension de détection avec la tension de référence et amplifie la différence (erreur) afin de fournir un signal de contrôle pour les dispositifs de puissance.

Sa fonction de transfert est donnée par : $FTA = \frac{K_a}{1+sT_a}$

3.2. EXCITATRICE :

L'excitatrice est modélisée par la fonction de transfert suivante :

$$FTE = \frac{K_e}{1+sT_e} \quad K_e \text{ étant le gain et } T_e \text{ la constante de temps}$$

3.3. GENERATEUR :

La fonction du générateur est : $FTG = \frac{K_g}{1+sT_g}$

3.4. CAPTEUR :

Le capteur peut être représenté par une fonction de transfert de premier ordre avec un gain de K_c et une constante de temps T_c : $FTC = \frac{K_c}{1+sT_c}$

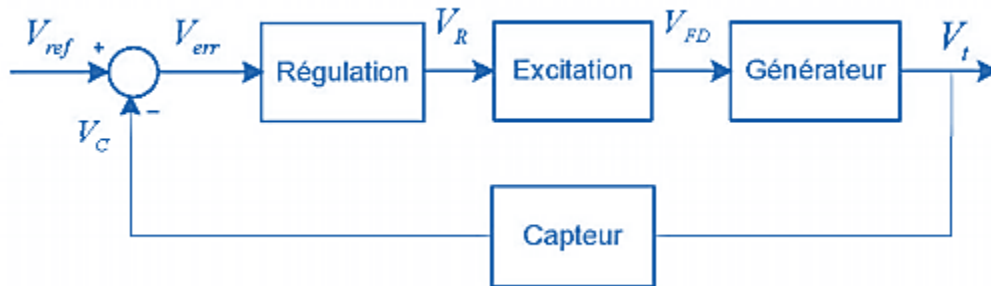


Fig20. Schéma Bloc du système d'alternateur.

4. ETUDE DE LA STABILITE DU SYSTEME :

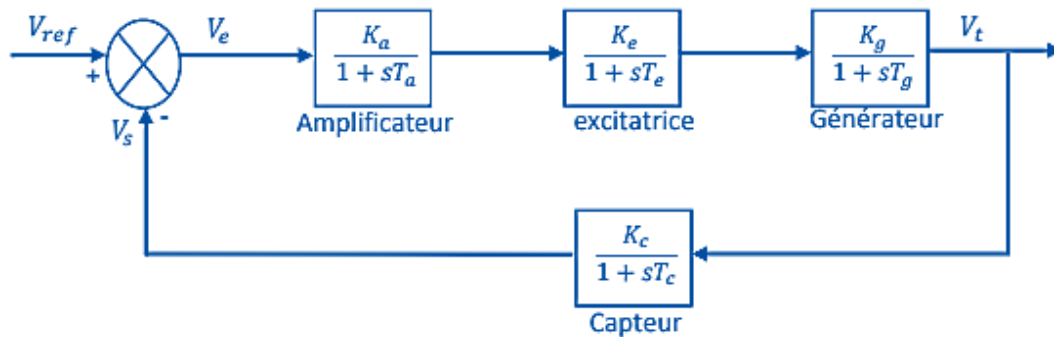


Fig21. Schéma Bloc de régulation de tension.

Eléments	Fonction de transfert	gain	Constante de temps
Amplificateur	$FTA = \frac{K_a}{1+sT_a}$	$K_a = 9$	$T_a = 0.1$
Excitatrice	$FTE = \frac{K_e}{1+sT_e}$	$K_e = 1$	$T_e = 0.5$
Générateur	$FTG = \frac{K_g}{1+sT_g}$	$K_g = 1$	$T_g = 1$
Capteur	$FTC = \frac{K_c}{1+sT_c}$	$K_c = 1$	$T_c = 0.01$

Sur MATLAB, on effectue :

```

Untitledp.m  ×  +
1 - FA=tf(9,[0.1 1]);
2 - FE=tf(1,[0.5 1]);
3 - FG=tf(1,[1 1]);
4 - FC=tf(1,[0.01 1]);
5 - FD=FA*FE*FG;
6 - F=feedback(FD,FC)
7 - pole(F)
8 - step(F)
  
```

La fonction de transfert résultante est :

$$F = \frac{0.09 s + 9}{0.0005 s^4 + 0.0565 s^3 + 0.666 s^2 + 1.61 s + 10}$$

Et les pôles sont :

$$P = \begin{aligned} &-99.9794 + 0.0000i \\ &-11.8951 + 0.0000i \\ &-0.5628 + 4.0621i \\ &-0.5628 - 4.0621i \end{aligned}$$

⇒ Le système est stable car les pôles sont à valeurs réelles négative.

