



REPUBLIQUE DE MADAGASCAR

Tanindrazana-Fahafahana-Fandrosoana



MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR



UNIVERSITE D'ANTSIIRANANA



ECOLE NORMALE SUPERIEURE POUR L'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE

Département : **Electricité**

Filière : **PETGE**



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE
Certificat d'Aptitude Pédagogique de l'Ecole Normale (C.A.P.E.N)

REGIME TRANSITOIRE D'UNE MICROCENTRALE HYDRAULIQUE A MACHINE SYNCHRONE

Rédigé par : VELONJARA Judicaël Eric

Soutenu le 03 décembre 2009

Messieurs :-MOUSSA, Président

-Dr RABE Tsirobaka, Encadreur

-TSIMA Aristol, Encadreur

-SAID M'zé, Examineur

PROMOTION VATO

(Volonté – Assiduité – Tolérance – Organisation)

-Décembre 2009-

**ECOLE NORMALE SUPERIEURE POUR L'ENSEIGNEMENT
TECHNIQUE ANTSIRANANA
E.N.S.E.T BP. 0 201 – ANTSIRANANA- MADAGASCAR**

Département d'ELECTRICITE
Filière : GENIE ELECTRIQUE

Année Universitaire 2009

TRAVAUX DE MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME C.A.P.E.N

**TITRE :
REGIME TRANSITOIRE D'UNE MICROCENTRALE HYDRAULIQUE A
MACHINE SYNCHRONE**

(01 ETUDIANT-PETGE5)

Introduction :

Dans une centrale hydraulique, pour une raison quelconque, la vitesse de la machine et la vitesse de l'eau peuvent être le siège d'une oscillation. Cette oscillation peut être permanente ou transitoire. Ce phénomène influe sur la F.E.M interne de la machine par le biais de la tension d'excitation et de la vitesse. En conséquence, les grandeurs statoriques présentent une oscillation de fréquence pouvant nuire au bon fonctionnement de la machine.

Travaux demandés:

1. Recherches bibliographiques ;
2. Notion générale sur une centrale hydraulique ;
3. Généralité sur la machine synchrone ;
4. Modélisation du système ;
5. Identification et détermination des grandeurs lors du phénomène transitoire ;
6. Analyse du système d'équations obtenu et la résolution numérique ;
7. Analyse des résultats ;
8. Conclusion.

Encadreurs:

M. TSIMA Aristol;
M. RABE Tsirobaka.

REMERCIEMENTS

Avant tout, je remercie **DIEU** de m'avoir donné la bonne santé, la force et le courage tout au long de l'accomplissement de ce travail.

Ensuite, je tiens à exprimer ma gratitude à Messieurs **Rabe** Tsirobaka et **Tsima** Aristol qui m'ont proposé ce sujet de mémoire et n'ont cessé de donner leurs valeureux conseils.

Ma profonde gratitude va également à Monsieur le Président de jury et Messieurs les membres de jury qui vont apporter leurs critiques et jugements à ce travail.

Je remercie également, de tout mon cœur :

- tous les enseignants de l'**ENSET**, en particulier ceux de la filière Electricité ;
- tous mes amis pour leurs encouragements ;
- mes parents, mes sœurs et mon frère qui m'ont toujours encouragé à poursuivre mes études, en particulier la famille **VOAVY** Jean Pierre qui m'a donné beaucoup de morales ;
- tous les collègues pour la bonne ambiance fraternelle et amicale au cours de mes études durant cinq ans.

A vous tous, je vous adresse mes sincères remerciements que Dieu vous garde.

VELONJARA Judicaël Eric.

LISTE DES PRINCIPAUX SYMBOLES UTILES

A : matrice	
ω_s : pulsation des courants statoriques ;	[rd/s]
p : nombre de paire de pôle ;	
ω_m : pulsation mécanique ;	[rd/s]
Ω_m : vitesse angulaire mécanique du rotor ;	[tr/mn]
ω_r : pulsation de courant rotorique ;	[rd/s]
Ω : vitesse angulaire ;	[rd/s]
n : vitesse de rotation de champ tournant ;	[tr/mn]
S : puissance apparente ;	[KVA]
Q : puissance réactive ;	[VAR]
P_{cu1} : pertes dans l'enroulement statorique ;	[W]
P_{fe} : pertes fer statorique ;	[W]
P_{ém} : puissance électromagnétique ;	[W]
P_{cu2} : perte dans l'enroulement rotorique ;	[W]
P_{méc} : puissance mécanique ;	[W]
P_{f+ v} : perte à la ventilation + perte au frottement ;	[W]
P_s : perte supplémentaire ;	[W]
P_u : puissance utile ;	[W]
P_{él} : puissance électrique ;	[W]
P : puissance active ;	[W]
Cém : couple électromagnétique ;	[N.m]
Cmec : couple mécanique ;	[N.m]
L_{σs} : inductance de fuite statorique ;	
L_s : inductance statorique ;	[H]
[L_s] : Matrice d'inductance propre de la phase statorique ;	
[L_r] : Matrice d'inductance propre de la phase rotorique ;	
[L_{rs}] : Matrice d'inductance mutuelle entre les phases statorique et les phases rotorique ;	
L_d : inductance synchrone longitudinale ;	
L_q : inductance synchrone transversale ;	
L_o : inductance homopolaire ;	
L_{ad} : inductance cyclique longitudinale ;	
L_{aq} : inductance cyclique transversale ;	
H : constante d'inertie de la machine synchrone ;	
θ : angle électrique ;	
Φσd, ΦσD, Φσf, Φσq, ΦσQ : Flux de fuites des enroulements respectivement de d, D, f, q, Q ;	
ΦσDd : Flux mutuelle exclusif entre l'amortisseur et le stator ;	
ΦσDf : Flux mutuelle exclusif entre l'amortisseur et l'excitation ;	
Φσdf : Flux mutuelle exclusif entre le stator et l'excitation ;	
Φσad, Φσaq : Flux principale couplé avec les trois et les deux enroulements respectivement suivant l'axe d et l'axe q ;	
L_r : inductance rotorique ;	[H]
L_h : inductance du circuit magnétique ;	[H]
η : rendement ;	
V_s : tension statorique ;	[V]
Ψ_s : flux statorique ;	[wb]
Ψ_r : flux rotorique ;	[wb]
R_s : résistance statorique ;	[Ω]
R_r : résistance rotorique ;	[Ω]
J : moment d'inertie de la masse tournante de la machine ;	[Kg.m ²]
f : fréquence du réseau ;	[Hz]

I_s : courant dans l'enroulement statorique ;	[A]
I_r : courant dans l'enroulement rotorique ;	[A]
Z_{ch} : impédance de la charge ;	
Ψ_m : flux mutuel dans le moteur ;	[Wb]
Ψ_s : flux statorique ;	[wb]
Ψ_r : flux rotorique ;	[wb]
R_s : résistance statorique ;	[Ω]
R_r : résistance rotorique ;	[Ω]
J : moment d'inertie de la masse tournante de la machine ;	[Kg.m ²]
f_s : fréquence du courant statorique ;	[Hz]
f : fréquence du réseau ;	[Hz]
I_s : courant dans l'enroulement statorique ;	[A]
I_r : courant dans l'enroulement rotorique ;	[A]
J_t : moment d'inertie lié aux masses du côté de la turbine ;	
J_m : moment d'inertie lié aux masses du côté de la machine ;	[Kg.m ²]
J_t : moment d'inertie lié aux masses du côté de la turbine ;	[Kg.m ²]
D_m : Coefficient de frottement côté machine électrique ;	
D_t : Coefficient de frottement côté turbine ;	
u : vitesse d'entraînement de la turbine ;	
V : vitesse de l'eau au contact du jet avec l'auget ;	
g : accélération de la pesanteur ;	[N]
m : rapport des vitesses relatives de l'eau au contact du jet avec l'auget et à la sortie à l'extrémité de l'auget ;	
β : angle entre les vecteurs de vitesse de l'eau d'entrée et de sortie au contact de l'auget ;	
P_t : Puissance de la turbine ;	[W]
Q_t : débit volumique de la turbine ;	[m ³ /s]
ρ : Masse volumique de l'eau ;	[kg/m ³]
Ω_t : vitesse angulaire de la turbine en ;	[rd/s]
D_t : diamètre de la turbine ;	[m]

INTRODUCTION

Etant donné que Madagascar est un pays en voie de développement dans tous les domaines et aspire à sortir rapidement du sous-développement et de la pauvreté, la possession et la maîtrise de l'électricité peu coûteuse s'avèrent indispensables. Les conditions de réalisation de cette électricité à bon marché sont possibles dans la création de microcentrale hydraulique dont les sources sont trouvables un peu partout à Madagascar comme les chutes d'eau, les cascades et les fleuves etc. Le modèle le plus simple pour la production de l'énergie électrique et le plus avantageux est la transformation de l'énergie hydraulique en énergie électrique. L'objectif du sujet est l'étude du phénomène de transition apparaissant lors du court-circuit brusque d'une machine synchrone constituée d'un stator dans lequel est logé l'enroulement d'induit et un rotor qui peut être de deux types selon la classification de la machine, comportant les enroulements d'excitations et amortisseurs.

Lors du fonctionnement de la machine, il peut y avoir plusieurs défauts qui entraînent des perturbations à ses différents paramètres caractéristiques et aussi aux circuits liés à cette machine. Dans ce travail, on va voir le court-circuit brusque d'une machine synchrone fonctionnant en générateur avec enroulements amortisseurs.

L'étude est basée aux comportements électriques de la machine dans le cadre du phénomène transitoire. Nous allons développer dans ce domaine en quatre grands chapitres tels que dans le premier, notion générale sur une centrale hydraulique ; dans le deuxième, la généralité sur la machine synchrone ; après, dans le troisième chapitre, la modélisation du système et l'indication des différentes grandeurs lors du phénomène transitoire ; et finalement, dans le dernier l'implication pédagogique.

Chapitre I :

Notion générale sur une centrale hydraulique

I-1 Historique

Les premières machines transformant l'énergie hydraulique en énergie mécanique étaient les roues à axe horizontale actionnée par sa partie inférieure fut décrite par le Romain Vitruve au premier siècle avant notre ère. Une augmentation de la puissance fut obtenue au II^e siècle en alimentant les roues dans leur partie supérieure ; des puissances de 50ch furent obtenues au Moyen âge. Les lois de hydraulique étaient mal connues jusqu'au XVIII^e siècle. Les savants Daniel Bernoulli (1700-1782) et Leonhard Euler (1707-1783) posèrent les turbomachines. Les moulins à eau étaient très utilisés à la fin du XVIII^e siècle.

Il fallut attendre le XIX^e siècle pour voir apparaître en 1827 la première turbine hydraulique, réalisée par Benoit Fournegron (1802-1867), et installée à pont sur Oregon en Haute-Saône.

Cette turbine développait une puissance de 6ch et avait un rendement de 80%. Les années suivantes virent apparaître de nombreux autres types qui prirent le nom de leur inventeur : Jouval, Fontaine, James Bicheno Francis (1815-1892), Lester Allen Pelton (1829-1908) et un peu plus tard Viktor Kaplan (1876-1934).

Il faut rappeler que la puissance des turbines a beaucoup augmenté avec l'apparition de l'électricité qui a permis de transporter l'énergie ; auparavant, l'énergie mécanique devait être consommée sur place.

Le premier site hydroélectrique fut construit en 1880 à Northnberland. La renaissance de l'énergie hydraulique accompagna l'invention du générateur électrique, amélioration de la turbine hydraulique, ainsi que l'augmentation de la demande en électricité à l'aube du XX^e siècle.

Définition

Une centrale hydraulique est une installation de production d'énergie grâce à une chute d'eau entre deux niveaux de hauteurs différentes, qui met en mouvement une turbine reliée à un alternateur.

Elle est composée essentiellement de trois parties :

- Un barrage qui retient l'eau,
- La centrale qui produit l'électricité,
- Les lignes électriques qui évacuent et transportent l'énergie électrique.

I-2 Eléments d'une microcentrale hydraulique

✓ Retenue d'eau :

C'est le barrage qui retient l'écoulement naturel de l'eau .De grandes quantités d'eau s'accumulent la réserve d'eau.

✓ Conduite forcée de l'eau :

Une fois l'eau stockée, des vannes sont ouvertes pour que l'eau s'engouffre dans de longs tuyaux métalliques appelés conduites forcées. Ces tuyaux conduisent l'eau jusqu'à la centrale hydraulique.

✓ Production :

A la sortie de la conduite, dans la centrale, la force de l'eau fait tourner une turbine qui fait à son tour fonctionner un alternateur .Grâce à l'énergie fournie par la turbine, l'alternateur produit un courant électrique alternatif. La puissance de la centrale dépend de la hauteur de la chute et du débit de l'eau .Plus ils seront importants, plus cette puissance sera élevée.

✓ Adaptation de la tension :

Un transformateur élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à très hautes tension,

✓ La passe à poisson :

Il s'agit d'un dispositif contourné d'un aménagement permettant aux poissons migrateur de remonter ou descend le cours d'eau, malgré la présence d'un aménagement hydraulique.

✓ Le dessableur :

L'eau dévié dans le canal dans sa prise peut transporter des quantités importantes de matière en suspension (boue) et des sédiments (sable, gravillon) qui doivent être éliminés sans quoi ils combleront le canal et endommageront rapidement les vannes de la turbine. Le dessableur est un bassin plus large que le canal qui permet de ralentir l'écoulement et ainsi laisser les particules solides déposés. En général, une grille fine est

disposée enfin de dessabler, pour filtrer les dernières particules ; elle doit être nettoyée régulièrement. Une vanne doit être prévue en conséquence.

I-3 Microcentrale

Une microcentrale hydraulique est une installation de production d'énergie basée sur l'utilisation de la force hydraulique et dont la puissance est inférieure à 300 kW.

L'énergie hydraulique peut provenir :

- d'un fleuve ou d'une rivière ;
- d'une source ;
- d'un réseau d'approvisionnement en eau potable ;
- d'un réseau d'évacuation d'eaux usées ou de drainages ;
- de procédés industriels dans lesquels la pression d'un liquide est détruite dans un organe réglage, vanne ou autre.

Les débits des microcentrales peuvent représenter quelques litres ou plusieurs mètres cubes à la seconde.

A partir de deux mètres, une chute avec un débit suffisant est considérée comme exploitable.

Par ailleurs, des hauteurs de 500 mètres (pression 50bars) ou plus peuvent produire une quantité intéressante d'énergie, même si le débit est faible (5 l/sec).

I-3-1 Classification des microcentrales et de leurs composants

La classification s'effectue en fonction de la manière dont l'eau est captée et conduite à la turbine de l'emplacement de cette dernière et de la hauteur de chute ou dénivellation exploitée. On distingue deux classes principales de petites centrales :

- **Installations à basse pression**

Le long d'un cours d'eau ou sur un canal de dérivation.

L'ouvrage le plus important est le barrage, ou prise d'eau, le plus souvent construit en béton. Sa fonction est de détourner le débit nécessaire directement vers la turbine ou dans un canal de dérivation tout en laissant passer les crues. La centrale est, soit intégrée directement dans le barrage, soit placée à l'extrémité d'un canal. Il n'y a en règle générale pas de conduite forcée, ou celle-ci reste très courte. Les chutes se situent entre 2 et 20 mètres et la pression dans la turbine est faible (0,2 à 2 bars).

- **Installations à moyenne et haute pression**

Sur des cours d'eau, des sources de montagne, des réseaux d'eau potable et dans des circuits hydrauliques industriels. Aux composants mentionnés pour la première catégorie s'ajoute une conduite forcée entre la prise d'eau, ou l'extrémité du canal de dérivation et la centrale. La conduite est l'ouvrage le plus important de ce type de microcentrale.

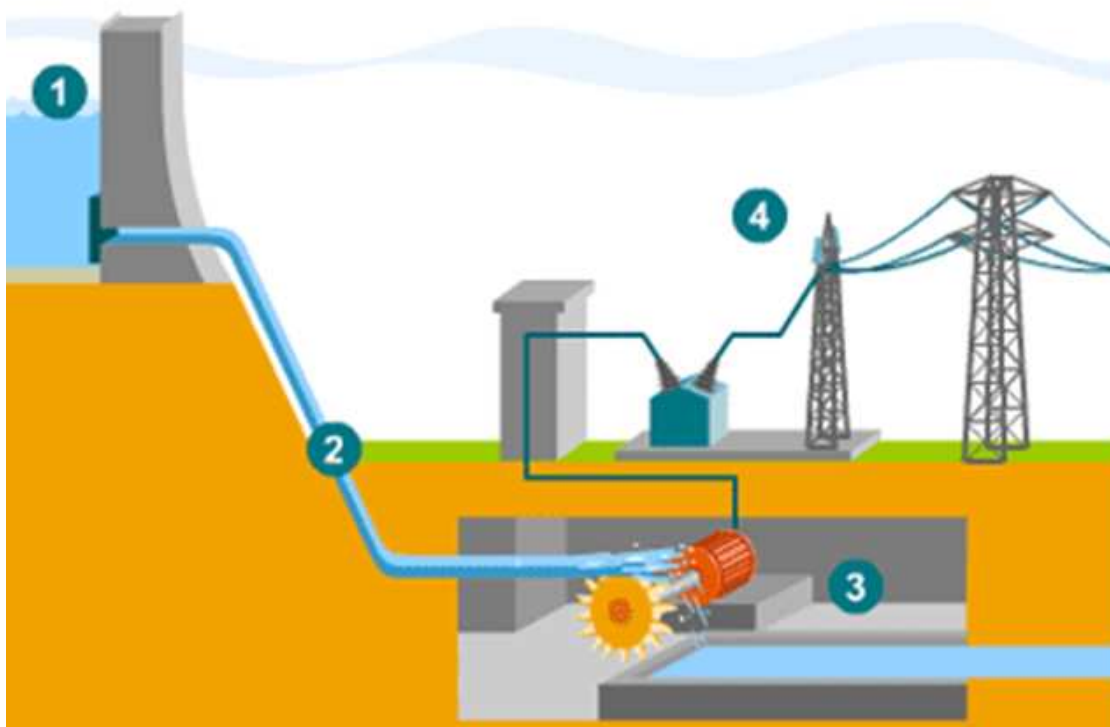


Figure. 1- 1 : Vue d'ensemble d'une microcentrale hydraulique

- 1 - La retenue d'eau ;
- 2- La Conduite forcée de l'eau ;
- 3- La protection d'électricité ;
- 4- L'adaptation de la tension.

I-3-2-1 Notions concernant l'utilisation de la force hydraulique

L'énergie de l'eau qui descend une vallée est normalement détruite dans les chutes et les rapides.

Elle peut être transformée en électricité par des turbines et des générateurs.

Trois paramètres importants doivent être considérés lorsque l'on parle d'énergie hydraulique : **La chute, le débit et la puissance**. La chute brute est la différence d'altitude entre le niveau à la prise d'eau et le niveau à l'aval de la centrale, où l'eau est restituée à la rivière.

Elle est habituellement indiquée en mètres avec la lettre H. Pour comparer avec la pression

Un bar correspond à environ 10 mètres de hauteur d'eau.

La puissance hydraulique théorique du site, en kW, elle se calcule à partir du produit du débit d'eau turbiné par la chute brute de l'installation. Une partie de l'énergie se perd dans l'installation par frottement de l'eau dans les grilles, vannes, coudes et parois du canal et de la conduite forcée. Ces pertes sont appelées pertes de charge.

Pour les petites centrales, les pertes de charge représentent 10 à 15% de la hauteur d'eau, ou chute brute ces pertes réduisent la chute brute. En les déduisant de celle-ci, on obtient la **chute nette, effectivement à disposition de la turbine** et qui peut être décrite comme la différence de pression entre l'entrée et la sortie de cette dernière (différence entre les pressions p_1 et p_2 en bar lues sur les manomètres placés juste avant et après la turbine). La chute nette permet de calculer, avec le débit, la puissance hydraulique qui entre dans la

turbine et qui sera transformée par celle-ci. Pour obtenir la puissance effectivement à disposition de l'utilisateur, il est nécessaire de considérer le rendement de l'installation, qui tient compte des diverses pertes qui se produisent dans la turbine et le générateur. Le rendement est obtenu en divisant l'énergie qui sort du générateur par celle qui entre dans la turbine. Les groupes turbogénérateurs des microcentrales ont, en règle générale, un rendement global d'environ 70%.

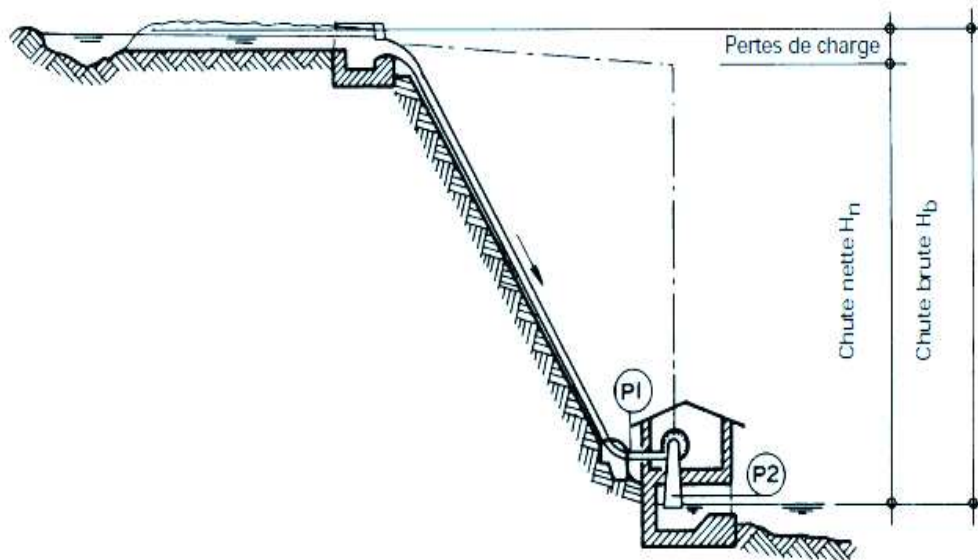


Figure. 1 -2 : Hauteur de chute brute et nette d'une microcentrale à conduite forcée.