5. REPONSE INDICIELLE DU SYSTEME SANS REGULATION :

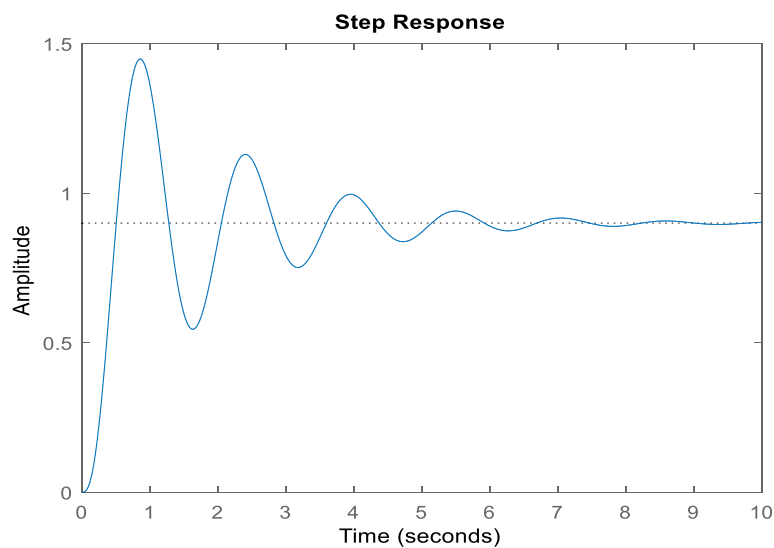
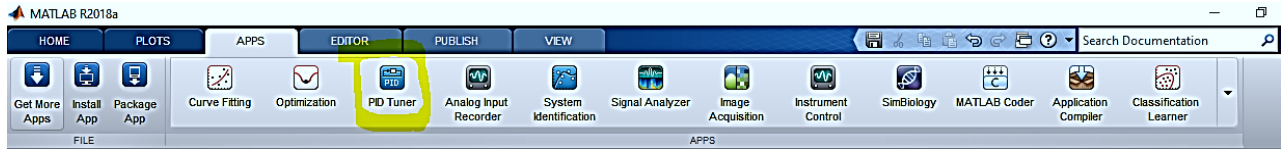


Fig22. Schéma indicielle du système sans régulation.

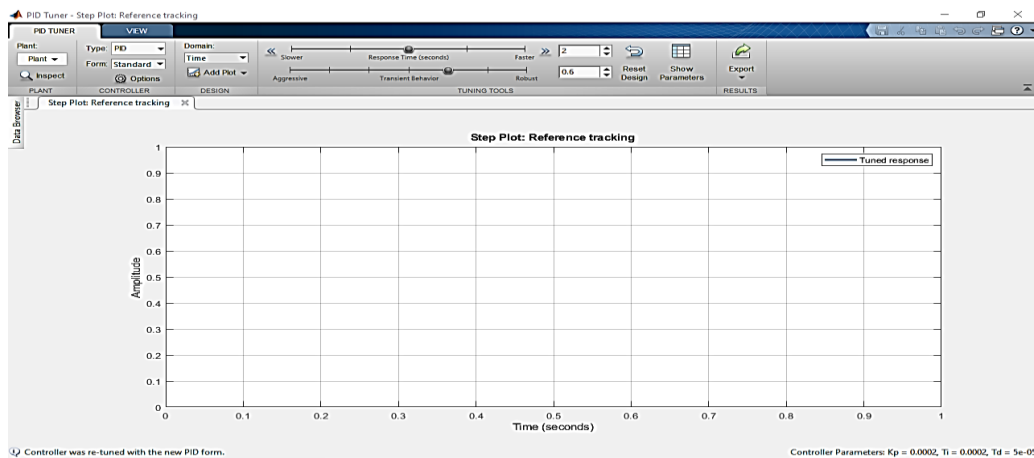
Le système présente beaucoup de dépassement et d'oscillations. De plus l'erreur statique n'est pas nulle.