I-3-2-2 Puissance d'une chute d'eau

La définition de l'énergie potentielle est :

$$W = Mgh \quad (1-1)$$

W Énergie potentielle en joule(J) ;

M Masse de l'eau en kg ;

g:Accelération de pesanteur (9,81N) ;

Hauteur de la chute d'eau en mètre.

La hauteur de la chute est la hauteur verticale moins les pertes dans la canalisation entre la prise d'eau et l'endroit où est située la turbine à l'arbre de la machine.

Pour réduire au maximum toute perte dans les canalisations, celles-ci doivent être de diamètre convenable en fonction du débit désiré. La définition de la puissance est :

$$P = W/t \quad (1-2)$$

P Puissance utile de la chute d'eau en watt ;

t: Temps en seconde ;

On peut alors calculer la puissance d'une chute d'eau en fonction de sa hauteur et de son débit :

$$P = Mgh/t \quad (1-3)$$

En écrivant $M = V \cdot \rho$ on aura donc $P = V \cdot \rho \cdot gh/t$

ρ : Masse volumique de l'eau en $[kg/m^3]$

D'où

Q : Débit de la chute d'eau en $[m^3/s]$

L'idéal est d'avoir un grand débit sur une grande hauteur de chute. Malheureusement, les 2 conditions sont rarement réunies, comme la masse volumique de l'eau égale à 1 et que $1m^3$ d'eau correspond 1000kg, on obtient alors une expression

$$P = Qgh = 9,81 Qh[kw]$$

Comme dans tout système de transformation d'énergie, il y a des pertes (hydraulique, mécanique, électrique). Ces pertes sont évaluées à environ 20%, ce qui fait que la formule de la puissance effectivement obtenue est de : $P \approx 8 Qh$.

La puissance d'un central hydroélectrique dépend du débit et de la hauteur de la chute [cf.11].

I-3-3 Turbines

• Définition

Une turbine hydraulique est une machine qui transforme l'énergie des fluides qui la traverse en une énergie mécanique, et enfin en énergie électrique au moyen d'une machine électrique (alternateur).

• Principes d'une microcentrale hydraulique

Au niveau de la conception de l'installation, on remarque bien que la turbine est un élément nécessaire et indispensable pour produire l'énergie électrique si bien qu'elle demande un bon choix pour assurer le meilleur fonctionnement de la centrale.

I-3-4 Différents types des turbines hydrauliques [cf.9]

Il existe quatre principaux types de turbine.

- La turbine Pelton ;
- La turbine Francis ;
- La turbine Kaplan ;
- La turbine Banki (Crossflow)

Voici les figures qui représentent les différents types de turbine et leur domaine d'application :

- Les turbines Pelton

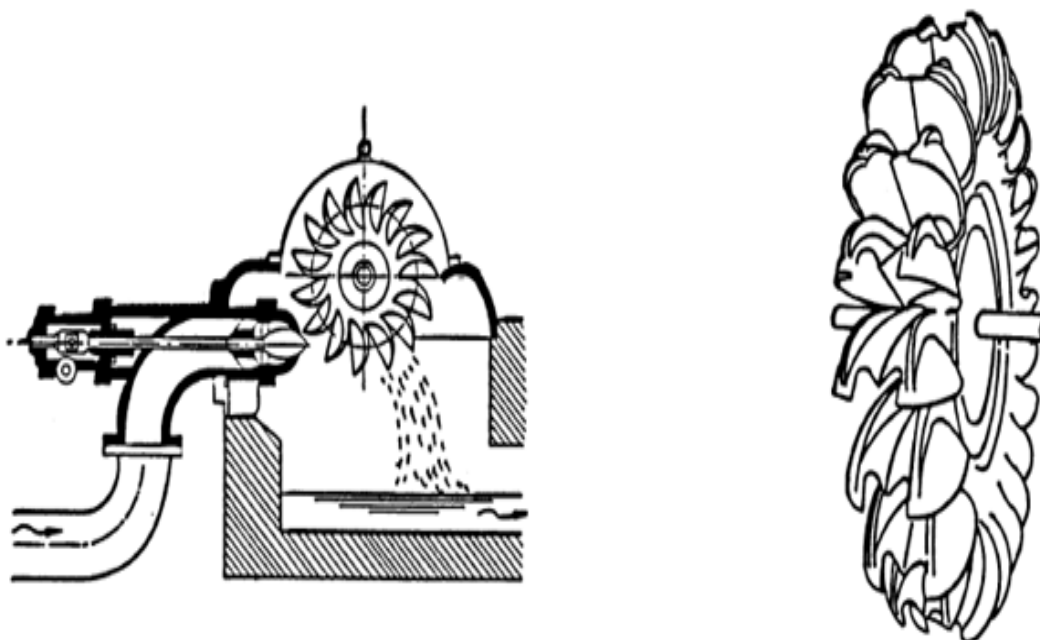


Figure.2-1 : Turbine Pelton

Cette turbine hydraulique dite turbine à action avait été inventée autour de l'année 1880 par l'américain **Lister Pelton**. Il s'agit d'un type à jet libre. Les aubes formes de gobelets se trouvent à la roue mobile, chacune est subdivisée en deux. Le débit qui passe par la turbine est contrôlé par un ou plusieurs jugulaires à débit d'un réglage précis. L'eau sortant des buses étant tangentiellement admise aux aubes subdivisée de la roue mobile, son rendement est peu sensible à la variation du débit. L'usine de haute chute est généralement équipée de turbines Pelton. Les petites turbines Pelton peuvent atteindre un rendement mécanique à l'accouplement de 90%.

Caractéristiques :

Hauteur de chute 200 à 2000m, débit 4 à 15m³/s.

- Turbine Banki (Crossflow)

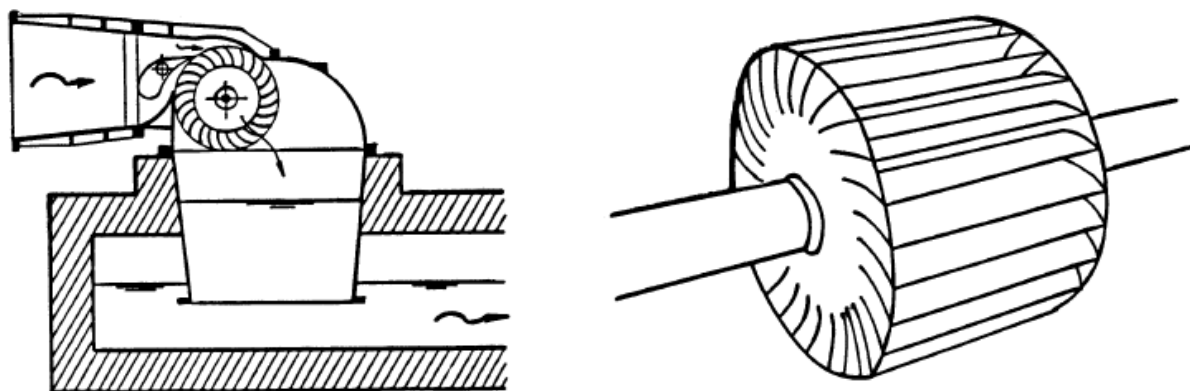


Figure.2-2 : Turbine Banki (Crossflow)

Imaginée par l'ingénieur Australien **Mitchell** en 1903, elle fut indépendamment de cette invention, réinventée en Allemagne par le professeur Anglois **Donat Banki**. Cette roue est aussi connue de nom **Crossflow** et a un avantage. Cette instruction est simple et la construction est peut être envisagée au stade artisanale et même petite puissance par un bon bricoleur. Dans cette roue il n'existe pas de surface gauche, les aubes sont des positions de surface cylindrique, on peut les découper dans les tubes en acier, béton, plastique. La construction est constituée de 3 parties :

- Un injecteur de section rectangulaire dont le débit est réglé à l'aide d'une aube profilée prothétique. Afin d'assurer un arrêt de la turbine sans énergie d'appoint, la fermeture est souvent réalisée à l'aide d'un contre poids et l'ouverture par un vérin hydraulique,
- Une roue en forme de tambour dotée d'aube cylindrique profilé,
- Un bâti enveloppant la roue sur le quel sont fixés les pales de la turbine. La turbine Banki convient de débit 20 à 1000 l/seconde et des chutes de 1 à 200m :

Elle est aussi appelée Turbine à flow tournant par sa particularité que l'eau traverse 2 fois à l'aller.

- Turbine Francis

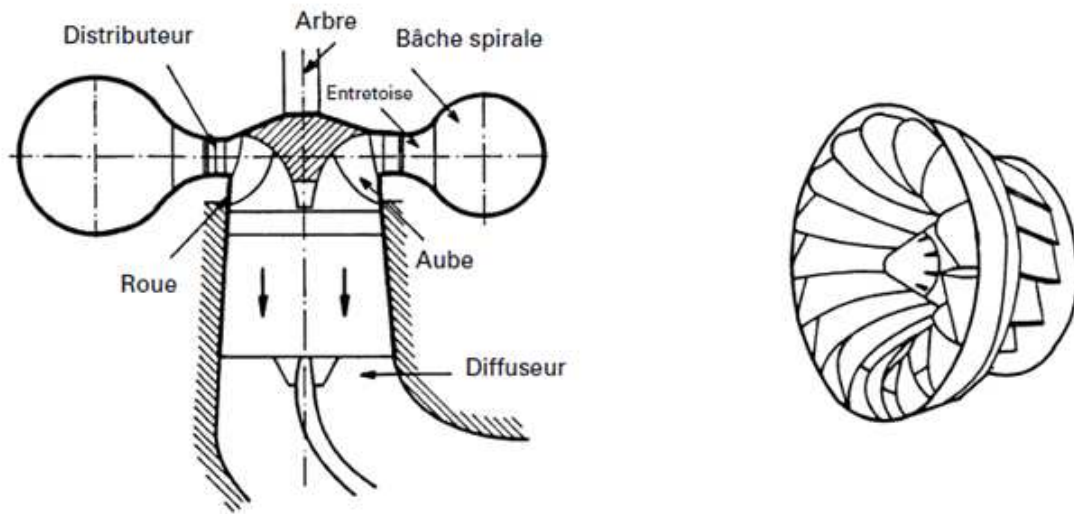


Figure.2-3 : Turbine Francis

Les usines de moyenne chute sont équipées de turbine Francis ou turbine à action qui permettent l'utilisation de l'eau à moyenne pression. Elle tient son nom de **James Bicheno Francis** ingénieur Américain qui l'a inventé en 1868. L'eau est dirigée contre les pales de turbine ailettes de guidage puis rabattre vers le centre et elle exploite aussi bien la vitesse de l'eau (Energie cinétique) qu'une différence de pression. Les vitesses de rotation étant très lentes et leur adaptabilité aux variations de vitesse de débit étant mauvaises. Elles ont été remplacées par les petites Kaplan arrivées sur le marché dans les années 1930, 1940. Actuellement le domaine d'utilisation de Francis est idéalement situé entre 20 à 100m, pour des chutes supérieures à 60m, elles sont préférées aux Pelton lorsque le débit est important. Le rendement de petite Francis issu de développements de laboratoire est de l'ordre 92%

Caractéristiques :

Débit 4 à 55m³/s, Hauteur 10 à 700m

- Turbine Kaplan

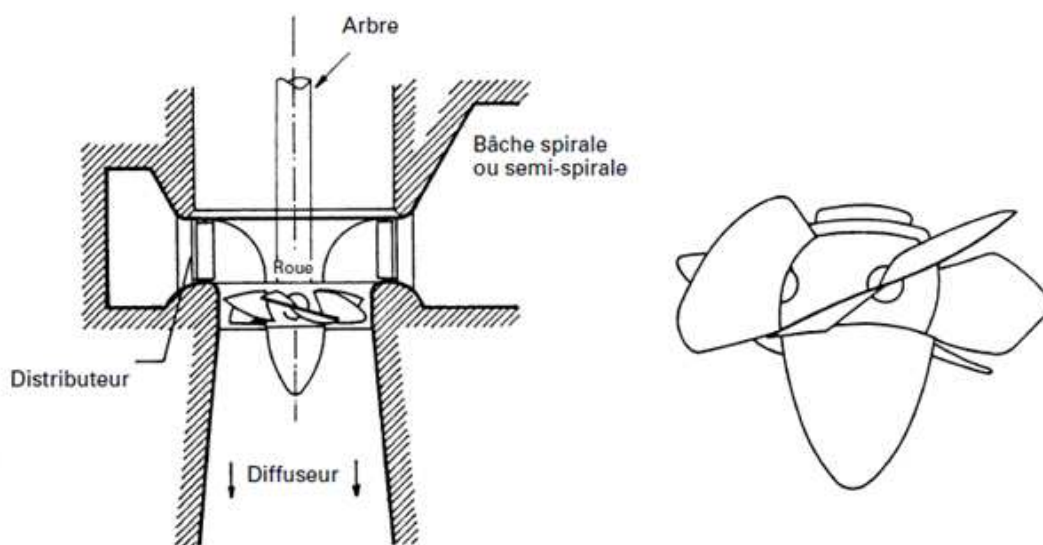


Figure.2-4 : Turbine Kaplan

La turbine à élise ou Kaplan est un turbine à hélice de type à propulsion. Elle a été inventée en 1912 par l'ingénieur Autrichien **Victor Kaplan** pour remédier aux rendements médiocre de la turbine **Francis** dans le cas faible charge. Ce turbine se différencie des autres turbines à hélice par ces pâles dont on peut faire varier l'angle en opération cela lui permet d'avoir un rendement élevé pour plusieurs conditions de débit d'eau.

En 1926, une société suédoise résolve le problème en créant un servo-direction à commande hydraulique pour la rotation des aubes de rotor. Les Kaplan sont adaptés pour les faibles chutes (0 à 30m) et les grands débits (4 à 350 m³/s) avec une vitesse de rotation allant de (50 à 250 tr/mn).

Les turbines axiales regroupent les Kaplan, les bulbes et les hélices. Des multiples possibilités d'installations existent en fonction de l'aménagement. Ces machines sont peu sensibles aux variations du débit. Son rendement varie normalement entre 90 et 95%. En petit hydraulique, il est de l'ordre de 92%.

I-4 Sélection d'un ou plusieurs types des turbines

La sélection d'un type de turbine va être en fonction non seulement de la chute nette et du débit, mais aussi des données spécifiques (voir le schéma ci-dessous) au site sur lequel la machine sera installée.

Pour réaliser la centrale hydraulique il faut vérifier le choix de la turbine.

Chute brute et chute nette en fonction du débit

Dans quelle mesure la chute va-t-elle varier :

- en fonction du débit (pertes de charge) ;
- en fonction des conditions hydrologiques extrêmes (par exemple élévation du niveau aval en cas de crue) ;
- en fonction du concept de l'aménagement (hauteur de chute variable dans un réservoir d'accumulation par exemple). Il est donc utile d'établir le plus exactement possible les conditions d'exploitation, en gardant en mémoire qu'une turbine à réaction, de type Francis ou Kaplan, s'adapte mieux à des fortes variations de chute relative qu'une turbine à action, Pelton ou Crossflow. Les abaques, figures 3-1 (turbines) permettent de présélectionner un type de turbine en fonction de chute et du débit.

Voici le diagramme qui représente la vérification de choix de la turbine.

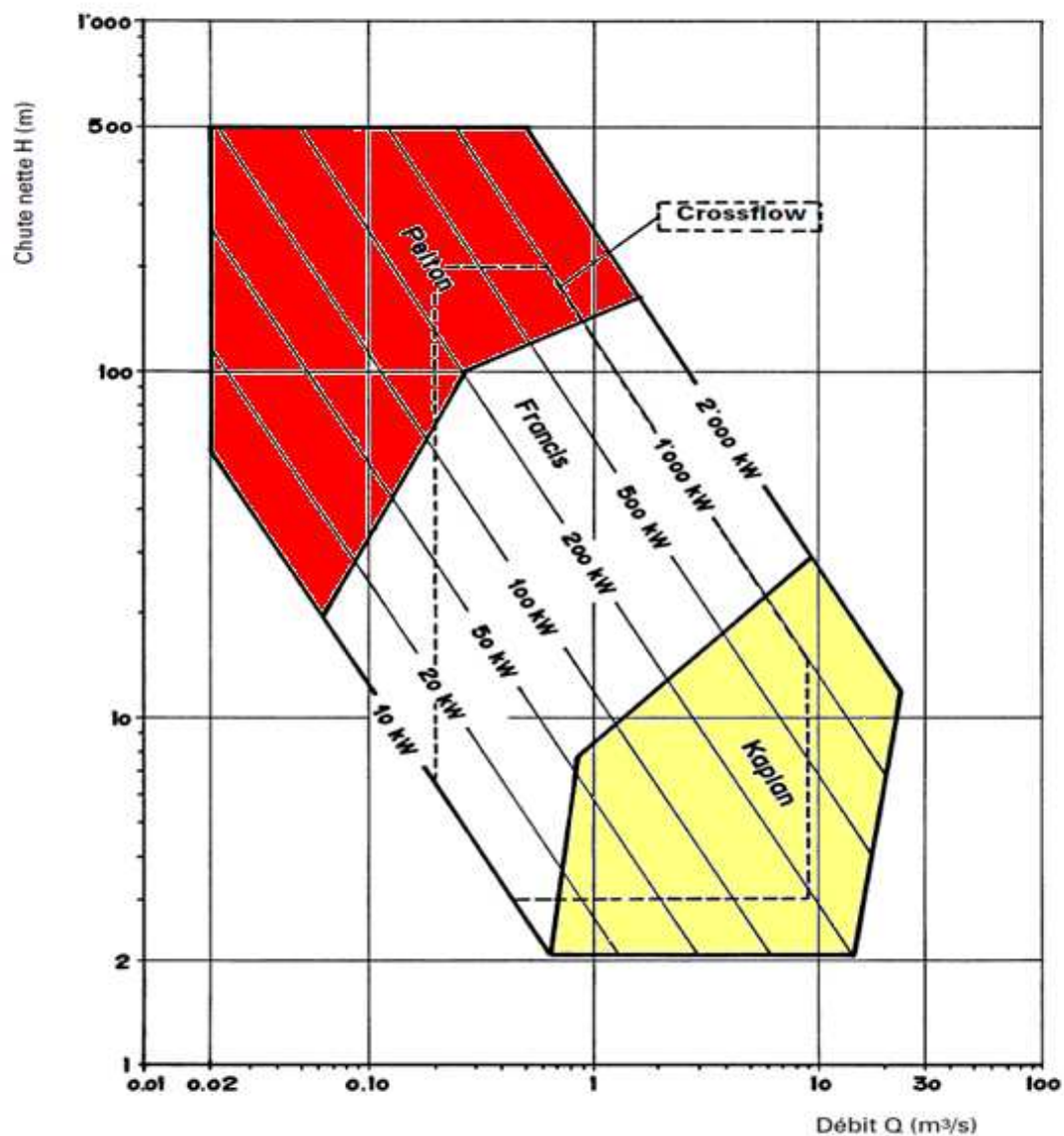


Figure.3-1 : Domaine d'utilisation des différents types de turbines (chutes nettes, débits, puissances) [Cf.8].

Chapitre II :

Généralité sur la machine synchrone

II- 1 Généralité sur la machine synchrone

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique. Cette famille de machine regroupe en fait plusieurs sous familles, qui vont de l'alternateur de plusieurs centaines de mégawatts au moteur de quelques watts, en passant par les moteurs pas à pas. Néanmoins, la structure de toutes ces machines est relativement proche. Le stator est généralement constitué de trois enroulements triphasés répartis, tel que les forces électromotrices générées par la rotation du champ rotorique soient sinusoïdales ou trapézoïdales. Les stators, notamment en forte puissance, sont identiques à ceux d'une machine asynchrone.

Les différences entre une machine asynchrone et une machine synchrone reposent sur le fait que :

- Le rotor de la machine synchrone tourne à la même vitesse que le champ tournant quelle que soit la charge ;
- Pour une machine synchrone, il est possible de régler $\cos\phi$ à une valeur optimale pour le fonctionnement de la machine ;
- Les machines synchrones nécessitent un inducteur constitué généralement par un enroulement alimenté par un courant continu ;
- Le rotor d'une machine synchrone peut être non seulement à pôles lisses mais aussi à pôle saillants.

Présentation

- Comme toutes les machines électrique tournant, une machine synchrone est un convertisseur d'énergie.
- Elle est réversible est peut fonctionner en génératrice (alternateur), soit en moteur.
- Un alternateur transforme de l'énergie mécanique en énergie électrique et inversement pour le moteur synchrone.

II-1-1. Principaux types des machines synchrones du point de vue leur construction :

L'expérience accumulée par la fabrication et l'exploitation de longue date des machines synchrones montre que le système le plus économique et le plus commode est celui où la disposition des principaux éléments de la machine est comme suit :

- Les pôles excités par le courant continu sont disposés sur la partie tournante de la machine, appelée **rotor**, et l'enroulement de l'induit à courant alternatif est placé sur la partie fixe de la machine, appelée **stator**.

Du point de vue de la construction on distingue deux types principaux de machine synchrones :

- ✓ **Machine synchrone à pôles lisses ;**
- ✓ **Machine synchrone à pôles saillants.**

L'exécution d'une machine synchrone est surtout liée à sa vitesse de rotation n .

Pour une fréquence donnée la vitesse de rotation maximale est celle des machines à nombre de paires de pôles P .

- Pour $p=1$ et $f=50\text{Hz}$, nous avons dans ce cas de $n=50\text{tr/s}$ ou $n= 3000\text{tr/min}$.
- Pour $p=2$ et $f=50\text{Hz}$, nous avons dans ce cas de $n= 25\text{tr/s}$ ou $n=1500\text{tr/min}$.

Pour de telles machines en grande puissance, la vitesse périphérique du rotor est tellement grande que pour des raisons de résistance mécanique du rotor et de meilleur répartition et fixation de l'enroulement d'excitation on est obligé de répartir ce dernier sur la surface du rotor, c'est -à -dire construire une machine à pôles saillants de construction plus simple.

- Si $p \geq 3$, la vitesse périphérique du rotor est diminuée et les machines synchrones sont alors à pôles saillants de construction plus simple.

Les alternateurs synchrones sont entraînés le plus souvent par des turbines à vapeur ou hydrauliques. Dans le premier cas on les appelle turbo-alternateurs et dans le second cas alternateurs hydrauliques. Les turbines hydrauliques tournant plus lentement donc il est fabriqué à pôles saillants.

II-1-2 Stator de la machine synchrone

Il est constitué d'enroulements disposés à 120° dans le cas d'un alternateur triphasé. Chaque enroulement sera le siège d'un fém. induite puisque soumise au flux magnétique Variable de l'inducteur.

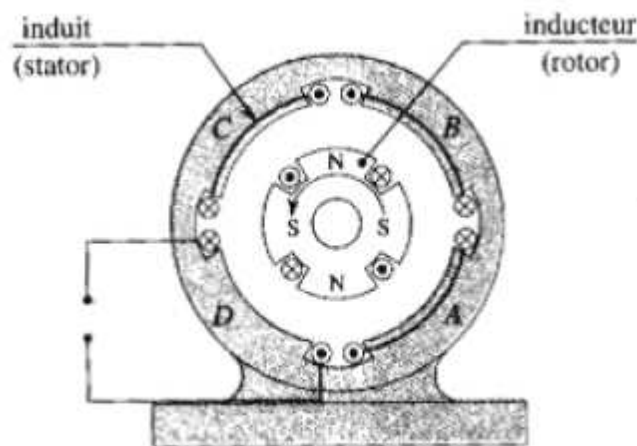


Figure. 3-2 : Vue l'ensemble

Symboles

On peut présenter l'alternateur synchrone par les figures suivantes :

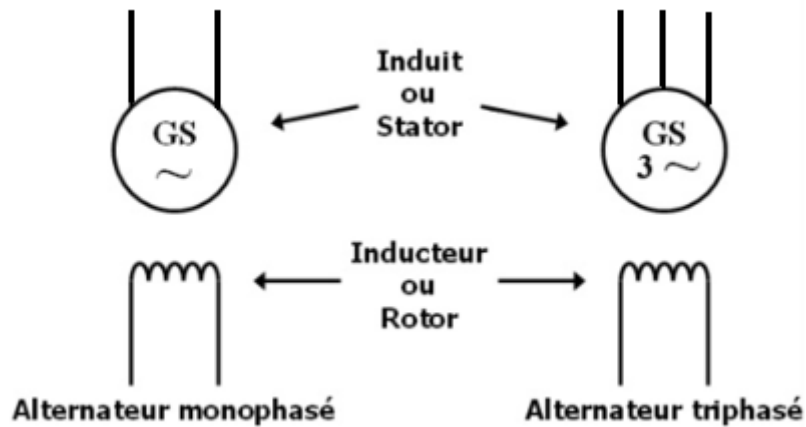


Figure. 3-3 : Alternateur monophasé et triphasé

II-1-3 Les rotors de la machine synchrone

Il existe trois grandes familles de rotor, ayant pour rôle de générer le champ d'induction rotorique.

Les rotors bobinés à pôles lisses, les rotors bobinés à pôles saillants ainsi que les rotors à aimants :

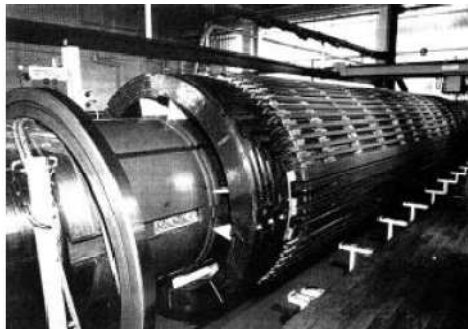


Figure.3- 4 : Rotor de la machine synchrone à pôles lisses

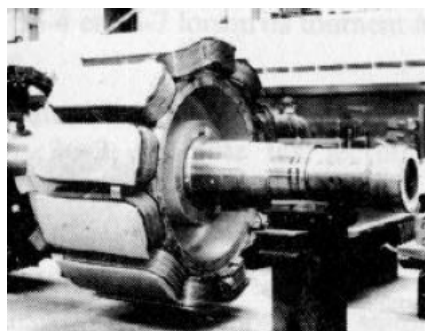


Figure.3-5 : Rotor de la machine synchrone à pôles saillants

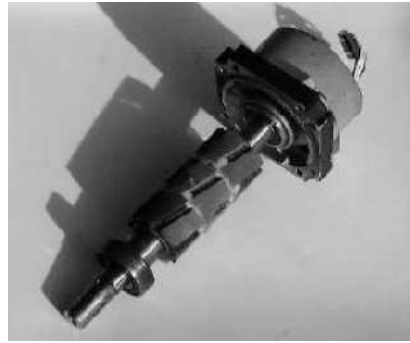


Figure.3-6 : Rotor de la machine synchrone à aimants

- Dans le cas d'une machine à aimants, il n'y a plus de bobinage au rotor (ce qui simplifie la réalisation de la machine).
- Dans le cas d'une machine à pôles lisses, le rotor est pratiquement cylindrique.

II-2-1 Principe de fonctionnement.

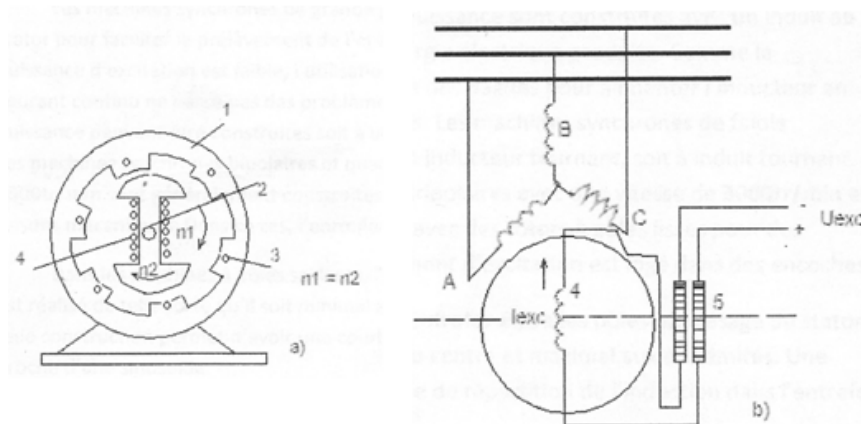


Figure. 3-7 : Principe de fonctionnement

Le stator 1 est identique à celui d'une machine asynchrone et contient un enroulement triphasé. 2 arbres du rotor. L'enroulement 4 alimenté par du courant continu à travers les bagues 5, donc 4 est appelé enroulement d'excitation.

Lorsque le rotor tourne à une certaine vitesse n_2 , le flux d'excitation qu'il produit embrasse l'enroulement statorique et induit dans celui-ci une force électromotrice de fréquence f_1 avec :

$$f_1 = (p \cdot n_2) / 60 \quad (2-1)$$

Si l'enroulement statorique est fermé sur une $\frac{f_1}{60}$ charge qui le traverse créerait un champ tournant de fréquence f_1 telle que :

$$n_1 = \frac{60 \cdot n_2}{p} \quad (2-2)$$

Des expressions (2-1) et (2-2) découlent que : $n_1 = n_2$,

C'est -à-dire que le rotor tourne à la même vitesse que le champ tournant, d'où son appellation de machine synchrone. Le flux magnétique résultant d'une machine synchrone est donc créé par des forces magnétomotrices du rotor et du stator. Dans la théorie des machines synchrones, on parle plutôt d'inducteur et d'induit au lieu du rotor et de statorique dans la mesure où aucune des ces deux éléments peut être mobile ou non.

II-2-2-1 Structure d'une machine synchrone :

Les machines synchrones de grande puissance sont construites avec un induit au stator pour faciliter le prélèvement de l'électricité produite. Comme la puissance d'excitation est faible, l'utilisation des bagues pour alimenter l'inducteur en courant continu ne passe pas des problèmes synchrones de faible puissance peuvent être construites soit à un inducteur tournant, soit à induit tournant.

Les machines synchrones bipolaires et quadripolaires avec une vitesse de 3000tr/min et 1500tr/min sont généralement construites avec des rotors à pôles lisses pour des raisons mécaniques. Dans ce cas, l'enroulement d'excitation est logé dans des encoches.

Dans les machines pôles saillants, l'entrefer entre les pôles et, alésage du stator est réalisé de telle sorte qu'il soit minimal au centre et maximal aux extrémités. Une telle construction permet d'avoir une courbe de répartition de l'induction dans l'entrefer proche d'une sinusoïde ;

II-2-2-3 Caractéristiques d'un alternateur synchrone

Fonctionnement à vide d'un alternateur synchrone :

En fonctionnement à vide, l'enroulement d'excitation est créé uniquement d'excitation et dirigé suivant l'axe des pôles des rotors les de l'enroulement de l'induit.

Force électromotrice :

L'harmonique principal de la force électromotrice est déterminé par la relation suivante :

$$E_o = 4,44 f_i N_{ik} N_i \Phi_{exc} \quad (2-3)$$

Où N_j , K_{Ni} respectivement nombre de spires par phase et coefficient de bobinage de l'enroulement d'induit, Φ_{exc} harmonique principal de flux magnétique l'excitatrice. Donc, de la caractéristique à vide de la machine synchrone est la suivantes.

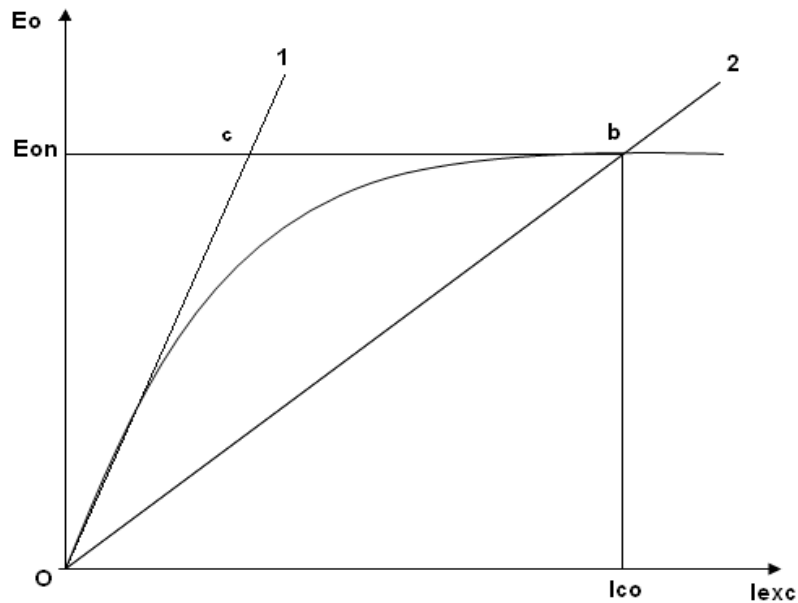


Figure.4-1 : Caractéristique à vide

La partie de la courbe correspond au courant d'excitation peu élevé. Par conséquent, le flux magnétique est important et le circuit magnétique n'est pas saturé. La résistance magnétique est dans ce cas relativement faible. Lorsque l'induction atteint 1,7 à 1,8 T la résistance de circuit magnétique augmente considérablement et la courbe de la force électromagnétique non linéaire la ligne de fonctionnement normale correspond au coude de la courbe avec le coefficient de saturation.

$$k_s = \frac{ab}{ac} = 1,1 \text{ à } 1,4. \quad (2-4)$$

Dans la pratique, pour simplifier le calcul la courbe réelle de la force électromagnétique par les droites 1 ou 2 suivant que étudie l'alternateur en absence de saturation

(droite 1 ou droite 2).

II-2-2-4 Caractéristique de charge d'une génératrice synchrone

La caractéristique de charge est donnée par la relation suivante

$$U = f(I_f) \text{ pour } I = \text{const} ; f = \text{const et } \cos\varphi = \frac{\pi}{2} > 0$$

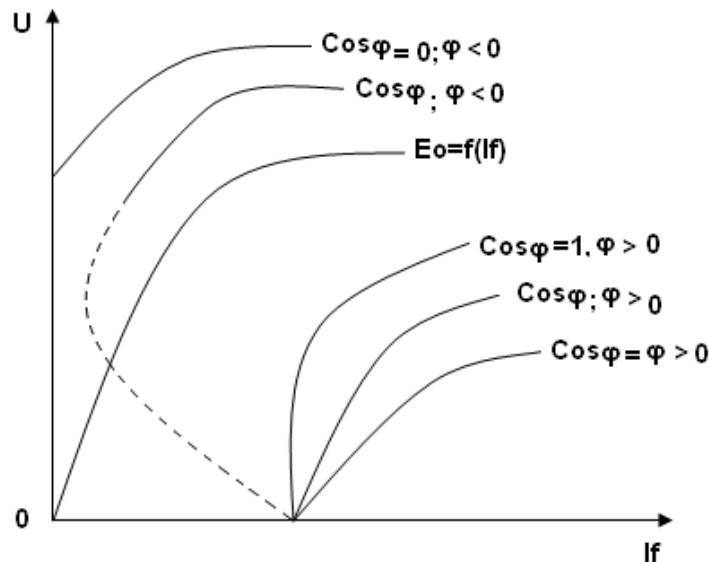


Figure .4-2 : Caractéristiques en charge d'un alternateur synchrone réaction d'induit :

La réaction d'induit est une interaction entre la force magnétomotrice (f. m .m) de l'induit avec le champ magnétique de la machine synchrone .Comme la réaction d'induit provoque une variation de flux résultant, la tension d'un alternateur fonctionnant en régime autonome dépend de la valeur et de la caractéristique de la charge ainsi que certaine particularités de la machine telle que valeur de la force magnétomotrice d'excitation, caractéristique du circuit. Dans le cas d'une charge résistive ou inductive, la réduction du flux en charge est très important et la tension E_0 croît quand l'intensité du courant débité augmente.

D'où, en charge, les flux résultants est crée par la somme de force magnétomotrice de l'inducteur et de l'induit, donc l'amplitude du flux en charge est différent de celle du flux à vide.

II-3-1 Bilan de puissance d'un alternateur :

La puissance absorbée.

La turbine entraine l'arbre de l'alternateur à tourner.

La puissance absorbée est mécanique.

$$P_a = \Omega s * C_M = 2\pi n s C_M. \quad (2-5)$$

Où Ωs : Pulsation de rotation en rad/s ; ns : vitesse en tr/s ; C_M : couple utile sur l'arbre En m N.

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

$$\text{On a donc, } \mathbf{Pa} = \Omega s * \mathbf{CM} + \mathbf{Uf} * \mathbf{If} = 2\pi ns \mathbf{CM} + \mathbf{Uf} \quad (2-6)$$

La puissance utile :

En triphasé, avec une charge équilibre de facteur de puissance $\cos\phi$.

$$\mathbf{PU} = \sqrt{3} \mathbf{UI} \cos\phi \quad (2-7)$$

Bilan des pertes :

Il existe deux catégories :

- Les pertes principales qui constituées par des pertes joules ;
- Les pertes supplémentaires (à vide et en charge)

Les pertes principales :

Pertes par effet joule dans l'inducteur :

$$\mathbf{Ps} = \mathbf{Us Is} = \mathbf{rsI2s} ; \quad (2-8)$$

Pertes par effet joule dans l'induit :

$$\mathbf{Pj} = \frac{3}{2} \mathbf{RI2} \quad (2-9)$$

Où $\mathbf{R}$; est la résistance vue entre deux bornes de l'alternateur. Ces pertes dépendant de la charge.

Pertes dites « collecteur » $\mathbf{Pc}$ pertes mécaniques et pertes qui ne dépendent pas de la charge.

Remarque :

Comme les pertes mécaniques et les pertes fer dépendent de la fréquence et de la tension $\mathbf{U}$, elles sont généralement constantes. (50Hz- 220v) ; alors : les pertes fer est magnétique ;

$$\mathbf{PM} = \mathbf{PH} + \mathbf{PCF} \quad (2-10)$$

Où $\mathbf{PH}$; pertes par Hystérésis ; $\mathbf{P_{cf}}$; pertes par courants de Foucault.

Les pertes mécaniques sont causées par les frottements et à la ventilation :

$$\mathbf{Pméc} = 3,68p \left(\frac{V_2}{40}\right)^2 3\sqrt{10L1} \quad (2-11)$$

Où $\mathbf{V_2} = \frac{\pi(D1-2\delta)n}{60}$; vitesse linéaire à la surface des pôles du rotor en m/s

$\mathbf{L1}$: périmètre moyen de l'induit ; $\mathbf{D1}$: diamètre de l'alésage de l'induit ; $\mathbf{p}$: nombre de paires de pôles ; δ : largeur de l'entrefer. Les pertes dans l'excitation : pour une excitation indépendante est donnée par la relation suivante :

$$\mathbf{P_{ex}} = \mathbf{I_f^2 \times R_{ex} + \Delta ub \times I_f}$$

Où $\mathbf{R_{ex}}$; résistance de l'enroulement d'excitation à la température de service ($t \approx 75^\circ\text{C}$) ;

$\mathbf{\Delta ub = 2v}$ est la chute de tension aux bornes de contact à balais pour une excitation montée en bout d'arbre de l'alternateur.

$$\mathbf{P_{ex}} = \frac{(I_f^2 + \Delta ub \times I_f^2)}{\eta_{ex}} \quad (2-12)$$

Avec : η_{ex} , rendement d'excitation : 0,80 à 0,85.

II-3-2 Représentation de bilan des puissances

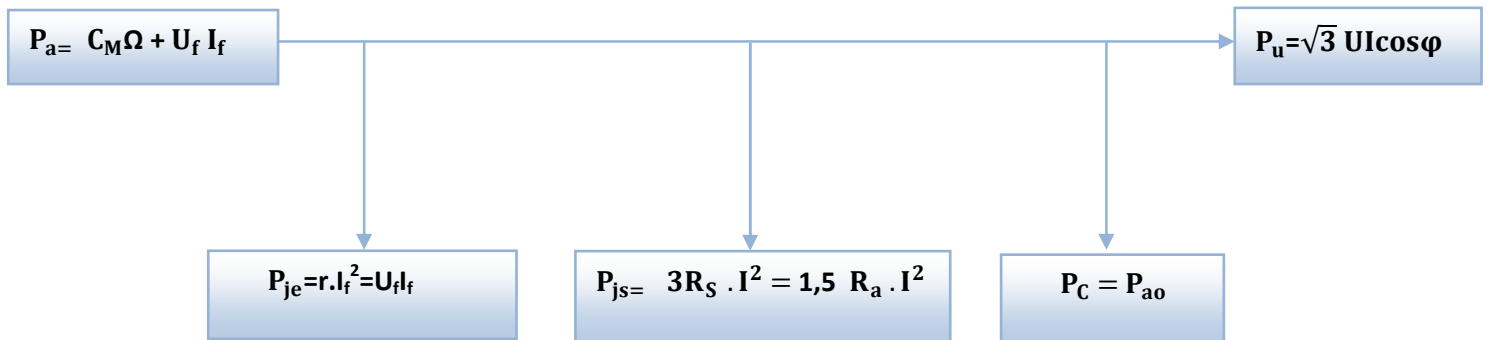


Figure.4-3 : Bilan des puissances

Les pertes supplémentaires à vide sont déterminées par la relation suivante :

$$P_{sr} = K_p \cdot p \cdot b_p \cdot I_1 (10^{-4} \cdot Z_1 \cdot n_1)^{1,5} [B_\delta (K_\delta - 1) \cdot t_1]^2 \cdot 10^{-6} [W]. \quad (2-13)$$

Où, coefficient K_p prenant en compte l'épaisseur

Pour une épaisseur de : **1mm** $\longrightarrow$ **$k_p = 4,6$**

2mm $\longrightarrow$ **$k_p = 8,6$**

Pour des pôles massifs **$K_p = 23,3$** (non feuilletés).

Avec Z_1 , nombre d'encoches du rotor ; b_p , largeur du pôle en mm ; K_δ d'entrefer ; t_1 , pas dentaire en mm ; b_δ champ magnétique dans l'entrefer.

Pour les machines synchrones jusqu'à 1000kw, les pertes supplémentaire en charge est : $P_{sch} = (0,5)\%$.

Pour les machine synchrones $P > 1000kw$; $P_{sch} = 0,25$ à $0,4\%$.

II-3-3 Le rendement :

Le rendement d'un alternateur dépend du $\cos\varphi$ de la caractéristique de la charge.

En général, la machine synchrone a un rendement :

$$\eta = 1 - \frac{\sum P}{P_u + \sum P} ;$$

Où $\sum P$; somme des pertes ; d'où

Rendement :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{UI\sqrt{3}\cos\varphi}{2\pi n_s T_n + U_f} \quad \text{Ou} \quad \eta = \frac{P_u}{P_a} = 1 - \frac{\sum P}{P_n} \quad (2-14)$$

Avec, $P_n = I_{n\ m_n} \cos \varphi$: puissance active délivrée par l'alternateur ou m : nombre de phases ; U_n : tension nominale de l'alternateur ; I_n : courant de l'alternateur. [cf.3].