6. REGULATION DE TENSION A VIDE :

Pour le choix des paramètres du correcteur, on choisit la fenêtre **APPS** et on clique sur l'option **PID Tuner** :



Une nouvelle fenêtre s'ouvre



Après avoir choisi le type de correcteur, nous avons cliqué sur l'option **PLANT**, puis dans **IMPORT** pour importer la fonction de transfert.

On peut voir les paramètres du correcteur en cliquant sur la fenêtre **SHOW PARAMETERS**.

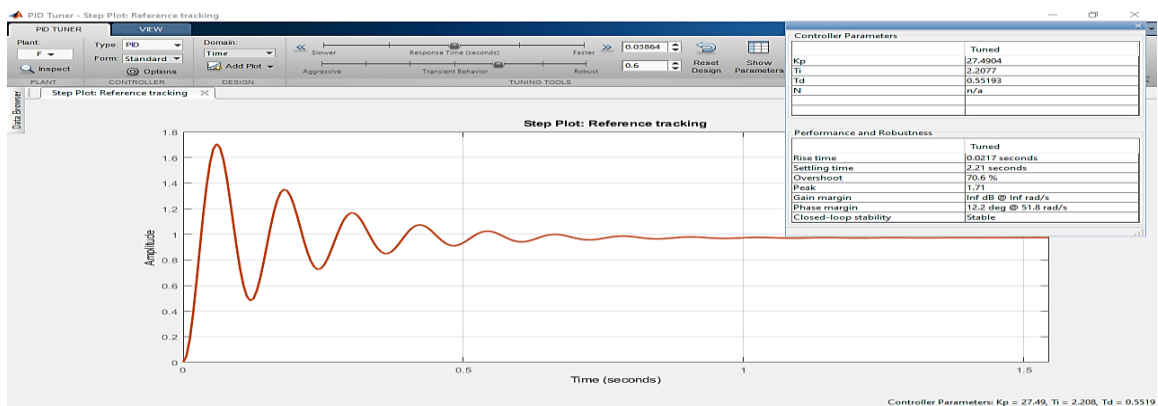


Fig23. Schéma des paramètres du correcteur.

Puis nous avons procédé à l'ajustement des paramètres du correcteur pour améliorer les performances du système.

On utilise ensuite le script suivant :

```

1      %fonction objective 1
2 -    kp1= 1;
3 -    kdl= 0.5;
4 -    kil= 2;
5 -    FT_PID1= tf(kp1*[kdl*kil kil 1], [kil, 0]);
6      %fonction objective 2
7 -    kp2= 3;
8 -    kdl= 0.5;
9 -    kil= 2;
10 -    FT_PID2= tf(kp2*[kdl*kil kil 1], [kil, 0]);
11 -    FA=tf(9,[0.1 1]);
12 -    FE=tf(1,[0.5 1]);
13 -    FG=tf(1,[1 1]);
14 -    FC=tf(1,[0.01 1]);
15 -    FD=FA*FE*FG;
16 -    F=feedback(FD,FC);
17 -    step(F)
18 -    FTBO1=FD*FT_PID1;
19 -    FTBO2=FD*FT_PID2;
20 -    FT_PIDBF1=feedback(FTBO1,FC);
21 -    FT_PIDBF2=feedback(FTBO2,FC);
22
23 -    hold on
24 -    step(FT_PIDBF1)
25 -    step(FT_PIDBF2)
26 -    grid on

```

Pour le choix des paramètres du correcteur nous avons utilisé plusieurs valeurs pour K_p , K_i , K_d .