II- 4-1 Mise en équation de la machine synchrone

II- 4-2 Définitions des différents enroulements

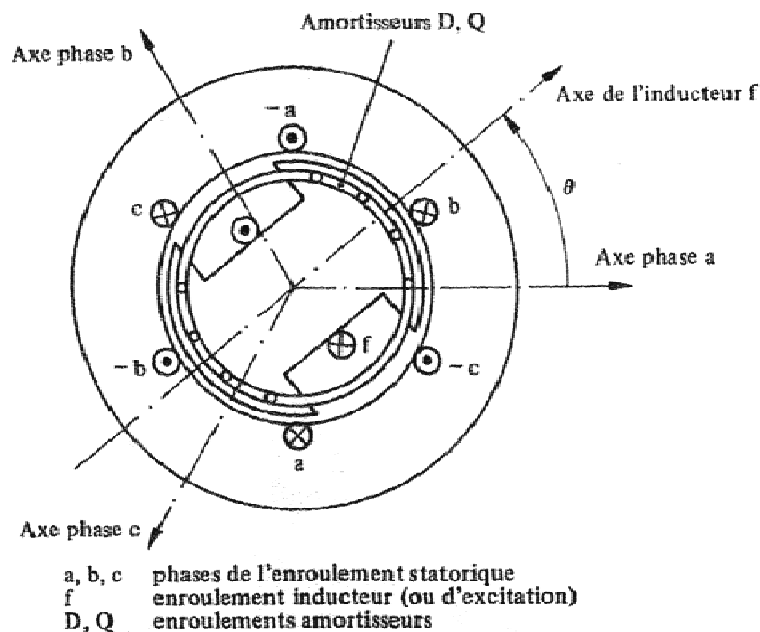


Figure.4-4 : Les différents enroulements d'une machine synchrone

L'enroulement statorique comporte trois phases a, b, c identiques décalées entre dans l'espace d'un angle électrique égale à $2\pi/3$.

Autre l'enroulement d'excitation monophasé (indice f) parcouru par un courant continu distribué suivant les axes polaires successifs le rotor est occupé au voisinage de l'entrefer d'un enroulement en court-circuit dit enroulement amortisseur, constitué soit par des barres de cuivre nu court-circuité par des anneaux comme par des anneaux la cage d'un moteur asynchrone, soit par les pièces en aciers massifs constituant le rotor ou les pôles inducteurs, soit par la (figure. 4-4) précise la localisation des différents enroulements.

Pour l'analyse du comportement, cet enroulement amortisseur est décomposé mathématiquement en deux enroulements en court-circuit situés dans l'axe direct D et dans l'axe en quadrature Q (figure.4-4).

Le rotor d'une machine synchrone présente 2 types d'anisotropies :

Une anisotropie : électrique : l'axe direct possède deux enroulements distincts, l'enroulement d'excitation f et l'enroulement amortisseur D, alors l'axe transversal possède l'enroulement Q dont les paramètres caractéristiques sont différents de ceux de l'axe direct.

Une anisotropie magnétique : importante dans le cas de pôles saillants, plus faible mais non négligeable dans le cas d'une machine à rotor cylindrique, due à la différence du circuit magnétique selon les deux axes.

II-4-3 Equation de tension et de flux en grandeurs de phase

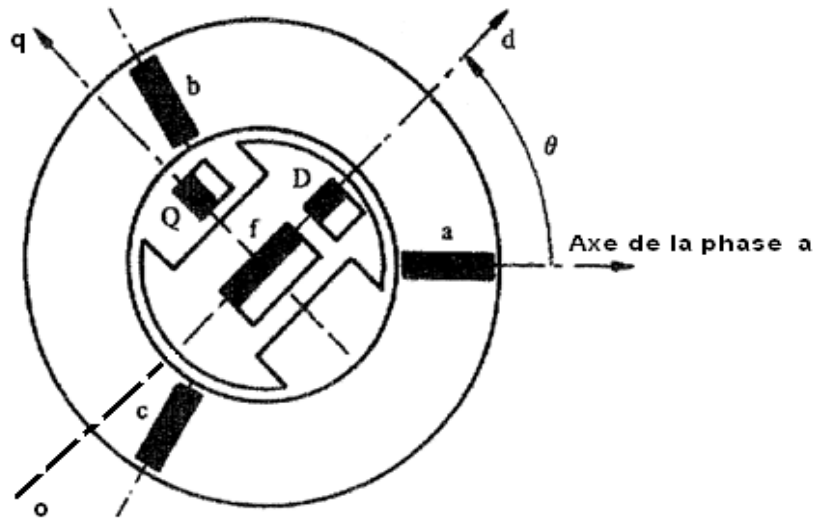


Figure.4-5 : Les différents enroulements d'une machine synchrone

Le système d'équations de tension de la machine synchrone est obtenu par

L'application de la loi d'Ohm u aux différents circuits [cf.1] :

$$u = Ri + \frac{d\Psi}{dt} \quad (2-15)$$

- Les équations régissant le stator s'écrivent :

$$\begin{cases} u_a = R_s i_a + \frac{d\Psi_a}{dt} ; \\ u_b = R_s i_b + \frac{d\Psi_b}{dt} ; \\ u_c = R_s i_c + \frac{d\Psi_c}{dt} ; \end{cases} \quad (2-16)$$

- Sous forme matricielle :

$$u_{a,b,c} = R_s i_{a,b,c} + \frac{d\Psi_{a,b,c}}{dt} \quad (2-17)$$

Pour le rotor on a :

$$0 = R_D i_D + \frac{d\Psi_D}{dt} \quad (2-18)$$

$$u_f = R_f i_f + \frac{d\Psi_f}{dt} \quad (2-19)$$

$$0 = R_Q i_Q + \frac{d\Psi_Q}{dt} \quad (2-20)$$

Où $u(a, b, c)$: tensions aux bornes des enroulements du stator,

$\Psi(a, b, c), i(a, b, c)$: Respectivement flux totalisés et courants des enroulements des phases du stator,

r_i : Résistance de l'enroulement d'une phase,

u_f : Tension aux bornes de l'enroulement d'excitation,

Ψ_f, i_f : Flux totalisé et courant de l'enroulement d'excitation,

r_f : Résistance de l'enroulement d'excitation,

Ψ_D, i_D, Ψ_Q, i_Q : Flux totalisés et courants des enroulements amortisseurs équivalents suivant les axes longitudinaux d et transversal q,

r_D, r_Q : Résistances des amortisseurs équivalents.

Equations des flux

Etant donné que le flux magnétique est non saturé, les flux sont exprimés en fonctions linéaires des courants

En effet, on peut écrire le flux statorique comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{aD} & L_{af} & L_{aQ} \\ L_{bD} & L_{bf} & L_{bQ} \\ L_{cD} & L_{cf} & L_{cQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_D \\ \Psi_f \\ \Psi_Q \end{bmatrix}. \quad (2-21)$$

Pour le rotor on a :

$$\begin{bmatrix} \Psi_D \\ \Psi_f \\ \Psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{Da} & L_{Db} & L_{Dc} \\ L_{fa} & L_{fb} & L_{fc} \\ L_{Qa} & L_{Qb} & L_{Qc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_D & L_{Df} & L_{DQ} \\ L_{fD} & L_f & L_{fQ} \\ L_{QD} & L_{Qf} & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_D \\ i_f \\ i_Q \end{bmatrix}. \quad (2-22)$$

Les flux totalisés Ψ s'expriment sous forme matricielle :

$$[\Psi_{a,b,c}] = [L_S][i_{a,b,c}] + [L_{S,R}][i_{D,f,Q}]; \quad (2-23)$$

$$[\Psi_{D,f,Q}] = [L_{S,R}]^T[i_{a,b,c}] + [L_r][i_{D,f,Q}]. \quad (2-24)$$

$[L_S], [L_r]$: Représentent respectivement les matrices d'inductances statorique et rotorique,

$[L_{S,R}], [L_{S,R}]^T$: Correspond respectivement aux matrices d'inductance mutuelle stator – rotor et rotor- stator.

Inductances propres rotorique :

L_D, L_f, L_Q ces sont des constantes (on néglige les perturbations locales dans la distribution du champ d'entrefer provoquées par les encoches, le circuit magnétique de la machine apparait isotrope vu du rotor).

$$L_{Df} = L_{fD} = cte. \quad (2-25)$$

Etant donné que les axes d et q sont en quadrature, il s'en suit que :

$$L_{DQ} = L_{QD} = L_{fQ} = L_{Qf} = 0. \quad (2-26)$$

Les inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques sont fonctions de l'angle électrique θ entre l'axe de la phase a pris comme référence et l'axe d.

$$L_{Da}(\theta) = L_{aD}(\theta) = L_{Da} \cos(\theta); \quad (2-27)$$

$$L_{Db}(\theta) = L_{bD}(\theta) = L_{Dc} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}); \quad (2-28)$$

$$L_{Dc}(\theta) = L_{aD}(\theta) = L_{Dc} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}); \quad (2-29)$$

$$L_{fa}(\theta) = L_{af}(\theta) = L_{fa} \cos(\theta) ; \quad (2-30)$$

$$L_{fb}(\theta) = L_{bf}(\theta) = L_{fa} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) ; \quad (2-31)$$

$$L_{fc}(\theta) = L_{cf}(\theta) = L_{fa} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) ; \quad (2-32)$$

$$L_{Qa}(\theta) = L_{aQ}(\theta) = -L_{Qa} \sin(\theta) ; \quad (2-33)$$

$$L_{Qb}(\theta) = L_{bQ}(\theta) = L_{Qa} \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) ; \quad (2-34)$$

$$L_{Qc}(\theta) = L_{cQ}(\theta) = L_{Qa} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) . \quad (2-35)$$

Inductance propres statorique :

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L_h - L_{\sigma s} = cte ; \quad (2-36)$$

Avec

$$L_h = \frac{16}{\pi} \frac{\tau_{p1}}{p\delta} (NK_{\omega 1})^2 10^{-7} ; \quad (2-37)$$

$$L_{\sigma s} = 2\mu_0 \frac{N^2}{pq} 1\lambda_{\sigma s} . \quad (2-38)$$

Machine à pôles saillants : les inductances sont fonctions de θ .

$$L_{aa}(\theta) = \bar{L}_h + L_{\sigma s} + L_{h2} \cos(2\theta) = \bar{L} + L_{h2} \cos(2\theta) ; \quad (2-39)$$

$$L_{bb}(\theta) = \bar{L}_h + L_{\sigma s} + L_{h2} \cos(2\theta) = \bar{L} + L_{h2} \cos(2\theta + \frac{2\pi}{3}) ; \quad (2-40)$$

$$L_{cc}(\theta) = \bar{L}_h + L_{\sigma s} + L_{h2} \cos(2\theta) = \bar{L} + L_{h2} \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) . \quad (2-41)$$

Avec

$$\bar{L}_h = \frac{L_{hd} + L_{hq}}{2} ; \quad (2-42)$$

$$L_{h2} = \frac{L_{hd} - L_{hq}}{2} ; \quad (2-43)$$

$$L_{h2} = \frac{\theta_a N_s K_{\omega 1s} \Lambda_d}{i_a} ; \quad (2-44)$$

$$L_{hq} = \frac{\theta_a N_s K_{\omega 1s} \Lambda_d}{i_a} . \quad (2-45)$$

Inductance mutuelles entre phases :

Machine à rotor cylindrique

$$L_{ab} = L_{ba} = L_{bc} = L_{cb} = L_{ca} = L_{ac} = 0,5L_n \quad (2-46)$$

Machine à pôles saillants

Les mutuelles statorique dépendent du second harmonique $L_n(\theta)$.

$$L_{ab} = -0,5\bar{L}_n + L_{h2} \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) ; \quad (2-47)$$

$$L_{bc} = -0,5\bar{L}_n + L_{h2} ; \quad (2-48)$$

$$L_{ca} = -0,5\bar{L}_n + L_{h2} \cos(2\theta + \frac{2\pi}{3}) . \quad (2-49)$$

Chapitre III :

Modélisation du système et l'indication des différentes grandeurs lors du phénomène transitoire.

III-1 Introduction

La modélisation est la mise en équation de système avec comportement des machines sur un système donné introduites.

III-1-1 Représentation d'une microcentrale hydraulique

Représentation des différentes parties de la microcentrale hydraulique.

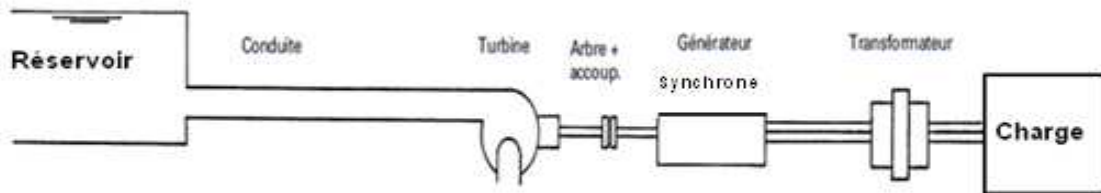


Figure : 5-1 microcentrales hydrauliques accouplées à la génératrice synchrone.

III- 2 Modèle de Turbine.

On peut appeler la Turbine, la transformation permanent l'énergie de l'eau en énergie utilisable sous forme mécanique à la électrique.

La puissance hydraulique fournie à la turbine est donnée par l'expression de la chute efficace suivante :

$$H_e = \frac{U}{g} (V_1 - U) (1 + m \cos \beta). \quad (3-1)$$

La puissance de la turbine est donné par :

$$P_t = \rho g Q_t H_e. \quad (3-2)$$

Le couple fournie par la turbine :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t}. \quad (3-3)$$

La vitesse linéaire de la turbine :

$$U = \Omega_t \frac{D_t}{2} \quad (3-4)$$

D'après les quatre équations ci-dessus on obtient l'équation suivante :

$$C_t = \rho Q_t \frac{U}{\Omega_t} (V_1 - \frac{D_t}{2} \Omega_t) (1 + m \cos \beta). \quad (3-5)$$

En grandeurs réduites :

On a donc :

$$Q_t = q_t Q_{tn} \quad (3-6)$$

Avec

Q_t : Débit de la turbine en (p.u) ;

γ_t : Vitesse du jet en (p.u) ;

n_t : Vitesse de la turbine en (p.u) ;

C_t : Couple de la turbine en (p.u).

Pour les valeurs nominales :

$$c_t = \gamma_t = n_t = Q_t = 1.$$

Pour la vitesse du jet, et en considérant certaines approximations on a :

$$V_1 = \sqrt{2gH_t} . \quad (3-7a)$$

La relation (3-7a) s'écrit en utilisant les grandeurs réduites sous la forme :

$$V_1 = \gamma_t V_{1n} = \sqrt{2gH_t} . \quad (3-7b)$$

D'où l'expression de la vitesse de la turbine en (p.u) :

$$\gamma_t = \sqrt{H_t} . \quad (3-8)$$

H_t : Chute nette de la turbine.

III-2-1 Transformation de Park appliquée à la machine synchrone

Le but de cette transformation est de rendre dans les coefficients dans les expressions des inductances précédentes et transformées les grandeurs de phases a, b, c en grandeurs d'axe d, q et o pour obtenant une matrice unique de transformation les courants, les tensions et les flux.

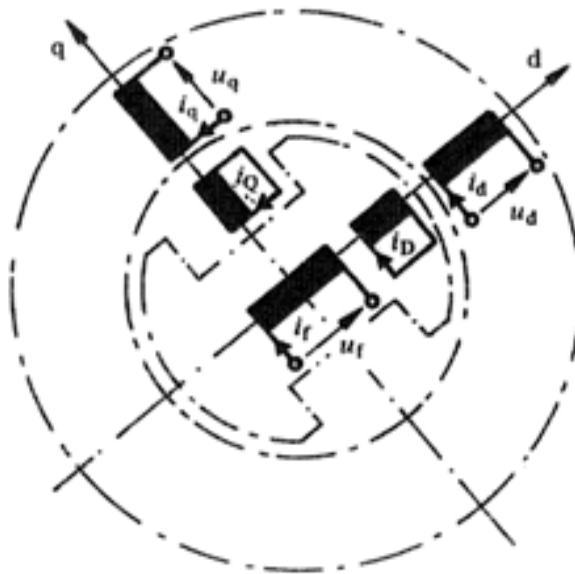


Figure.5-2 : Modèle de Park de la machine synchrone

Cette transformation de Park de consiste à définir une matrice unique de transformation pour les courants, les tensions et les flux totalisés.

$$\text{Avec } [A] = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}; \quad (3-9)$$

A partir de la matrice de Park précédent la transformation des différentes grandeurs statorique sous forme matricielle est définie par :

$$[i_{dqo}] = [A] [i_{abc}], \quad (3-10)$$

$$[u_{dqo}] = [A] [u_{abc}], \quad (3-11)$$

$$[\Psi_{dqo}] = [A] [\Psi_{abc}], \quad (3-12)$$

$$[i_{dqo}] = [A]^{-1} [i_{abc}], \quad (3-13)$$

$$[u_{dqo}] = [A]^{-1} [u_{abc}], \quad (3-14)$$

$$[\Psi_{dqo}] = [A]^{-1} [\Psi_{abc}], \quad (3-15)$$

$$[A]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix}.$$

$[A]^{-1}$: est transformation inverse du Park,
 $\theta = \omega_r t$ Angle entre deux phases.

III -2-2 Equation de Park de la machine synchrone

Comme le système de transformation de la machine synchrone est lié au rotor on a :

$$\omega_m = \omega_r.$$

Il vient : Pour le stator.

$$u_d = r_s i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega_r \Psi_q, \quad (3-16)$$

$$u_q = r_s i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega_r \Psi_d, \quad (3-17)$$

$$u_o = r_s i_o + \frac{d\Psi_o}{dt}. \quad (3-18)$$

Pour le rotor

$$0 = r_D i_D + \frac{d\Psi_D}{dt}, \quad (3-19)$$

$$u_f = r_f i_f + \frac{d\Psi_f}{dt}, \quad (3-20)$$

$$0 = r_Q i_Q + \frac{d\Psi_Q}{dt}. \quad (3-21)$$

Et pour les flux.

$$\Psi_d = L_d i_d + L_{da} i_D + L_{fa} i_f, \quad (3-22)$$

$$\Psi_q = L_q i_q + L_{qa} i_Q, \quad (3-23)$$

$$\Psi_0 = L_o i_o, \quad (3-24)$$

$$\Psi_D = \frac{3}{2} L_D i_d + L_D i_D + L_{Df} i_f, \quad (3-25)$$

$$\Psi_f = \frac{3}{2} L_{fa} i_d + L_{da} i_D + L_{Df} i_f, \quad (3-26)$$

$$\Psi_Q = \frac{3}{2} L_{qa} i_q + L_Q i_Q. \quad (3-27)$$

Avec L_d : Représente l'inductance synchrone longitudinale.

$$L_d = L_{\sigma s} + \frac{2}{3} (\bar{L}_h + L_{h2}) = L_{\sigma s} + L_{ad}. \quad (3-28)$$

L_q : Représente l'inductance synchrone transversal.

$$L_q = L_{\sigma s} + \frac{2}{3} (\bar{L}_h - L_{h2}) = L_{\sigma s} + L_{aq}. \quad (3-29)$$

L_o : Représente l'inductance homopolaire.

$$L_o = L_{\sigma s}. \quad (3-30)$$

Les deux termes L_{ad} et L_{aq} introduits désignent les inductances cycliques longitudinale transversale :

$$L_{ad} = \frac{2}{3} (\bar{L}_h + L_{h2}); \quad (3-31)$$

$$L_{aq} = \frac{2}{3} (\bar{L}_h - L_{h2}). \quad (3-32)$$

Ces inductances sont indépendantes de θ . [cf.1].

III-2-3 Expression de puissance et du couple :

Puissance instantanée de la machine vaut :

$$p(t) = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c + u_f i_f, \quad (3-33)$$

$$p(t) = \frac{2}{3} (u_d i_d + u_q i_q) + 3u_o i_o + u_f i_f, \quad (3-34)$$

Les enroulements amortisseurs étant en court-circuit ils ne participent pas au bilan de puissance et l'énergie absorbée pendant un intervalle de temps dt s'exprime :

$$dw_{el} = \left[\frac{2}{3} R_s (i_d^2 + i_q^2) + 3R_s i_o^2 + R_f i_f^2 \right] dt + \frac{2}{3} [(i_d d\Psi_d + i_q d\Psi_q) + 3i_o d\Psi_o + i_f d\Psi_f] + \left[\frac{2}{3} \omega_m (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) dt \right]. \quad (3-35)$$

L'énergie électrique est composée de 3 termes : l'énergie par l'effet joule dans les enroulements : la variation d'énergie magnétiquement emmagasinée dans de couplage et l'énergie transformable en énergie mécanique.

$$dw_{ec} = \frac{2}{3} \omega_m (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) dt, \quad (3-36)$$

$$dw_{e_{Rsl}} = C_{em} \cdot d\theta_m, \quad (3-37)$$

Avec

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \frac{\omega_m}{p}. \quad (3-38)$$

Le couple électromagnétique vaut :

$$C_{em} = \frac{2}{3} p (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d). \quad (3-39)$$

En changeant l'expression du flux :

$$C_{em} = \frac{2}{3} p [(L_d i_d + L_{Da} i_D + L_{fa} i_f) i_q - (L_q i_q + L_{Qa} i_Q) i_d], \quad (3-40)$$

$$= \frac{2}{3} p [(L_d L_q) i_d i_q + (L_{Da} i_D i_q - L_{Qa} i_Q i_d) + L_{fa} i_f i_q], \quad (3-41)$$

$$= C_{rel} + C_{asyn} + C_{syn}. \quad (3-42)$$

C_{rel} : Représente le couple reluctance dû à la saillance des pôles (machines à pôles saillants) ce terme disparaît dans le cas d'une machine à rotor cylindrique car $L_d = L_q$.

$$C_{rel} = \frac{2}{3} p [(L_d L_q) i_d i_q], \quad (3-43)$$

C_{asyn} : Couple synchrone.

$$C_{asyn} = \frac{2}{3} p (L_{Da} i_D i_q - L_{Qa} i_Q i_d). \quad (3-44)$$

C_{syn} : Couple synchrone.

$$C_{syn} = \frac{2}{3} p L_{fa} i_f i_q. \quad (3-45)$$

III-2-4- Equation de mouvement

Pour l'équation du couple :

$$C_{em} = (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d). \quad (3-46)$$

Pour l'équation du mouvement :

$$\sum C = J \frac{d\Omega}{dt},$$

$\sum C$: représente la somme des couples agissant sur le système.

En divisant par $C_{ref} = \frac{P_{ref}}{\Omega}$,

Ainsi

$$\sum C = J \frac{d\Omega}{C_{ref} dt}, \text{ angulaire}$$

$$= J \frac{\Omega_{ref}^2}{P_{ref}} \frac{d(\frac{\Omega}{\Omega_{ref}})}{dt},$$

Donc finalement

$$C_{em} + C_{ext} = 2H \frac{d\omega_m}{dt}$$

Avec

$$H = \frac{1}{2} \frac{J \Omega_{\text{ref}}^2}{P_{\text{ref}}} : \text{Constante de temps mécanique,}$$

$$\omega_m = \frac{1}{\omega_n} \frac{d\theta}{dt} : \text{vitesse angulaire en p.u}$$

Avec

$$2H : \text{La constante de temps mécanique et } H = \frac{1}{2} \frac{J \omega_n^2}{P_n} ; \quad (3-47)$$

J : Moment d'inertie des parties tournantes (masse) de la machine synchrone,

Ω_m : vitesse angulaire mécanique du rotor,

ω_m : Pulsation angulaire mécanique du rotor ($\omega_m = p \cdot \Omega_m$)

III-2-4-2 Grandeurs relatives (p.u)

Les grandeurs relatives facilitent le calcul et contrôle et des valeurs numériques. Pour la machine synchrone, les grandeurs de référence utilisées sont les suivantes :

• Stator

- Tension

$$U_{s\text{réf}} = \sqrt{2} U_n. \quad (3-48)$$

-courant

$$I_{s\text{réf}} = \sqrt{2} I_n. \quad (3-49)$$

-Puissance

$$P_{s\text{réf}} = \frac{3}{2} U_{s\text{réf}} I_{s\text{réf}}.$$

-Impédance

$$Z_{s\text{réf}} = \frac{U_{s\text{réf}}}{I_{s\text{réf}}} = Z_n. \quad (3-50)$$

• Excitation

-courant

$$I_{f\text{réf}} = \frac{U_{s\text{réf}}}{\omega_{\text{réf}} L_{af}} = X_{ad}. \quad (3-51)$$

-Puissance

$$P_{f\text{réf}} = P_{s\text{réf}} = 3 U_n I_n. \quad (3-52)$$

- Tension

$$U_{s\text{réf}} = \frac{P_{f\text{réf}}}{I_{f\text{réf}}}. \quad (3-53)$$

-Impédance

$$Z_{f\text{réf}} = \frac{U_{f\text{réf}}}{I_{f\text{réf}}} = \frac{3}{2} \frac{(\omega_{\text{réf}} L_{af})^2}{Z_n} \frac{1}{X_{ad}^2}. \quad (3-54)$$

• Amortisseur D

-courant

$$I_{D\text{réf}} = \frac{U_{s\text{réf}}}{\omega_{\text{réf}} L_{af}} = X_{ad}. \quad (3-55)$$

-Puissance

$$P_{Dréf} = P_{s\ réf} \cdot \quad (3-56)$$

- Tension

$$U_{Dréf} = \frac{P_{f\ réf}}{I_{Dréf}} \cdot \quad (3-57)$$

-Impédance

$$Z_{D\ réf} = \frac{U_{Dréf}}{I_{D\éf}} = \frac{3}{2} \frac{(\omega_{réf} L_{af})^2}{Z_n} \frac{1}{X_{ad}^2} \cdot \quad (3-58)$$

• Amortisseur Q

-courant

$$I_{Qréf} = \frac{U_{s\ réf}}{\omega_{réf} L_{af}} = X_{ad} \cdot \quad (3-59)$$

-Puissance

$$P_{Qréf} = P_{s\ réf} \cdot \quad (3-60)$$

- Tension

$$U_{Qréf} = \frac{P_{f\ réf}}{I_{Qréf}} \cdot \quad (3-61)$$

-Impédance

$$Z_{Q\ réf} = \frac{U_{Qréf}}{I_{Q\éf}} = \frac{3}{2} \frac{(\omega_{réf} L_{af})^2}{Z_n} \frac{1}{X_{ad}^2} \cdot \quad (3-62)$$

• Grandeurs de références communes à tous les circuits

-Pulsation

$$\varphi_{réf} = \omega_n = 2\pi f_{réf} \cdot \quad (3-63)$$

- Vitesse angulaire

$$\Omega_{réf} = \frac{\omega_{réf}}{p} \cdot \quad (3-64)$$

-Couple

$$C_{réf} = \frac{P_{s\ réf}}{\Omega_{réf}} \cdot \quad (3-65)$$

Les grandeurs de référence du flux de l'inductance de chaque circuit K se déduisent celles de la l'impédance :

-Flux

$$\psi_{réf} = \frac{U_{réf}}{\omega_{réf}} \cdot \quad (3-66)$$

-Inductance

$$L_{réf} = \frac{Z_{k\ réf}}{\omega_{réf}} \cdot \quad (3-67)$$

P: Désigne le nombre de pôles.

III-2-4 Equations de Park de la machine synchrone en valeur relatives (p.u) :

III-2-4-1 Tensions :

En utilisant les grandeurs de référence précitées, le système d'équations de tension devient comme suit :

a) Pour les' équations de tension de stator.

$$u_d = r_s i_d + \frac{1}{\omega_n} \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_m \Psi_q; \quad (3-68)$$

$$u_q = r_d i_q + \frac{1}{\omega_n} \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_m \Psi_d; \quad (3-69)$$

$$u_o = r_s i_o + \frac{1}{\omega_n} \frac{d\psi_o}{dt}. \quad (3-70)$$

b) Pour les' équations de tension de rotor :

$$o = r_D i_D + \frac{1}{\omega_n} \frac{d\psi_D}{dt}; \quad (3-71)$$

$$u_f = r_f i_f + \frac{1}{\omega_n} \frac{d\psi_f}{dt}; \quad (3-72)$$

$$0 = r_Q i_Q + \frac{1}{\omega_n} \frac{d\psi_Q}{dt}. \quad (3-73)$$

Pour un générateur il faut remplacer :

$$u_d = -u_d \text{ et } u_q = -u_q. \quad (3-74)$$

Toutes ces grandeurs figurants deux systèmes d'équations ci- dessus sont exprimées en p.u, y compris ω_m sauf ω_n en rad/s pour rendre adimensionnel le terme $\frac{d\psi}{dt}$.

c) Pour les' équations de flux statorique prennent la forme :

$$\Psi_d = l_d i_d + l_{Dq} i_D + l_{fq} i_f; \quad (3-75)$$

$$\Psi_q = l_q i_q + l_{Qq} i_Q; \quad (3-76)$$

$$\Psi_o = l_o i_o. \quad (3-77)$$

d) Pour les' équation de flux statorique :

$$\Psi_D = l_{Dd} i_d + l_D i_D + l_{Df} i_f; \quad (3-78)$$

$$\Psi_f = l_{fd} i_d + l_{Df} i_D + l_f i_f; \quad (3-79)$$

$$\Psi_Q = l_{Qi} i_q + l_Q i_Q. \quad (3-80)$$

Représentation schématique des flux.

La disposition des l'enroulement dans l'axe direct est schématisée par la figure :

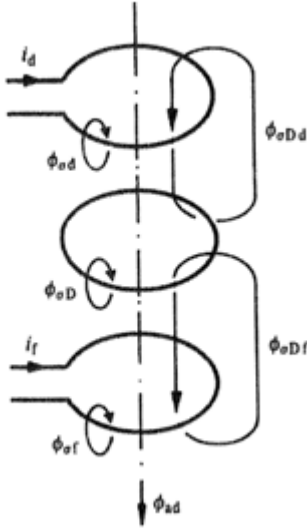


Figure 5-3 : Flux dans l'axe direct.

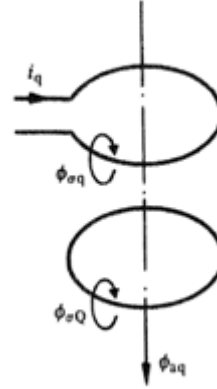


Figure 5 - 4 : Flux dans l'axe transversal [cf.1].

La signification des différents flux est la suivante :

- Φ_{ad} représente le flux principal couplé avec les 3 enroulements ;
- $\Phi_{\sigma d}, \Phi_{\sigma D}, \Phi_{\sigma f}$ correspondent aux flux de fuite des enroulements d, D et f ;
- $\Phi_{\sigma dD}$ désigne le flux mutuel exclusif entre le stator et l'amortisseur. Dans une machine classique, ce flux est pratiquement négligeable ; par contre dans les machines synchrones à pôles saillants commutables où les pièces polaires sont distribuées irrégulièrement, ce flux peut être important.
- $\Phi_{\sigma Df}$ représente le flux mutuel exclusif entre l'amortisseur et l'excitation ;
- $\Phi_{\sigma Df f d}$ correspond le flux mutuel exclusif entre l'excitation et le stator peut toujours être supposé nul.

A ces flux correspondent les inductances respectives en p.u $l_{ad}, l_{\sigma d}, l_{\sigma D}, l_{\sigma dD}, l_{\sigma f}, l_{\sigma Df}$.

Les inductances propres et mutuelles figurant dans les équations de flux en p.u s'explicitent à partir des inductances précipitées comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} l_d = l_{ad} + l_{\sigma dD} + l_{\sigma d} ; \\ l_D = l_{ad} + l_{\sigma dD} + l_{\sigma Df} + l_{\sigma D} ; \\ l_f = l_{ad} + l_{\sigma Df} + l_{\sigma f} ; \\ l_{Dd} = l_{ad} + l_{\sigma dD} ; \\ l_{df} = l_{ad} + l_{\sigma Df} ; \\ l_d = l_{ad} ; \end{array} \right. \quad (3-81)$$

Dans l'axe transversal qui ne comporte que 2 enroulement, le schéma des flux est illustré par figure dans lequel :

- Φ_{aq} représente le flux principal couplé avec les deux enroulements ;
- $\Phi_{\sigma q}$, $\Phi_{\sigma Q}$ désignent le flux de fuite des enroulements q et Q.

Les inductances correspondantes sont désignées par l_{ad} , $l_{\sigma q}$, $l_{\sigma Q}$.

Il vient :

$$\begin{cases} l_{ad} = l_{aq} + l_{\sigma q} ; \\ l_Q = l_{aq} + l_{\sigma Q} ; \\ l_{Qq} = l_{aq} . \end{cases} \quad (3-82)$$

Les expressions de flux deviennent en introduisant ces valeurs de l'inductance :

Les schémas équivalents dans les deux axes direct et transversal pour le cas général sont donnés par la figure et dans la machine classique pour $\Phi_{\sigma dD} \cong 0$, le schéma dans l'axe direct se simplifie selon sur la figure :

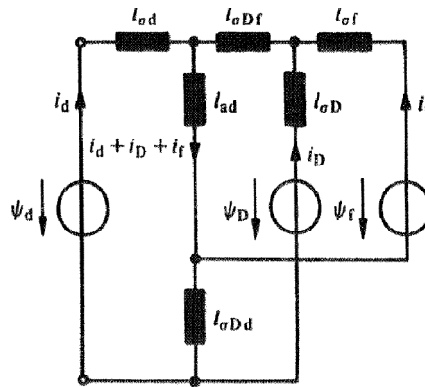


Figure 6-1 : Schéma équivalent pour les flux dans l'axe direct.

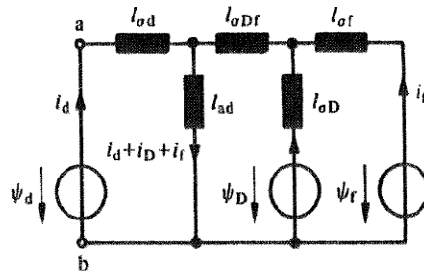


Figure 6-2 : Schéma équivalent usuel ($l_{\sigma dD} \cong 0$) pour les flux dans l'axe direct.

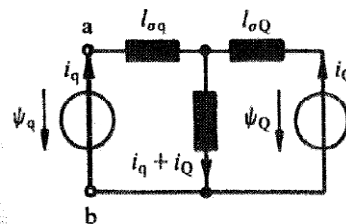


Figure 6-3 : Schéma équivalent pour les flux dans l'axe transversal [cf.1].

III-3-1 Etude du régime transitoire

Après avoir modélisé les différentes parties de la microcentrale et la machine abordons maintenant l'étude sur le phénomène transitoire.

Introduction

Dans ce paragraphe on étudie systématiquement la machine synchrone en régime transitoire, et tout ce qui se produit lors du passage d'un régime établi à un autre régime établi. Lors de ce phénomène, les courants qui passent dans les enroulements de la machine obtiennent des valeurs plus élevées aux valeurs nominales. Ils y a deux groupes des phénomènes transitoires :

- ✓ **Phénomène transitoire électromagnétique** : phénomène transitoire au cours duquel la vitesse de rotation de la machine qu'on peut considérée comme constant.
- ✓ **Phénomène transitoire électromécanique** : phénomène transitoire lié à une variation importante de la vitesse de rotation et l'énergie cinétique des parties tournantes de la machine.

III-3-2 Différents types des régimes transitoires dans une machine synchrone

III -3-2-1 Phénomènes transitoires lors du démarrage

Pendant le démarrage, les phénomènes transitoires se produisent dans une machine jusqu'à ce que cette dernière atteigne sa vitesse nominale. Durant ce temps, les courants et couple électromagnétique peuvent atteindre des valeurs plusieurs fois supérieures aux valeurs nominales.

III -3-2-2 Phénomènes transitoires lors de la synchronisation

Pendant la synchronisation d'une machine, beaucoup de modification peuvent se présenter dans le fonctionnement de la machine car, en ce temps, on doit contrôler la tension, la fréquence et le déphasage de la machine par rapport à celles du réseau. Par conséquent, cette opération peut s'accompagner d'une variation du courant élevé, ce qui caractérise les régimes transitoires pendant l'auto-synchronisation de la machine.

III -3-2-3 Phénomènes transitoires à la variation de l'excitation et à la désexcitation

Les phénomènes sont liés à la variation de l'excitation et de la désexcitation de la machine durant l'alimentation ou la suppression des tensions sur l'enroulement d'excitation. L'allure et l'état du régime transitoire dépendent pour large part de l'état du régime de l'enroulement statorique : mis en court – circuit ou non.

III -3-2-4 Phénomènes transitoire en court - circuit brusque

Les régimes transitoires en court- circuit brusque dans le circuit des enroulements d'une machine synchrone représentent un processus très pénible pour la machine, ainsi que pour les appareils, les réseaux et les récepteurs connectés à cette machine, puisque les appels

de courants dans ce cas peuvent être égaux à 10 jusqu'à 15 fois des valeurs nominales. Cette grande variation de la constante de temps d'amortissements du courant. Lors du court-circuit brusque, il existe des couplages magnétiques entre le stator et le rotor, ce qui rend complexes ces régimes.

III-4-1 Oscillations électromécaniques de la machine synchrone

Le fonctionnement parfait d'une machine synchrone demande l'égalité des vitesses de rotation du rotor et du champ tournant statorique. En régime permanent, le couple électromagnétique C_{em} et du champ tournant de l'organe accouplé à la machine synchrone (turbine) s'équilibrent exactement. Les perturbations du couple électromagnétique sont dus aux fluctuations de l'état du réseau (enclenchement et déclenchement de consommateurs entraînant des variations de tension, variation de courant d'excitation) ou par des valeurs de paramètres caractéristiques de la machine ou du réseau conduisant à des oscillations auto-excitées (amortissement insuffisant, résonance hypo synchrone). Les perturbations du couple mécanique sont dues à des harmoniques ou à une instabilité du régulateur de vitesse.

III-4-2 Mouvement

Le ω_m c'est la vitesse angulaire électrique d-q liée au rotor et ω celle d'un axe x lié au champ tournant statorique. Les angles θ et θ_s désignent respectivement les décalages angulaires respectifs des axes d et x par rapport à l'axe fixe de la phase a pris comme référence.

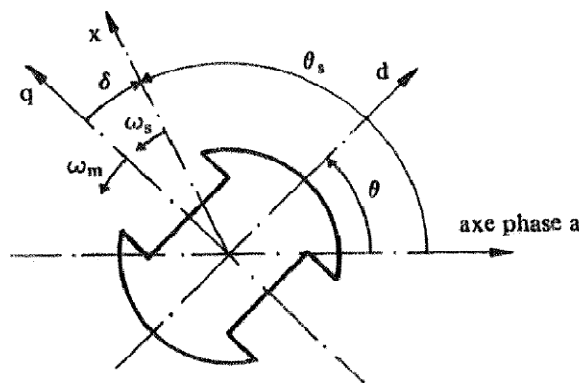


Figure. 6-4 Repérage des divers axes et angles [cf.1].

La position relative entre les axes q et x est définie par :

$$\delta = \theta_s = \theta + \frac{\pi}{2}; \quad (3-83)$$

Avec :

$$\theta_s = \theta_{os} + \omega t;$$

$$\theta = \theta_o + \int \omega t dt.$$

Et en régime permanent ($\omega_m = \omega$), cet angle n'est rien d'autres que l'angle de charge δ_o . Si à la suite de la perturbation, les vitesses ω et ω_m ne sont plus le même, l'angle δ varie $\Delta\delta$ de sorte que

$$\theta = \theta_s - (\delta_o + \delta) - \frac{\pi}{2}; \quad (3-84)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_m = \omega - k_D; \quad (3-85)$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{d^2}{dt^2}(\Delta\delta). \quad (3-86)$$

Il apparait un glissement de la roue polaire par rapport au champ tournant tel que :

$$s = \frac{\omega - \omega_m}{\omega} = \frac{d(\Delta\delta)}{\omega dt}. \quad (3-87)$$

Le fait que le glissement, les enroulements rotorique (amortisseurs et inducteurs) sont les sièges du courant induit, à la fréquence de glissement. Il en est même dans les enroulements statoriques où, en plus courant de pulsation, il apparait un courant de pulsation ω_m . L'interaction des différents courants statorique est à l'origine de composantes supplémentaires de couple et de ce fait, le couple résultant en régime oscillatoire diffère sensiblement du couple permanent.

Le couple transitoire est fonction non seulement de l'angle δ mais aussi du glissement de sorte que, sous la forme d'un développement de Taylor, on obtient pour de faibles glissements :

$$C_{trans}(\delta, s) = \bar{C}_{em} + \frac{\partial C_{trans}}{\partial \delta} \Delta\delta + \frac{\partial C_{trans}}{\partial s} s. \quad (3-88)$$

$\bar{C}_{em}$ Désigne la valeur moyenne du couple électromagnétique qui équilibre le couple extérieur appliquée à l'arbre. En posant, pour simplifier :

$$\frac{\partial C_{trans}}{\partial \delta} = k_s; \quad (3-89)$$

$$\frac{\partial C_{trans}}{\omega \partial s} = k_D. \quad (3-90)$$

D'où l'équation de mouvement :

$$\frac{J}{P} \frac{d^2\theta}{dt^2} - C_{trans} - C_{ext} = 0. \quad (3-91)$$

Devient en remplaçant les différents termes par leur valeur :

$$\frac{J}{P} \frac{d^2(\Delta\delta)}{dt^2} + k_s \frac{d(\Delta\delta)}{\omega dt} + k_D \Delta\delta = -(\bar{C}_{em} + C_{ext}). \quad (3-92)$$

Lorsque le couple extérieur ne varie pas (oscillation libre).

$$\frac{J}{P} \frac{d^2(\Delta\delta)}{dt^2} + k_s \frac{d(\Delta\delta)}{dt} + k_D \Delta\delta = 0. \quad (3-93)$$

Lorsqu'une machine synchrone est accouplée à une turbine, le couple appliquée à son arbre n'est pas uniforme il s'écrit comme suite :

$$C_{ext} = \bar{C}_{ext} + \sum_{n=1}^{V-n} C_v \cos \left(v \frac{\omega_m}{p} t + \varphi_v \right). \quad (3-94)$$

La machine synchrone étant supposée à un réseau rigide, la roue polaire va osciller autour de la position moyenne δ_0 en satisfaisant la relation :

$$\bar{C}_{ext} + \bar{C}_{ext} = 0. \quad (3-95)$$

Pour l'harmonique de rang v on a :

$$\frac{J}{P} \frac{d^2(\Delta\delta)}{dt^2} + k_D \frac{d(\Delta\delta)}{dt} + k_s \Delta\delta = C_v \cos v \frac{\omega_m}{p} t. \quad (3-96)$$

Le calcul détaillé indique que l'amplitude des oscillations est maximale une fréquence de résonance f_R égale à :

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{pks}{J} - \frac{1}{2} \left(\frac{pkD}{J} \right)^2}. \quad (3-97)$$

Chaque fois où le couple mécanique n'est uniforme, il faut éviter sérieusement que la fréquence d'un harmonique de rang v du couple moteur ne coïncide avec la fréquence de résonance, sous peine de voir les oscillations prendre des valeurs interdisant toutes marches satisfaisantes. La solution consiste à prévoir un volant de moment d'inertie adéquat.