Paramètres	Fonction objective 1	Fonction objective 2
K_p	1	3
K_i	0.5	0.5
K_d	2	2

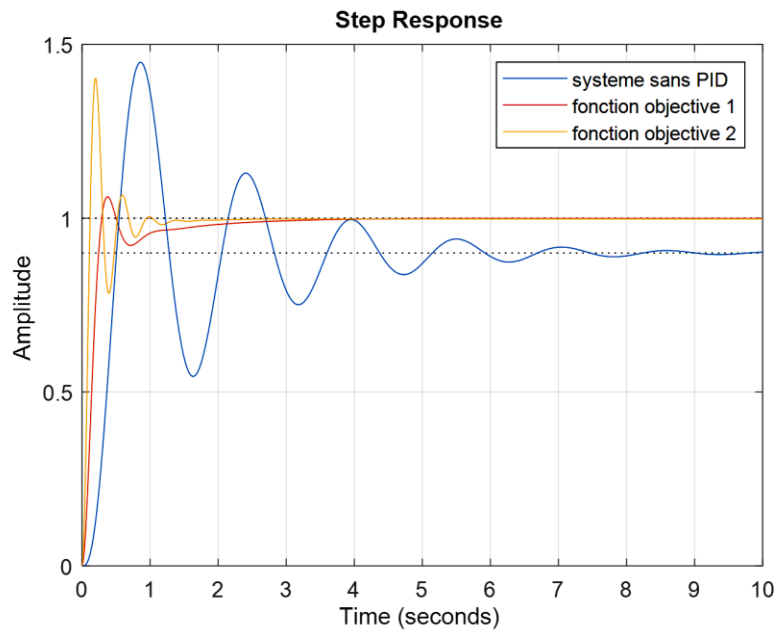


Fig24. Schéma de Réponse indicielle du système avec changement de K_p , K_i et K_d .

➤ Discussion des résultats :

D'après les graphes nous constatons que la fonction objective 1 est la meilleure. Le régulateur automatique de tension (AVR) contrôlé par le PID a permis d'augmenter considérablement les performances du système à savoir la réduction des dépassement, l'amélioration du temps de réponse. Les paramètres du régulateur choisis sont ceux permettant d'avoir la fonction objective 1.

7. REGULATION DE L'ALTERNATEUR AVEC VARIATION DE LA CHARGE :

La variation de la charge se caractérise ici par une variation du gain K_g et du temps de réponse T_g de la fonction de transfert du générateur. Nous allons donc dans cette partie faire varier la valeur de K_g et faire la régulation de la tension de l'alternateur en adoptant différentes fonctions objectives. Contrairement à la régulation précédente la fonction objective est définie par les différentes valeurs de T_g à savoir **1 ; 1.2 ; 1.6 ; 2**. Notons aussi que nous allons prendre comme paramètres du régulateur : **$K_p=1$; $k_i=2$; $k_d=0.5$** .

Pour faire varier les valeurs de k_g et T_g et afficher les valeurs des réponses, nous allons utiliser le bloc Simulink ci-dessous :

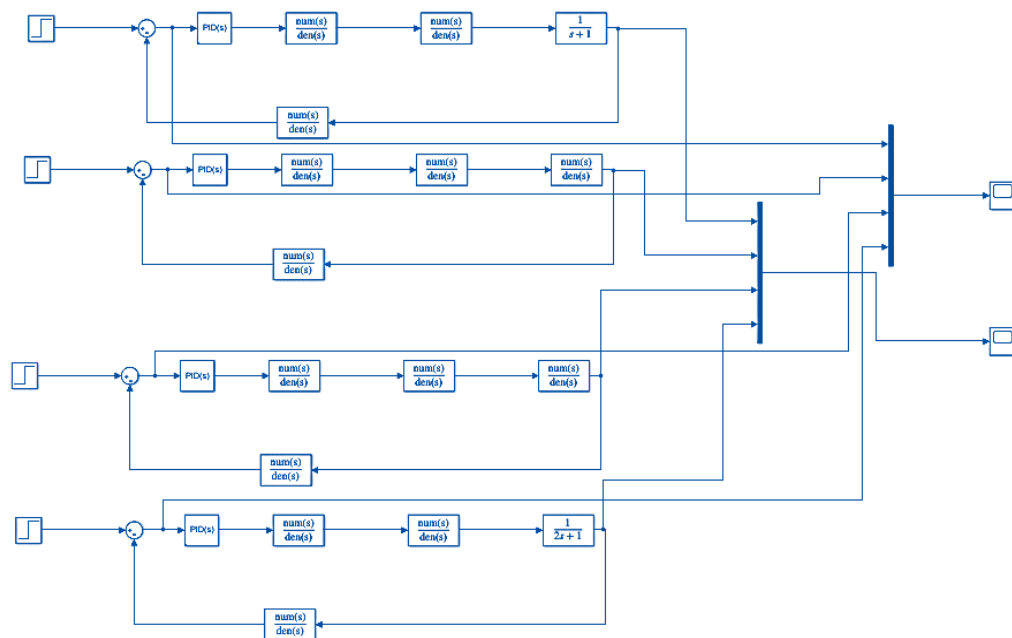


Fig25. Bloc Simulink.