III-5-1 Analyse du système d'équations numérique

Le problème lié à la résolution analytique, cette méthode est plus aisée lorsqu'il s'agit d'une étude de phénomène transitoire. Il y a plusieurs conditions qui peut provoquer les phénomènes transitoires mais le phénomène qu'on va analyser c'est le phénomène réel du court- circuit brusque dans une génératrice synchrone quelconque. En réalité de rotation de cette dernière n'est plus constante lorsqu'elle est exposée à une perturbation à ces bornes. En effet, la résolution numérique donne une meilleure précision de calcul pour ce phénomène. C'est dans la base de cette résolution que nous devons pencher notre travail. Pour mieux comprendre les essentiels prévus et avant de présenter les organigrammes correspondants, nous décrivons d'abord du problème :

Description du problème

On veut étudier le comportement électrique d'une génératrice synchrone lorsqu'elle subit une perturbation appelée : Court-circuit brusque triphasé.

Au début (juste avant le court- circuit brusque), la génératrice marche à vide avec une condition favorable. Suite à un court- circuit brusque qui débute à l'instant égale à t_0 nous devons savoir la variation des courants au sein des enroulements de la génératrice, puisque

étudier un comportement électrique c'est déterminer la variation des courants dans les enroulements statorique, amortisseurs et excitateurs pour cela, il existe, à l'heure actuelle, plusieurs méthodes de résolution numérique du problème, savoir de : RUNGE-KUTTA, d'ADAMS d'EULER etc. Ici, la méthode de RUNGE-KUTTA est mieux adaptée d'autant plus qu'elle est reconnue par sa précision élevée.

III-5-2 Formulation mathématique du problème

D'après le paragraphe (III-2-4), les équations de tensions d'une génératrice synchrone s'écrivent comme suivant [cf.1] :

$$\left\{ \begin{array}{l} u_d = r_s i_d + \frac{1}{\omega n} \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_m \Psi_q ; \\ u_q = r_s i_q + \frac{1}{\omega n} \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_m \Psi_d ; \\ u_o = r_s i_o + \frac{1}{\omega n} \frac{d\psi_o}{dt} ; \\ 0 = r_D i_D + \frac{1}{c_{ct} n} \frac{d\psi_D}{dt} ; \\ u_f = r_f i_f + \frac{1}{\omega n} \frac{d\psi_f}{dt} \\ 0 = r_Q i_Q + \frac{1}{\omega n} \frac{d\psi_Q}{dt} . \\ \text{Où} \end{array} \right. \quad (3-98)$$

u_d, u_q : Tensions aux bornes des enroulements du stator,

u_f : Tensions aux bornes de l'enroulement d'inducteur,

u_o : Tension aux bornes composantes homopolaire,

$\Psi_d, \Psi_q, \Psi_o, i_d, i_o, i_q$: Flux totalisés et courants des enroulements des phases de stator,

$\Psi_D, \Psi_f, \Psi_Q, i_Q, i_f, i_D$: Flux totalisés et courants des enroulements d'excitation et amortisseurs,

r_s, r_D, r_f, r_Q : Respectivement résistances des enroulements du stator, d'excitations amortisseuses.

D'après Les équations de flux (3-75) à (3-81) on a :

$$\begin{cases} \Psi_d = l_{ad} (i_d + i_D + i_f) + l_{\sigma q} i_d ; \\ \Psi_q = l_{ad} (i_q + i_Q) + l_{\sigma q} i_q ; \\ \Psi_0 = l_o i_o. \end{cases} \quad (3-99)$$

$$\begin{cases} \Psi_D = l_{ad} (i_d + i_D + i_f) + l_{\sigma q} (i_D + i_f) + l_{\sigma D} i_D ; \\ \Psi_f = l_{ad} (i_d + i_D + i_f) + l_{\sigma D f} (i_d + i_f) + l_{\sigma f} i_f ; \\ \Psi_Q = l_{aq} (i_q + i_Q) + l_{\sigma Q} i_Q. \end{cases} \quad (3-100)$$

Transfert d'énergie Hydraulique

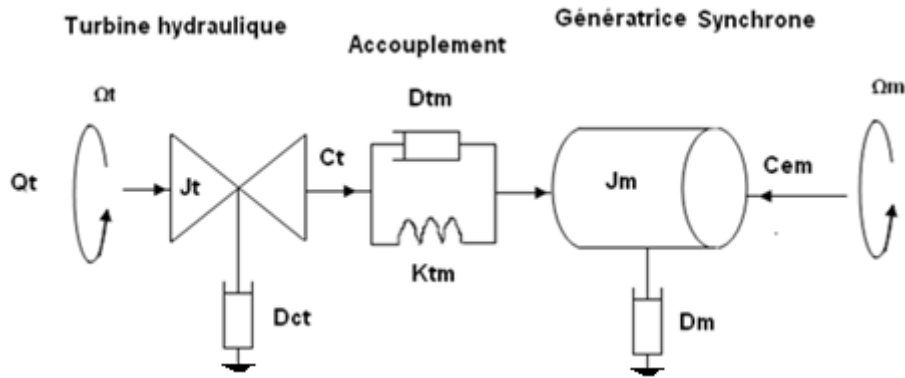


Figure 6-5 : couplage mécanique entre de la turbine hydraulique et la machine synchrone [cf.1].

Toutes les variables du côté de turbine sont ramenées à l'axe rapide. Le couplage mécanique entre de l'hydro turbine et la machine synchrone est ainsi modélisé par trois équations différentielles linéaires.

$$\begin{cases} J_t \frac{d\Omega_t}{dt} = C_{ct} - D_{ct} \Omega_t - C_t ; \\ J_m \frac{d\Omega_m}{dt} = C_{em} - D_m \Omega_m + C_t ; \\ \frac{dC_t}{dt} = K_{tm} (\Omega_t - \Omega_m) + D_{tm} \left(\frac{d\Omega_t}{dt} - \frac{d\Omega_m}{dt} \right) ; \end{cases} \quad (3-101)$$

Avec

$$\begin{cases} \Omega_m = \frac{\omega_m}{p} ; \\ \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_m. \end{cases}$$

III -5-3 Equations d'état de la machine

Après avoir énoncé les objectifs, il faut résoudre les équations qui régissent le fonctionnement de la machine, c'est-à-dire les équations électriques, magnétiques et du mouvement. Ce sont les équations obtenues à partir de la modélisation présentée précédemment. Voici la forme matricielle de l'équation du fonctionnement

$$\begin{pmatrix} l_d & 0 & 0 & l_{ad} & l_{ad} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l_q & 0 & 0 & l_{aq} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l_o & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ l_{ad} & 0 & l_D & l_{ad} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ l_{ad} & 0 & 0 & l_{ad} & l_f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l_{aq} & 0 & 0 & l_Q & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_m/p & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{tm}/p & 0 & -D_{tm} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \\ i_D \\ i_f \\ i_Q \\ C_t \\ \omega_m \\ \Omega t \\ \theta_r \end{pmatrix} ; \quad (3-102)$$

$$= \omega_n \begin{pmatrix} -r_s i_d + \omega_m (l_{ad} (i_q + i_Q) + l_{\sigma q} i_q) \\ -r_s i_q - \omega_m (l_{ad} (i_d + i_D + i_f) + l_{\sigma q} i_d) \\ -r_{sio} \\ r_{DiD} \\ -r_{fif} \\ -r_{QiQ} \\ \Omega t - D_{ct}\Omega t - C_t \\ C_m - D_m \frac{\omega_m}{p} \\ k_{tm}(\Omega t - \frac{\omega_m}{p}) \\ \omega_m \end{pmatrix} + \omega_n \begin{pmatrix} u_d \\ u_q \\ u_o \\ 0 \\ u_f \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} . \quad (3-103)$$

Posons :

$$M = \begin{pmatrix} l_d & 0 & 0 & l_{ad} & l_{ad} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l_q & 0 & 0 & l_{aq} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l_o & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ l_{ad} & 0 & l_D & l_{ad} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ l_{ad} & 0 & 0 & l_{ad} & l_f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l_{aq} & 0 & 0 & l_Q & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_m/p & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{tm}/p & 0 & -D_{tm} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3-104)$$

$$Y' = \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \\ i_D \\ i_f \\ i_Q \\ C_t \\ \omega_m \\ \Omega t \\ \theta_r \end{pmatrix}; \quad (3-105)$$

$$Y = \omega_n \begin{pmatrix} -r_s i_d + \omega_m (l_{ad} (i_q + i_Q) + l_{\sigma q} i_q) \\ -r_s i_q - \omega_m (l_{ad} (i_d + i_D + i_f) + l_{\sigma q} i_d) \\ -r_s i_o \\ r_D i_D \\ -r_f i_f \\ -r_Q i_Q \\ \Omega t - D_{ct} \Omega t - C_t \\ C_m \omega_m - D_m \frac{\omega_m}{p} \\ k_{tm} (\Omega t - \frac{\omega_m}{p}) \\ \omega_m \end{pmatrix}; \quad (3-106)$$

$$C = \omega_n \begin{pmatrix} u_d \\ u_q \\ u_o \\ 0 \\ u_f \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (3-107)$$

Pour avoir la forme convenable à la méthode RUNGE-KUTTA, en voici les équations

$$Y' = AY + B;$$

Avec

$$A = \text{inv}(M); B = \text{inv}(M) * C;$$

Ici, nous nous intéressons sur l'établissement des courbes qui expliquent l'évolution temporelle des grandeurs que l'on veut étudier, en permettant de lire les pointes du courant dans un intervalle de temps donné.

Nous adaptons alors, pour ceci, les conditions et les hypothèses suivant :

- La vitesse du rotor varie brusquement en fonction du temps,
 - Nous ne faisons intervenir, dans les calculs, aucune action des régulateurs,
 - La microcentrale hydraulique développe un couple mécanique constant dans la machine,
- On applique les formules de RUNGE-KUTTA pour déterminer les variations des courants, des vitesses et des couples.

III -5-4 : Résolution numérique d'un système différentiel par la méthode de Runge-kutta.

Etant donné un système différentiel (S) ,nous allons établir un programme de résolution par la méthode de Runge-Kutta.

La méthode Runge-kutta, consiste à évaluer la valeur des fonctions inconnues en un point $t + \Delta t$ connaissant les valeurs des fonctions au point t .

Mise en œuvre de la méthode

Considérons le système (S) ci-dessous

$$(S) \quad \boxed{Y' = AY + B} ; \quad (3-108)$$

Avec

$$Y' = \begin{pmatrix} y_1' \\ y_2' \\ \vdots \\ y_n' \end{pmatrix} \quad A \in \mu_{n,n}(\mathbb{R}) \text{ et } B \in \mu_{n,1}(\mathbb{R}) ;$$

A noter de A et B sont indépendant de t .

Le système (S) est équivalent à :

$$\begin{pmatrix} y_1' \\ y_2' \\ \vdots \\ y_n' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & & a_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} ; \quad (3-109)$$

Posons $y_i = \begin{pmatrix} y_1(t_i) \\ y_2(t_i) \\ \vdots \\ y_n(t_i) \end{pmatrix}$ les valeurs de y à l'instant t_i .

Connaissant y_i , on peut évaluer les valeurs y_{i+1} à l'instant $t_i + \Delta t$ de façon suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} K_1 = AY_i + B ; \\ K_2 = A(Y_i + \frac{\Delta t}{2} \cdot K_1) + B ; \\ K_3 = A(Y_i + \frac{\Delta t}{2} \cdot K_2) + B ; \\ K_4 = A(Y_i + \frac{\Delta t}{2} \cdot K_3) + B ; \\ P = \frac{(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4)}{6} ; \\ \boxed{Y(t_i + 1) = y_1(t_i) + P\Delta t} . \end{array} \right. \quad (3-110)$$

A noter que K_1, K_2, K_3, K_4 et P sont des vecteurs colonnes.

Voici l'organigramme de la méthode Runge-kutta RK4

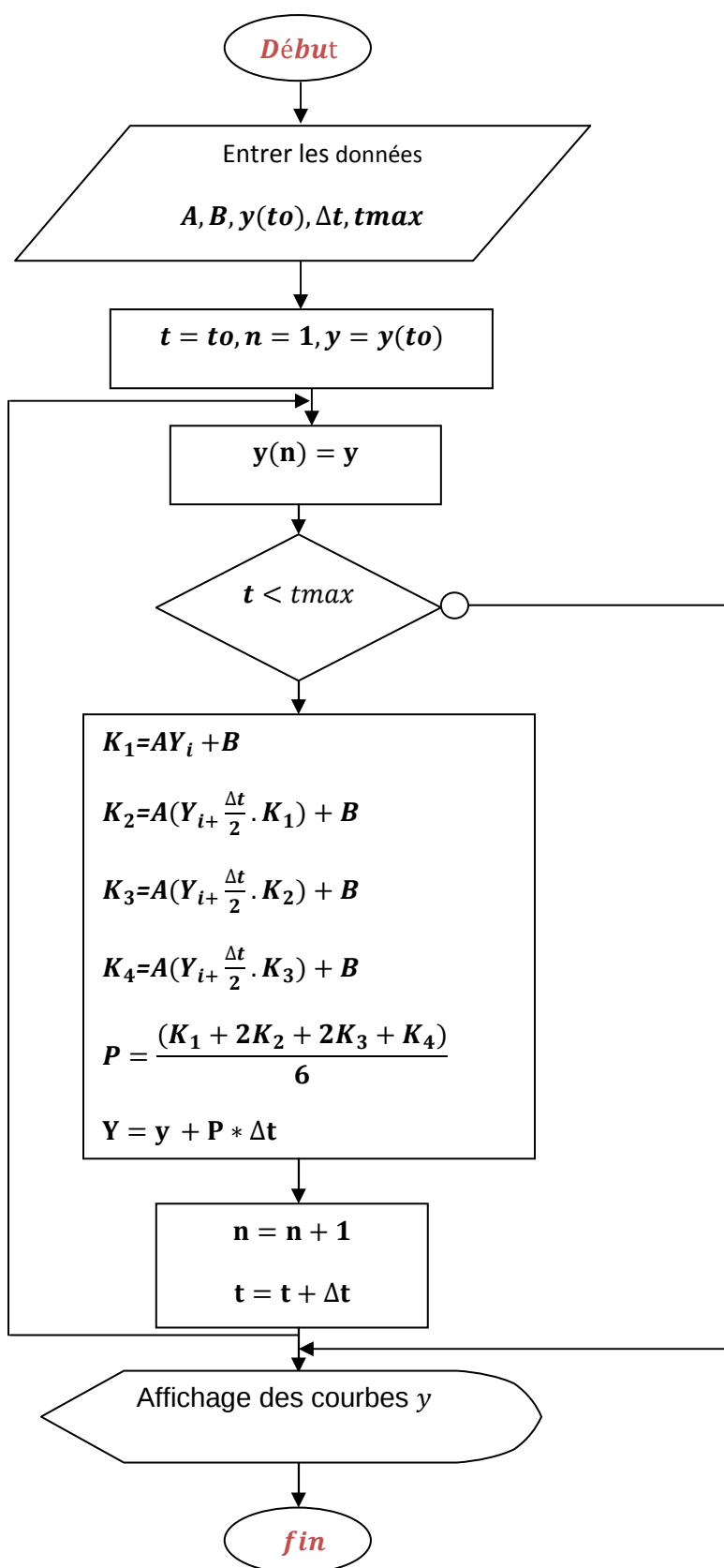


Figure : 6-6 l'Organigramme de la méthode RUNGE –KUTTA

Choix des programmes

Passons à la réalisation des programmes de Cette méthode numérique propose ci-dessus pour trouver la solution et ainsi de D'analyser l'efficacité et la compatibilité de cette méthode.

Effectuons, la programmation en Matlab.

Notons que le logiciel Matlab intègre la mathématique, l'informatique ; la visualisation et un langage puissant qui fournit un environnement flexible pour toute technique informatique.

De plus, le Matlab inclut des outils pour :

- acquisition de la donnée,
- analyse de la donnée et exploration,
- visualisation et traitement de l'image,
- Prototype de l'algorithme et développement,
- Modélisation et simulation,
- Programmation et simulation,
- modélisation et traitement,
- programmation et développement de l'application.

C'est grâce à cette performance, sa souplesse qu'on a décidé d'effectuer les programmes en Matlab.

III-6-1 : Les paramètres et caractéristiques de la microcentrale hydraulique sont les suivantes.

Plaque signalétique :

Puissance : 15KW ;
Débit d'eau (nominal) : $60\text{l/s}=0.06\text{m}^3/\text{s}$;
Hauteur utile : 32m ;
Canal d'amenée : $L=180\text{m}$;
Conduite forcée : Pelton à un seul jet ;
Génératrice : synchrone triphasée, 1500tr/min.

Turbine :

Pelton PT4 mono jet ;
Puissance au débit de l'équipement 16.3KW ;
vitesse de rotation nominale, 411tr/min ;
vitesse d'emballement, 740tr/min ;
Débit, 60 litre/s ;

Génératrice :

Synchrone auto régulée, auto excitée ;
400V/230V ;
 $S_n=20\text{KVA}$;
 $F_n=50\text{HZ}$;
 $N_n=1500\text{tr/min}$;
 $N_{\text{max}}=2700\text{tr/min}$.

II-6-2 : Les résultats du programme

D'après la résolution numérique précédente, on a obtenu des courbes et des allures de courant de court-circuit. Puisque l'étude est de phénomène transitoire d'une génératrice entraînée par la turbine hydraulique, à l'instant $t_0 = 0s$ à eux un court-circuit (Court- circuit brusque). Comme notre problème possède dix équations à dix inconnues, les résultats devront être de dix allures mais l'étude est basée sur comportement électrique et la détermination de la variation des courants dans les enroulements statorique, rotorique (amortisseurs et excitateurs). Donnons les résultats traduisant les variations des courants de court- circuit par rapport à la valeur du pas d'intégration $dt = 0.1$, $t_0 = 0s$ et $t_{max} = 12s$.

Voici les courbes représente les résultats du programme

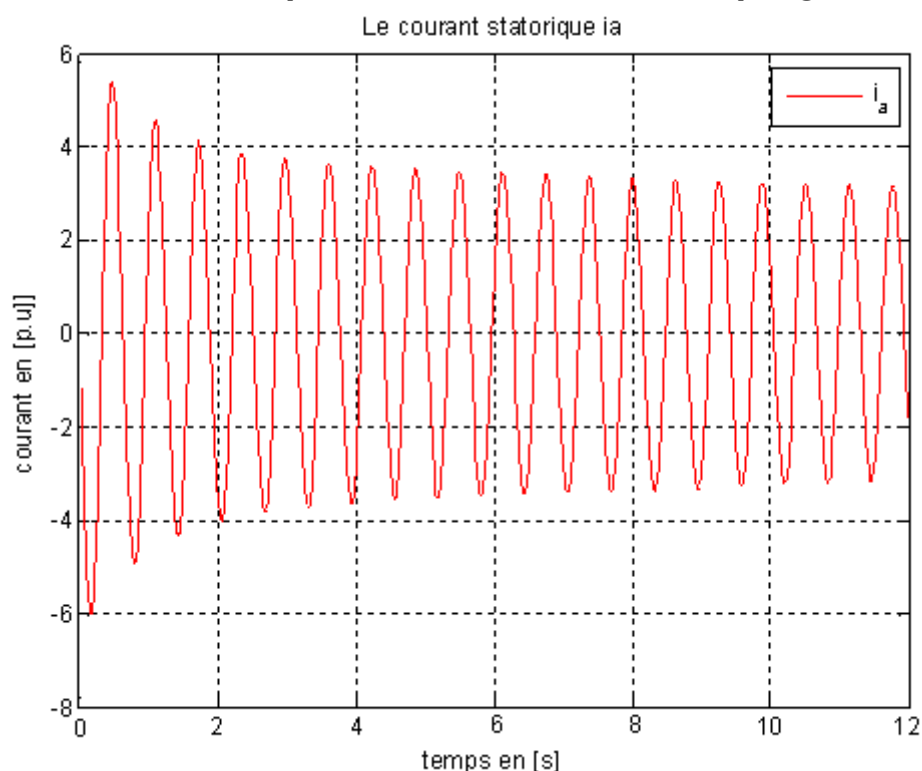


Figure : 7-1 Courant de phase statorique i_a .