➤ 1^{er} cas : $K_g = 0.7$:

Nous allons tracer dans le même graphe la réponse indicielle du système régulé avec différente valeur de T_g . Les réponses indicielles suivant les valeurs de T_g sont les suivantes :

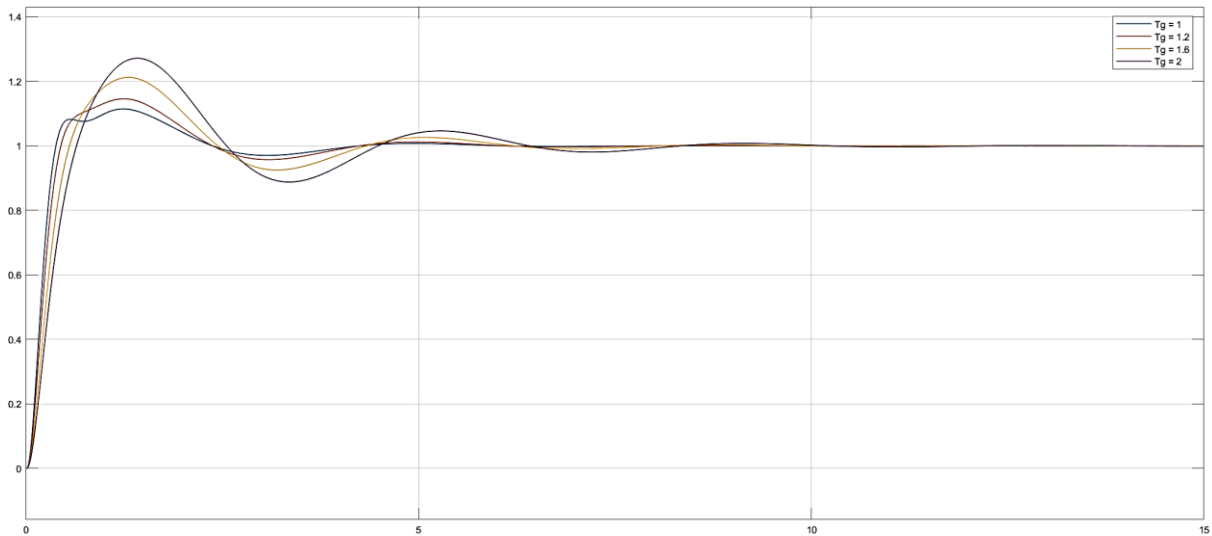


Fig26. Schéma des réponses indicielles suivant les valeurs de T_g .

Les signaux d'erreur suivants les valeurs de T_g sont les suivants :

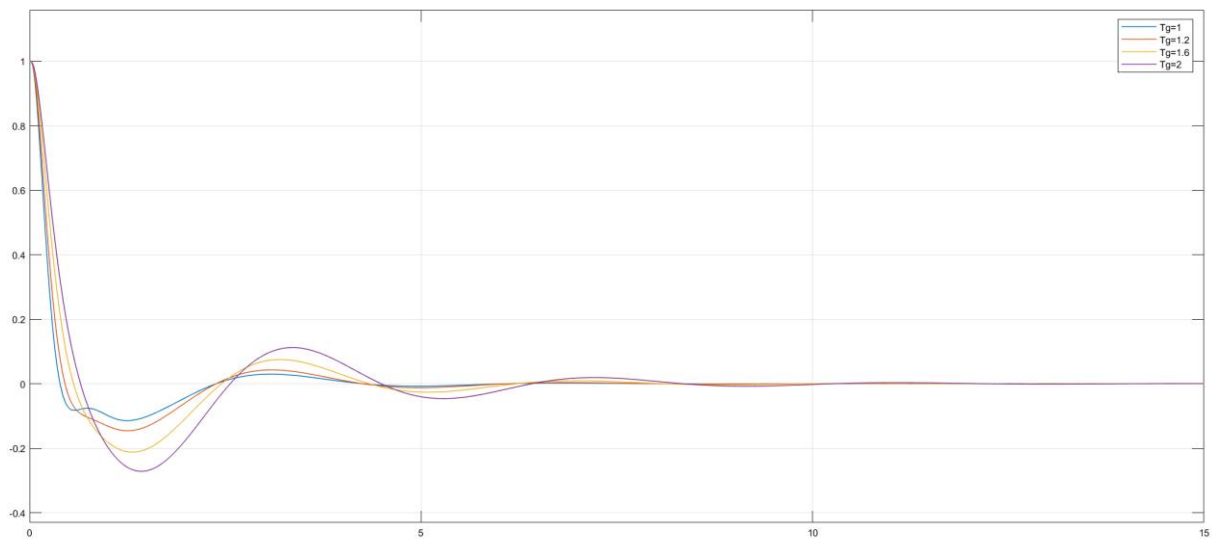


Fig27. Schéma des signaux d'erreur suivants les valeurs de T_g .

➤ 2^e cas : $K_g = 0.8$:

Nous allons tracer dans le même graphe la réponse indicielle du système régulé avec différente valeur de T_g . Les réponses indicielles suivant les valeurs de T_g sont les suivants :

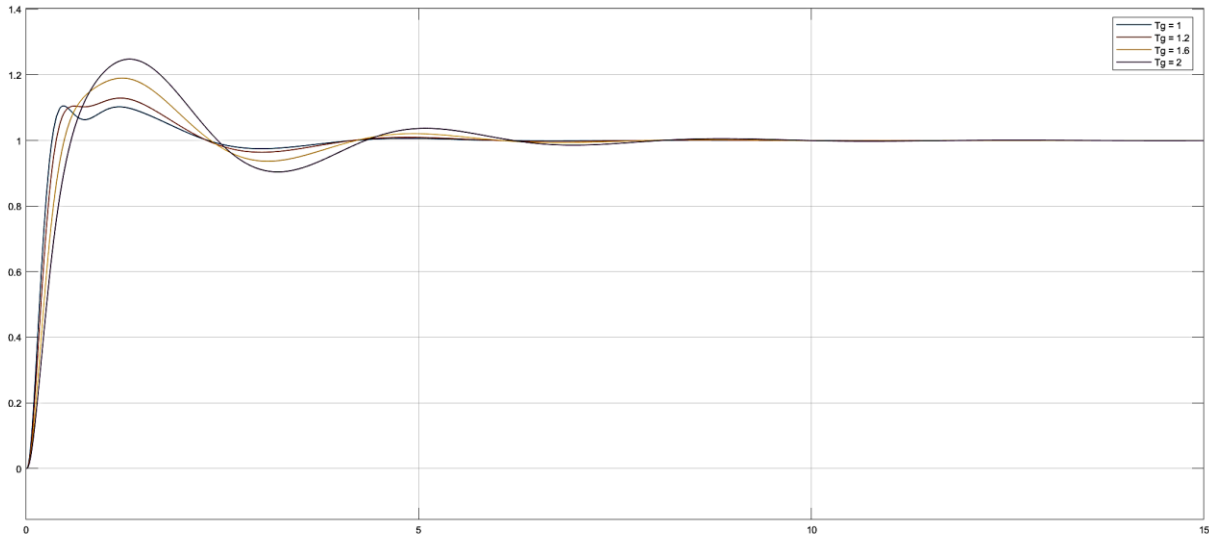


Fig28. Schéma des réponses indicielles suivant les valeurs de T_g (Cas2).