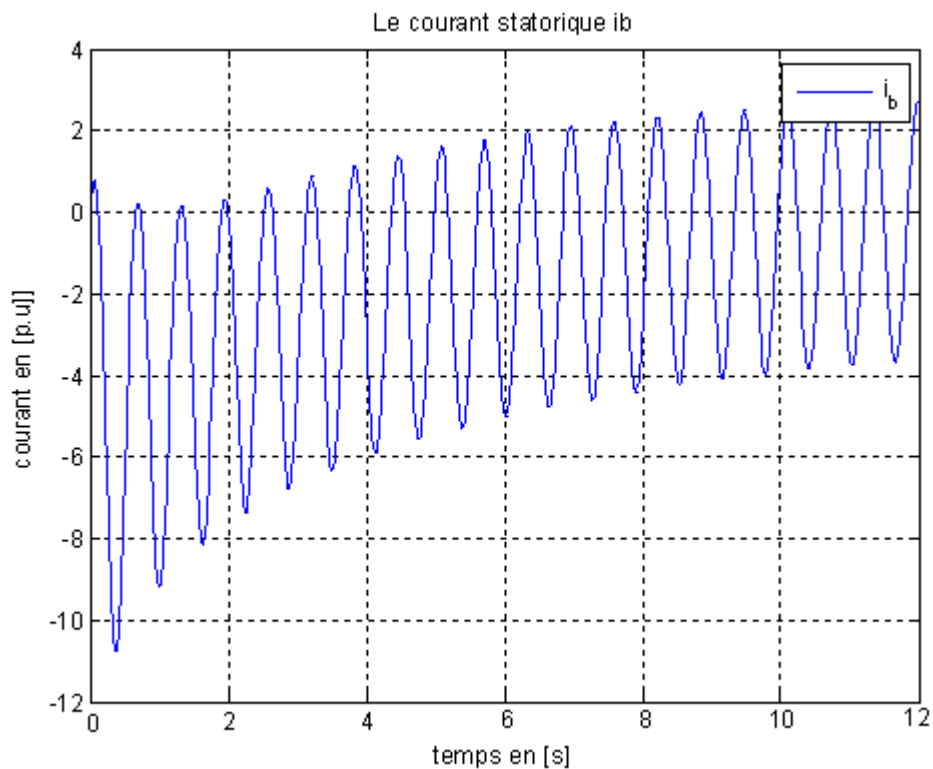


Figure : 7-2 Courant de phase statorique i_b .

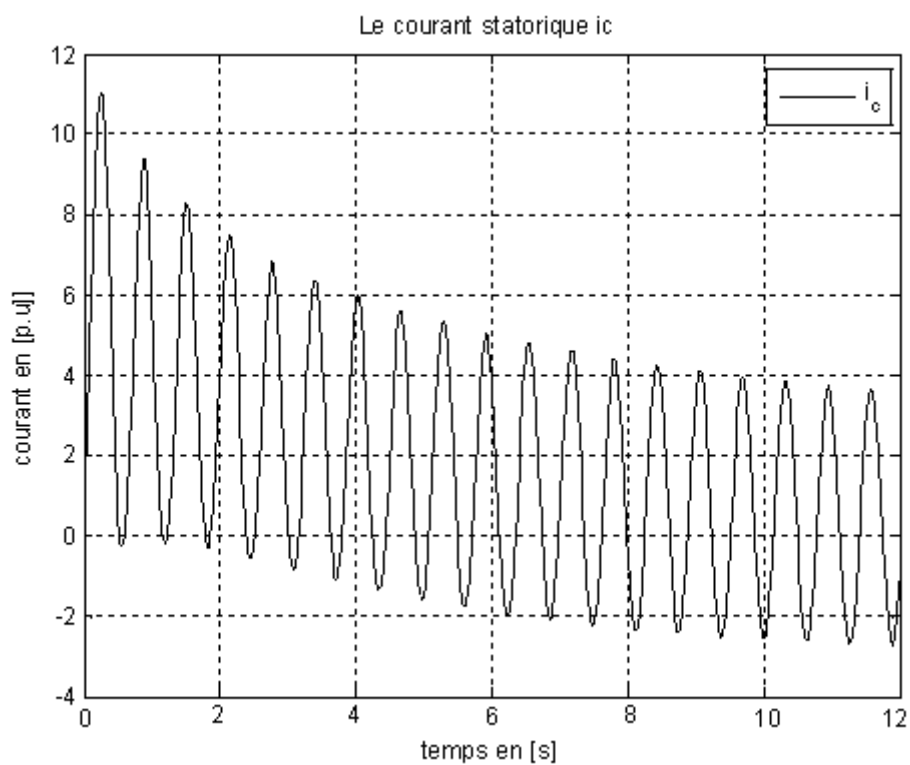


Figure : 7-3 Courant de phase statorique i_c .

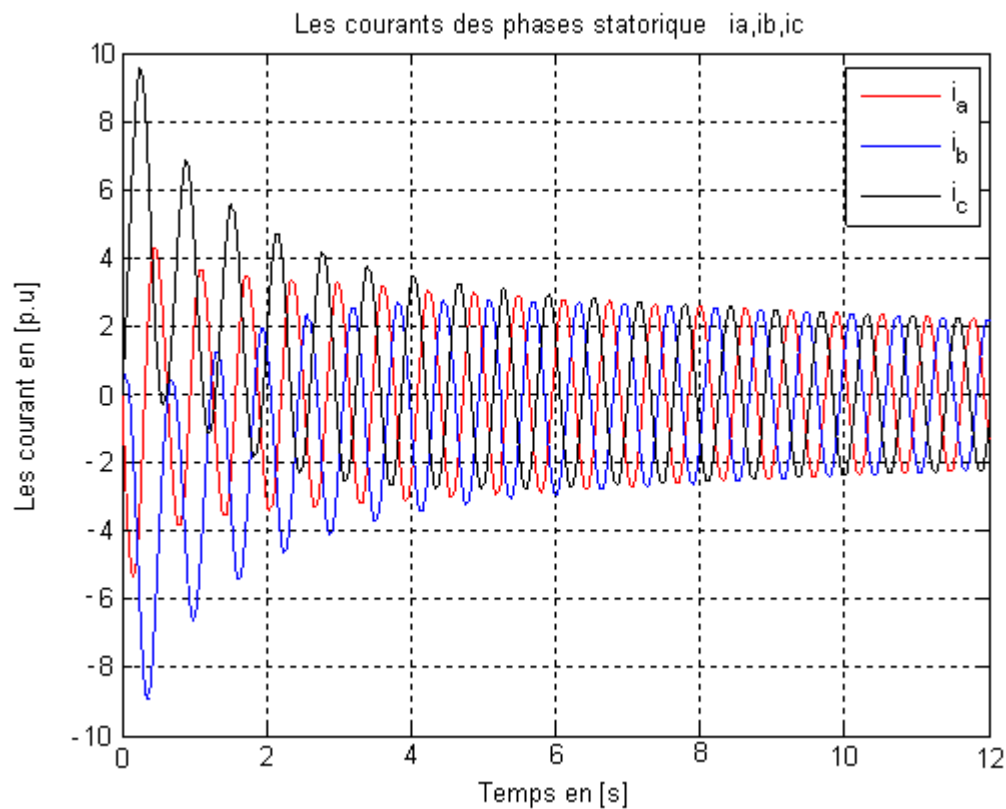


Figure : 7- 4- Les Courants des phases statorique i_a , i_b , i_c .

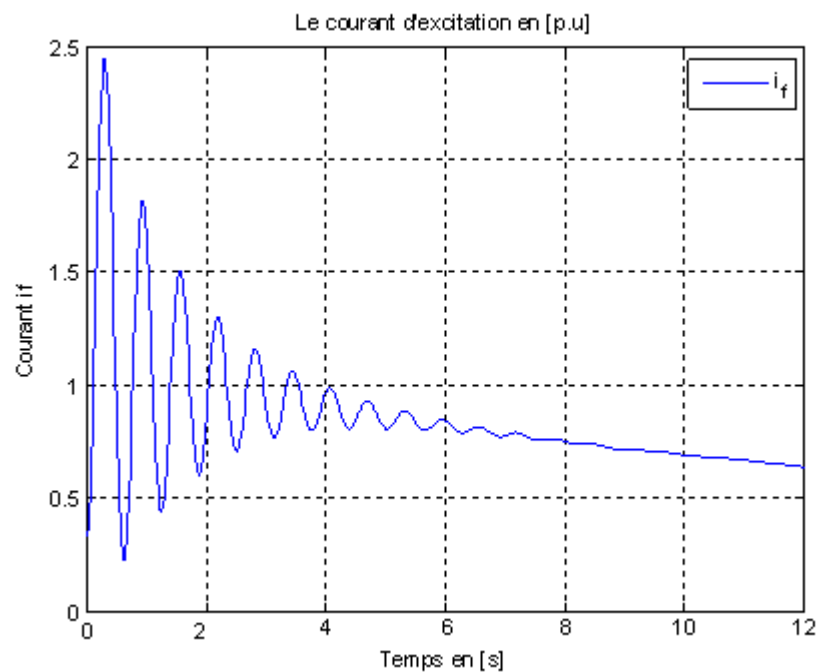


Figure : 7- 5 Courant d'excitation i_f .

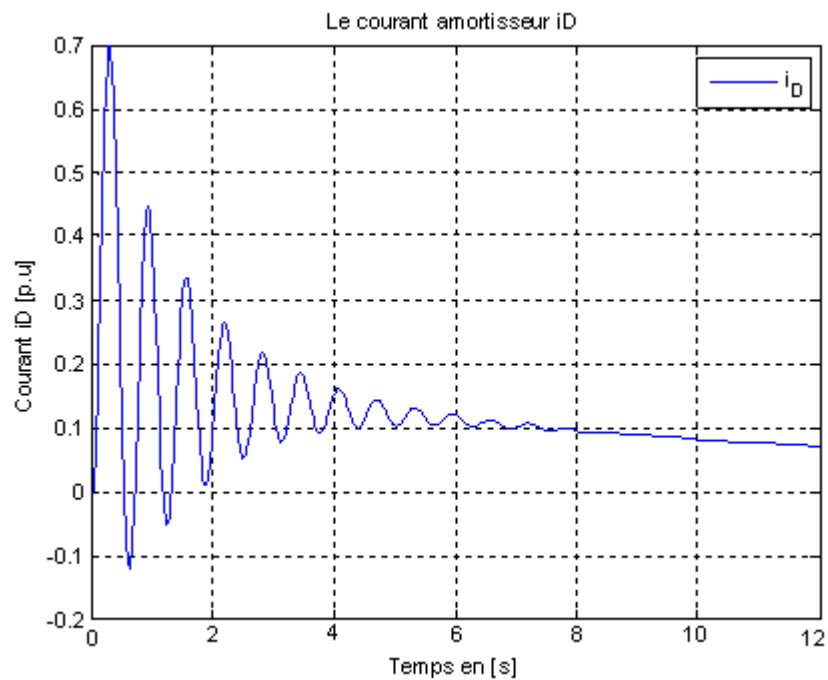


Figure : 7-6 Courant d'amortissement i_D .

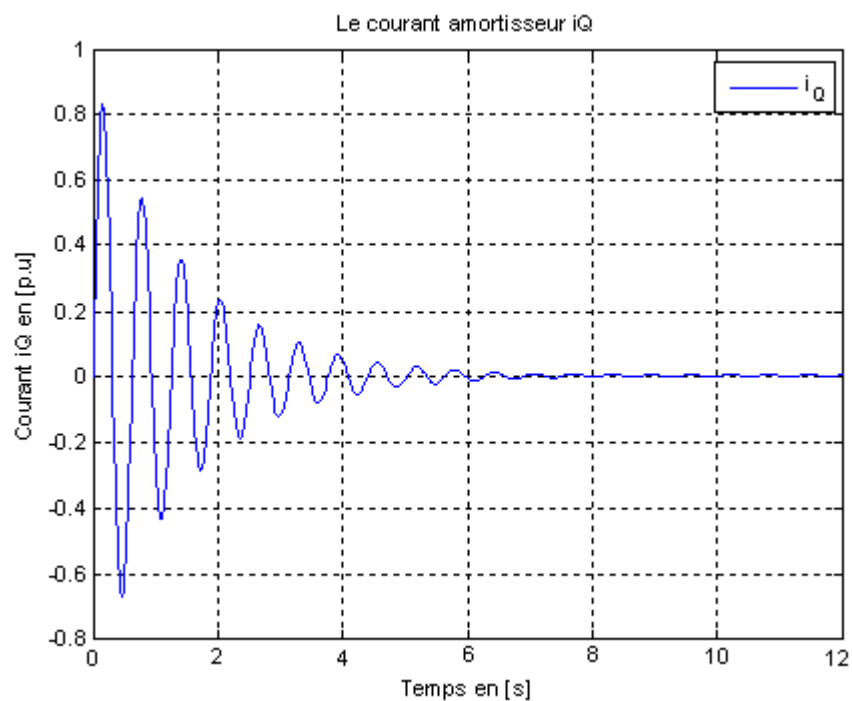


Figure : 7-7 Courant d'amortissement i_Q .

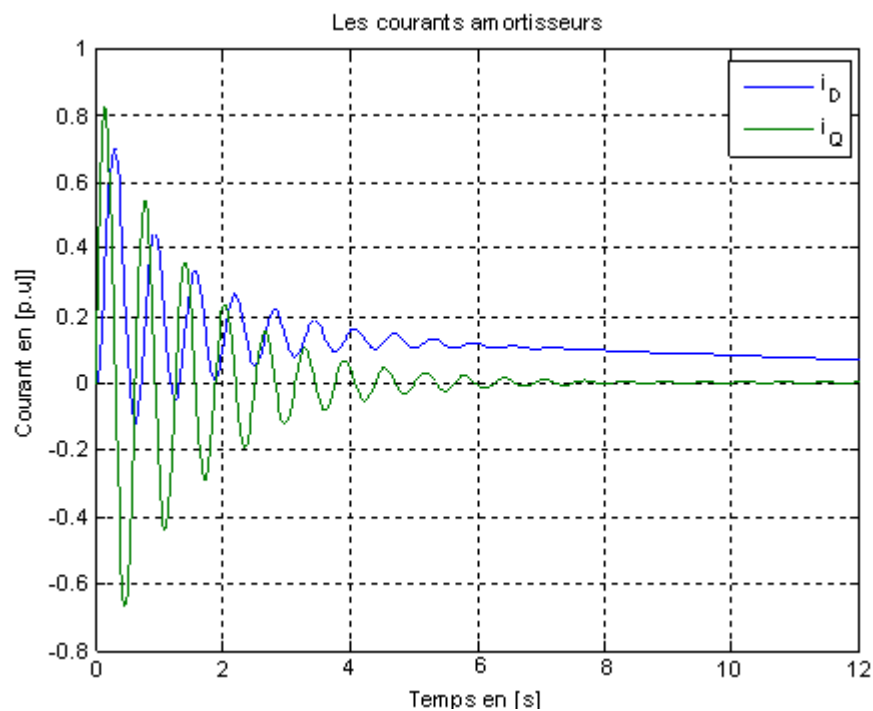


Figure : 7- 8 les Courants d'amortissements i_D et i_Q .

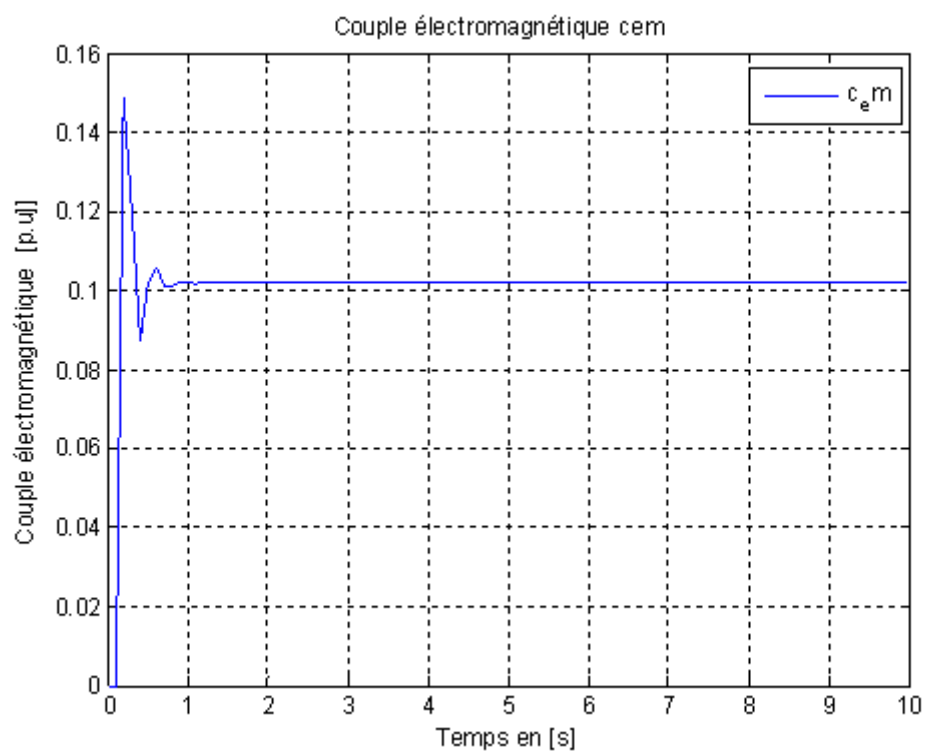


Figure : 8-1 Couple électromagnétique C_{em} .

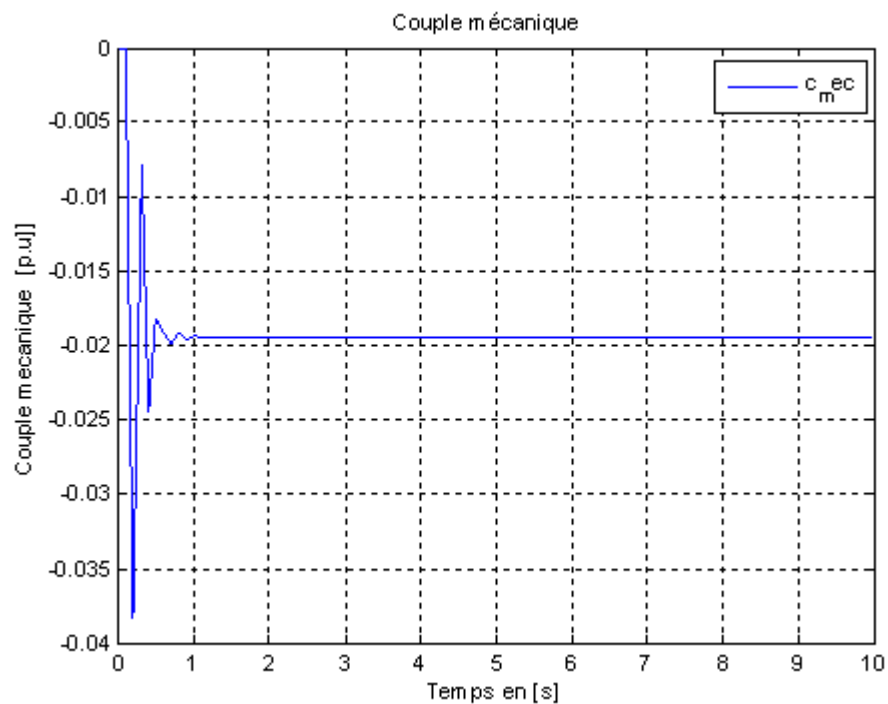
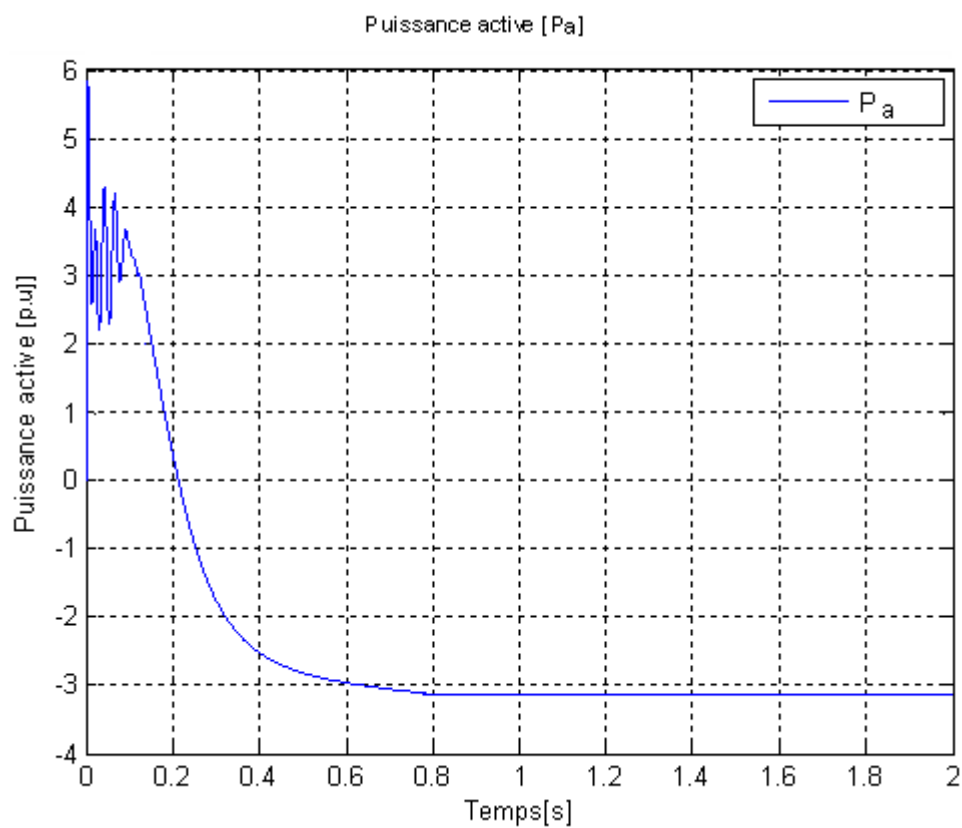
Figure : 8-2 Couple mécanique C_{mec} 