Les signaux d'erreur suivant les valeurs de T_g sont les suivants :

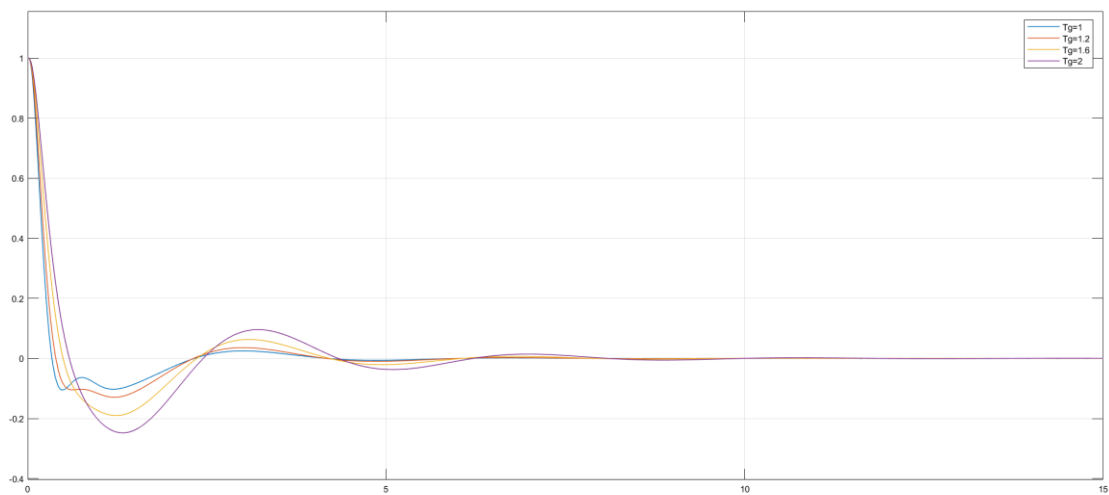


Fig29. Schéma des signaux d'erreur suivant les valeurs de T_g (Cas2).

➤ 3^e cas : $K_g = 1$:

Nous allons tracer dans le même graphe la réponse indicielle du système régulé avec différente valeur de T_g . Les réponses indicielles suivant les valeurs de T_g sont les suivants :

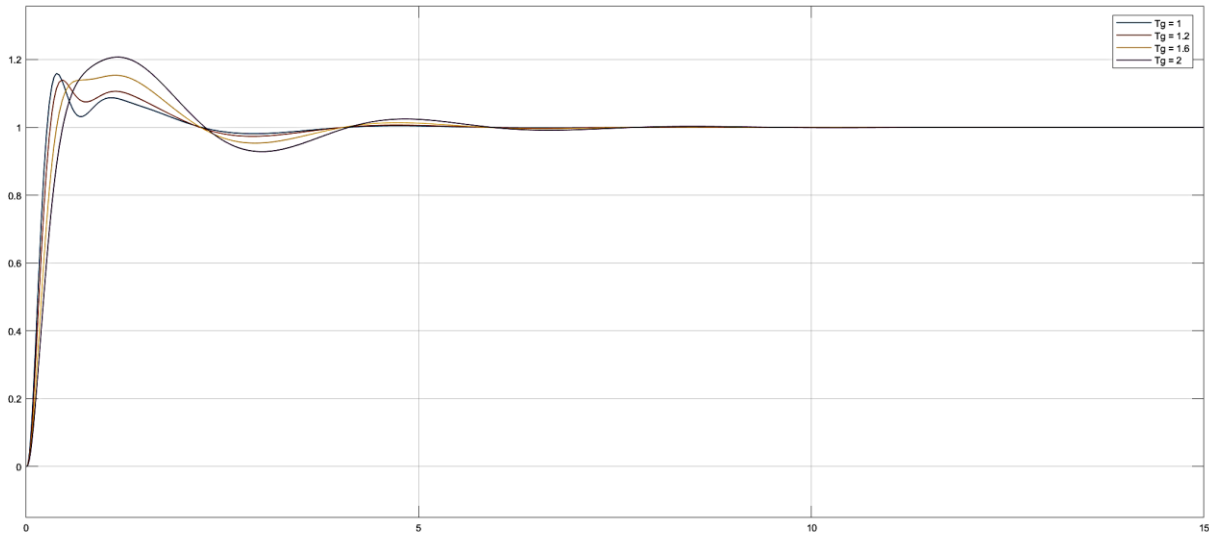


Fig30. Schéma des réponses indicielles suivant les valeurs de T_g (Cas3).

Les signaux d'erreur suivant les valeurs de T_g sont les suivants :

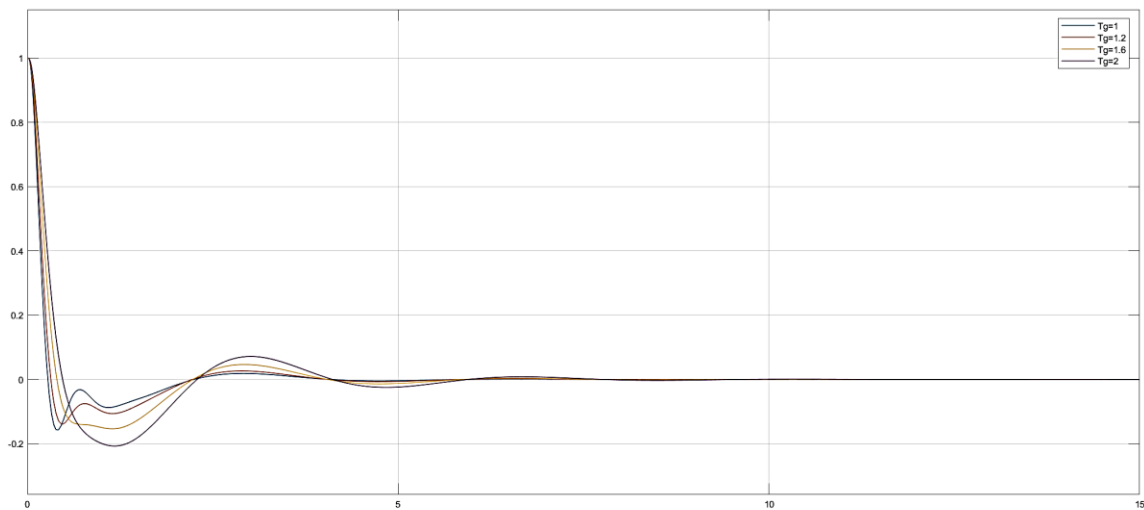


Fig31. Schéma des signaux d'erreur suivant les valeurs de T_g (Cas3).

➤ Discussion des résultats :

On remarque que lorsqu'on augmente le gain K_g de la fonction de transfert du générateur, on augmente aussi la rapidité du système et le dépassement. On n'en déduit que le choix de T_g doit être minimum pour diminuer le dépassement.

○ Conclusion du 3^{eme} chapitre :

Dans ce chapitre, nous avons utilisé un régulateur de type PID classique en vérifiant sur le courant d'excitation de l'alternateur afin d'étudier la régulation de tension de sortie d'un alternateur de puissance. Et nous l'avons appliqué en utilisant MATLAB et Simulink.

CONCLUSION GENERALE :

Lors de ce projet d'initiation que nous avons effectué, on a utilisé nos connaissances théoriques déjà acquise en régulation industrielle, afin de pouvoir réaliser cette étude.

Dans cette étude, on a présenté et détaillé les différentes fonctions de l'alternateur, avant d'avoir entamer sa modélisation, tout en présentant les fonctions Principale de la production des f.é.m. triphasées équilibrées, et les différents diagrammes de fonctionnement de l'alternateur en charge et à vide.

Et finalement, Après avoir présenté la loi de commande de type proportionnelle intégrale dérivée (PID), on a effectué une étude de stabilité du système en utilisant MATLAB.

Une étude qui nous a rassuré la stabilité du système choisi vu les valeurs négatives de la partie réelle des pôles trouvées.

Et par la suite, nous avons passé à la régulation de tension à vide dans laquelle nous avons procédé à l'ajustement des paramètres du correcteur en utilisant le PID Tuner sur MATLAB.

Et puis, nous avons refais l'étude mais en variant la charge, en effet on s'est basé sur 3 cas et on a pu conclure que lorsqu'on augmente le gain K_g de la fonction de transfert du générateur, la rapidité du système augmente également.

Et c'est d'après ces résultats que nous avons conclus que pour diminuer le dépassement, on doit effectuer un choix minimum de T_g .

Finalement, et malgré toutes les contraintes, nous avons pu grâce à ce projet, à solidifier nos connaissances et également notre esprit de recherche et d'analyse.