Figure : 8-3 Puissance active P

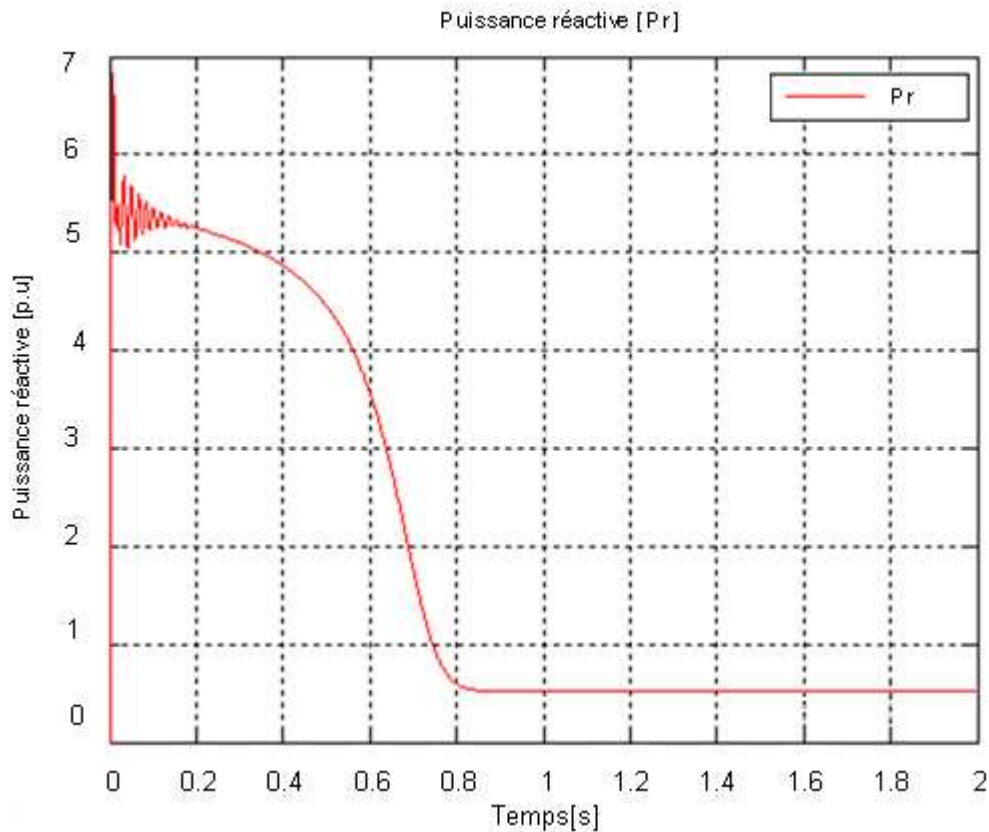


Figure : 8-4 Puissance réactive Q

III-6-1-3- Analyse des résultats :

D'après les différentes allures des courants obtenus on trouve que :

- ✓ Le programme a nécessité une grande mémoire, ainsi l'ordinateur peut consacrer le résultat qui peut être lent et peut prendre quelques temps, voire quelques minutes.
- ✓ Les courants de court-circuit s'amortissent avec constante de temps d'amortissement.
- ✓ Plus on augmente la valeur de courant d'excitation initiale if_0 , plus les sauts de courants rotorique augmentent par exemple $if_0=0,34$ pu, les pics des courants rotorique $if=2,5$ pu, $iD=0,7$ pu et $iQ=0,8$ pu pour $if_{01}=1$ pu, les pics $if_1= 7,2$ pu , $iD_1=2,1$ pu et $iQ_1=2,5$ pu .Donc la position, la forme et le caractéristique de la solution des courbes dépend énormément des conditions initiales imposées pendant la résolution de la programmation. Donc le choix de condition initiale tient une grande importance.
- ✓ Lors des court-circuits, les courants continus d'excitation et des amortisseurs deviennent des courants alternatifs de grandes valeurs dans un intervalle de temps limité, mais lorsque les courants de court- circuit disparaissent, ces courants redeviennent continus.

On sait que, théoriquement la valeur du courant de court-circuit est égale à **10** ou **15** fois plus grande que la nominale mais d'après les courbes obtenues la valeur du courant de court- circuit est égale **5 à 6** fois plus grands que la nominale.

Pour varier la forme des courbes, plus on augmente le pas d'intégration dt et le t_{max} on aperçoit le régime permanent mais l'amplitude ne varie pas, la pulsation varie.

Pour avoir les courants des phases statoriques ia , ib et ic , d'après le paragraphe III-2-1 et l'équation (3-10) et (3-12) pour id , iq , et io on rend à la forme originale.

Les équations en fonction de θ car θ est un angle de décalage, $\theta_0=0$ pour ia , $\theta_0 - 2\pi/3$ pour ib , $\theta_0 - 4\pi/3$ pour ic . Pour les courants rotorique, les allures des amortisseurs lorsque la machine fonctionne comme à pôle saillants iD et iQ n'ont pas la même allure (amplitude) , lorsque la machine fonctionne comme à pôle lisses iD égale iQ .

Le courant de court-circuit se disparaît au bout du temps $t=4s$ soit après 100 tours de la machine (rotor). Ce court-circuit se disparaît moins vite. Lorsque le temps de court-circuit est large il est dangereux pour les appareils.

D'après les figures 8-3 et 8-4 le générateur absorbe la puissance réactive et il fournit la puissance active, c'est pour cela que la puissance active est négative et la puissance réactive positive.

On remarque :

Plus le t_{max} est grand, plus l'intervalle convergence diminué donc on peut dire la convergence dépend non seulement du pas d'intégration mais aussi de la valeur du t_{max} .

Si t_{max} est grand, on remarque que les allures se rétrécissent de plus en plus et l'amplitude a la même forme mais la pulsation varie à chaque fois que varie le pas d'intégration et le .

Chapitre IV : Implication pédagogique

IV-1 Introduction

L'école Supérieure pour l'Enseignement Technique (ENSET) est une école de formation pour les futurs enseignants de Lycées Technique.

Ainsi, les étudiants de cette école doivent avoir une volonté d'entrer dans le domaine d'enseignement et de donner le meilleur d'eux même sur l'amélioration de ce métier durant leur vie.

Aussi, en tant que normalien l'étudiant doit savoir développer et appliquer son travail de mémoire de fin d'études au programme scolaire de lycées techniques. Plus précisément, le travail de l'étudiant doit viser l'amélioration et le développement de l'enseignement en proposant des thèmes ou des techniques d'enseignement au besoin de l'éducation.

Ceci est le devoir prioritaire de l'élève normalien.

En effet, l'introduction de l'implication pédagogique est très importante dans la mémoire de fin d'étude. Un élève normalien ne doit jamais négliger cette partie dans son travail. C'est pourquoi, dans cette dernière partie, on a introduit cette séquence pédagogique.

Dans ce chapitre, nous allons essayer de développer le thème sur l'étude d'un alternateur synchrone triphasé en proposant l'aperçu théorique, des exercices d'application et des sujets de T.P

Thème 1

IV-1 Etude théorique d'une génératrice synchrone triphasée

Objectif :

- Améliorer l'apprentissage des machines synchrones au sein de lycée technique ;
- Savoir déterminer les différentes grandeurs et reconnaître les éléments caractéristiques d'un alternateur triphasé ;
- Entraîner les élèves aux différents types d'exercices sur les machines synchrones.

Classe : 3^{ème} Année Electrotechnique (E.L) au Lycée Technique.

Durée : 3h de temps

Matière : Électrothèque

Prérequis : avant d'entamer de cette thème les élèves doivent avoir une notion de la machine synchrone.

Moyen : tableaux, règles, craies de couleur, photocopiés.

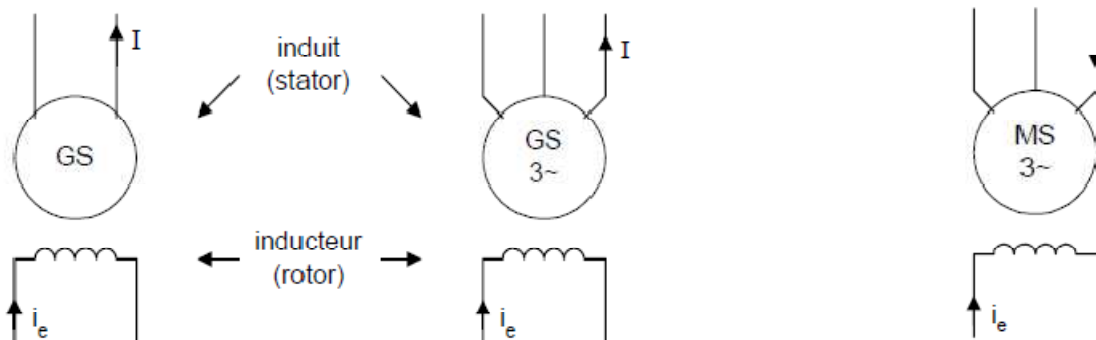
IV-1-1 Récapitulation du cours

Ce cours est un résumé du cours des machines synchrones de 3^{ème} année E.L, qui résume les fonctionnements et les caractéristiques d'une génératrice synchrone triphasée.

Une machine synchrone triphasée est symbolisée par la figure suivante :

l'alternateur est aussi appelé génératrice synchrone

Moteur synchrone :



D'après la formule de Boucherot la f.é.m. induite est déterminé par la relation suivante :

$$E = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot N \cdot f \cdot k_b \cdot \phi_M \quad (4-1)$$

Où E : f.é.m. induite

N : Nombres de spires d'enroulements

f : fréquence

K_b : Coefficient de bobinage

ϕ_M : Flux maximal

Flux maximal (en Weber) a pour l'expression suivante :

$$\phi_M = 2 \cdot L \cdot \frac{R}{P} \cdot B_M \quad (4-2)$$

L : longueur de l'entrefer

R : rayon de l'entrefer

P : nombre de paires de pôles

B_M : Flux maximal

Coefficient de bobinage est déterminé par la relation suivante :

$$K_b = K_d \cdot K_i \cdot k_r \quad (4-3)$$

Avec K_d : coefficient de distribution

K_i : Coefficient de distribution d'inclinaison des encoches

K_r : Coefficient de raccourcissement

On peut représenter les différentes pertes par la figure suivante :

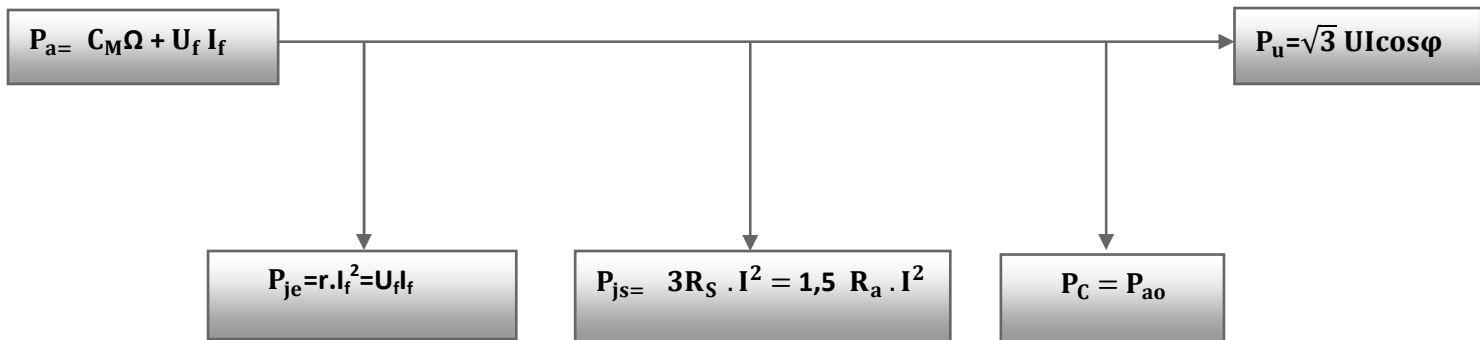


Figure 4-4 Bilan énergétique d'un alternateur synchrone

Les différentes pertes sont déterminées par les relations suivantes :

$$-P_{em} = C \cdot \Omega \quad (4-4)$$

P_{em} : Puissance mécanique reçue par le moteur d'entraînement

C : Couple électromagnétique

Ω : vitesse angulaire

$$-P_f = m \cdot R_f \cdot I_f^2 \quad (4-5)$$

Avec P_f : pertes d'enroulement d'excitation

m : Nombre de phase égal à 3

R_f : Résistance de l'enroulement d'excitation

I_f : Courant d'excitation

$$-P_{el1} = m \cdot R \cdot I^2 \quad (4-6)$$

P_{el1} : Pertes électriques dans l'enroulement d'induit

R : Résistance de l'enroulement d'induit

I : Courant de l'enroulement

$$-P_{ext} = P_2 - \frac{P_f}{\eta} \quad (4-7)$$

Avec : η : rendement en %

P_2 : Puissance absorbée

P_{ext} : Puissance fournie au rotor

$$-\eta = \frac{P}{P_2} = 1 - \frac{\Sigma P}{P + \Sigma P} \quad (4-8)$$

Où η : rendement en %

$$\Sigma P = P_{em} + P_{fer} + P_f + P_{joule} + P_{supplémentaire} \quad (4-9)$$

Avec ΣP : Somme de pertes

$P_{supplémentaire}$: Pertes supplémentaires

$$-P = m. UI. \cos \varphi \quad (4-10)$$

P : Puissance délivrée par l'alternateur

U : Tension en (v)

I : Courant en (A)

$\cos \varphi$: Facteur de puissance

Couple électromagnétique est déterminé par la relation suivante

$$M = \frac{P_{em}}{\Omega} \quad (4-11)$$

Où

$$\Omega = 2\pi n$$

Avec : n : vitesse de rotation en (tr/mn).

Le schéma équivalent à un enroulement d'une génératrice synchrone est représenté par la figure ci-dessous :

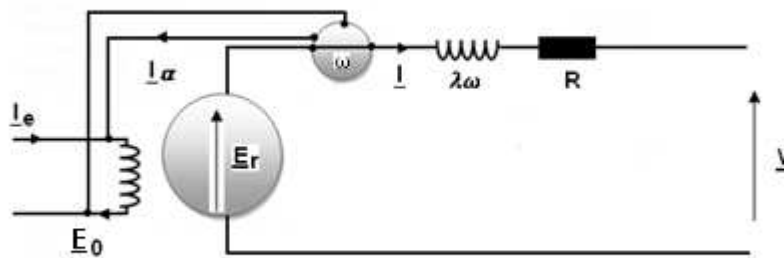


Figure4-5 : Schéma équivalent à un enroulement d'une génératrice synchrone.

D'après ce schéma équivalent, les équations aux tensions et aux intensités s'écrivent :

$$\begin{cases} V = E_0 - RI - j\lambda\omega I \\ I_{e0} = I_e + aI \\ E_r = E_0 - jL\omega I \end{cases} \quad (4-12)$$

Avec

$$l\omega = \lambda\omega + L\omega \quad (4-13)$$

Où

$\lambda\omega$: Réaction de fuite

l : Réaction synchrone

E_r : F.é.m. induite par champ glissant

E_0 : F.é.m. qui serait induite à vide lorsque l'excitation est fournie par le courant d'excitation I_e .

IV-1-2 Travaux dirigés

a- Exercice

Les deux parties **A** et **B** sont indépendantes.

A- Un alternateur triphasé hexa polaire possède 72 encoches, toutes occupées par trois brins de conducteurs. Les encoches sont inclinées d'un pas d'encoches.

L'entrefer peut être assimilé à une portion de cylindre de diamètre $D=64\text{cm}$ et de longueur $L=85\text{cm}$.

1. Chaque enroulement de la machine doit fournir une f.é.m. de valeur efficace 1800V et à une fréquence 50 Hz.

Calculer le coefficient de bobinage de K_b

En déduire le flux d'un pôle de la roue polaire et la valeur maximale du champ magnétique l'entrefer.

2. la roue polaire ne produit pas un champ de vecteurs à répartition sinusoïdale dans l'espace.

On pourra admettre qu'en plus du champ sinusoïdal calculé à la question précédente, et d'amplitude maximale B_{M1} , le rotor produit deux champs harmoniques, de rangs 3 et 5 d'amplitude B_{M3} et B_{M5} telles que $B_{M3} = \frac{1}{4} B_{M1}$, $B_{M5} = \frac{1}{7} B_{M1}$.

Calculer la fréquence f_3 et f_5 correspondant à ces champs d'harmoniques.

B- la tension entre phases d'un alternateur triphasé couplé en étoile est égale à 13KV, il

Débite un courant d'intensité efficace 6 KA dans la charge triphasée équilibrée dont le Facteur de puissance est 0,85.

1. Quelles sont les puissances actives, réactives et apparentes de la charge ?

2. Sachant que le rendement de l'alternateur atteint 98%.

Calculer la puissance qu'il a absorbée.

3- Dans cette condition de fonctionnement, déterminer les pertes de puissance de l'alternateur.

b-Solution de l'exercice1 :

A -1 Calcul de coefficient de bobinage K_b .

On sait que

$$K_b = K_d \cdot K_i \cdot K_r$$

Avec

$$K_d = \frac{\sin \frac{Zp\varepsilon}{2}}{\frac{Zp\varepsilon}{2}} \quad (4-14)$$

$$\text{Où } Z = \frac{N}{2 \cdot pm} = \frac{72}{3 \cdot 6} = 4$$

Z : Nombre d'encoches successives utilisées par un enroulement sous un pôle.

N : Nombre d'encoche.

$$\varepsilon = \frac{2\pi}{N_e} = 0.0872 \text{ rad}$$

ε : Distance angulaire entre deux encoches successives en (rad),

N_e : Nombre d'encoches inclinées d'un pas d'encoches.

D'où

$$A.N K_d = \frac{\sin \frac{12 \cdot 0.0872}{2}}{\frac{12 \cdot 0.0872}{2}} \quad (4-15)$$

$$K_d = 0.9576$$

$$K_i = \frac{\sin \frac{p\gamma}{2}}{\frac{p\gamma}{2}} \quad (4-16)$$

Avec γ : angle d'inclinaison d'une encoche.

Où $\gamma = \varepsilon$ car les encoches sont inclinées d'un pas d'encoches.

$$A.N K_i = \frac{\sin \frac{3 \cdot 0.0872}{2}}{\frac{3 \cdot 0.0872}{2}}$$

$$k_i = 0.99715$$

$$-K_r = \left| \cos \frac{p\beta}{2} \right|$$

β : écart entre l'ouverture angulaire d'une spire des enroulements et le pas des pôles en (rad).

Car les deux conducteurs d'une spire sont situés à $3 \cdot Z = 12$ pas d'encoches l'un de l'autre, tandis que deux pôles successifs sont distincts de $\frac{\pi}{p}$.

$$A.N K_r = |\cos 0|$$

$$K_r = 1$$

Enfin

$$K_b = K_d \cdot K_i \cdot K_r$$

$$K_b = 0,9576 \cdot 0,99715$$

$$K_b = 0,95493$$

Calcul de flux d'un pôle de la roue polaire :

Or

$$E_1 = 2,22 N \cdot f \cdot k_b \cdot \Phi_{M1}$$

$$\Phi_{M1} = \frac{E_1}{2,22 N \cdot f \cdot k_b} \quad (4-16)$$

Avec N : nombre de conducteur moitié en série dans un enroulement, sachant que toutes les encoches contiennent 3 conducteurs et qu'il y a 3 enroulements.

Alors

$$N = \frac{3N_e}{3} = 72 \text{ conducteurs}$$

Ainsi

$$A.N \Phi_{M1} = \frac{1800}{3,22 \cdot 72 \cdot 50 \cdot 0,955}$$

$$\Phi_{M1} = 0,236 \text{ Wb}$$

Détermination de valeur maximale.

Or

$$\Phi_{M1} = 2 \cdot L \cdot \frac{R}{p} \cdot B_M$$

Donc

$$B_{M1} = \frac{p \Phi_{M1}}{2 \cdot L \cdot R}$$

$$A.N: B_{M1} = \frac{3 \cdot 0,236}{2 \cdot 0,85 \cdot 0,32}$$

$$B_{M1} = 1,37 \text{ T}$$

2- Calcul des fréquences f_3 et f_5

$$f_3 = \frac{\omega_3}{2\pi} \quad (4-17)$$

ω : Pulsation en rad/s

Avec

$$\omega_3 = p_3 \cdot \Omega = \frac{p_3}{p_1} \cdot \omega \text{ Car } \Omega = \frac{\omega}{p}$$

$$\omega_3 = 3\omega$$

Alors

$$- f_3 = \frac{\omega_5}{2\pi} \quad (4-18)$$

$$f_3 = 150 \text{ Hz}$$

$$- f_5 = \frac{\omega_5}{2\pi} \quad (4-19)$$

$$- f_3 = 250 \text{ Hz}$$

B-1 : Détermination des puissances active, réactive et apparente.

Or

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

$$A.N: P = \sqrt{3} \cdot 13 \cdot 6 \cdot 0.85 \cdot 10^6$$

$$P = 114.83 \text{ MW}$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

$$A.N Q = \sqrt{3} \cdot 13 \cdot 6 \cdot 0.85 \cdot 10^6$$

$$Q = 71.168 \text{ M.V.A.R}$$

(4-20)

On sait que

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

(4-21)

$$A.N S = \sqrt{3} \cdot 13 \cdot 6$$

$$S = 135.10 \text{ M.V.A}$$

2. Détermination de puissance absorbé

Or

$$\eta = 1 - \frac{\sum P}{P_u + \sum P}$$

$$\text{Avec } P_a = P_u + \sum P$$

Alors on a

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

$$P_a = \frac{P_u}{\eta}$$

$$P_a = \frac{114.83 \cdot 100}{98.5}$$

3. Détermination des pertes de puissance de l'alternateur

$$\text{Or } n = 1 - \frac{\sum P}{P_u + \sum P};$$

$$= \frac{P_u}{P_u + \sum P};$$

$$\eta(P_u + \sum P) = P_u;$$

Donc

$$\eta \sum P = P_u - \eta P_u$$

$$\sum P = \frac{P_u - \eta P_u}{\eta}$$

$$\sum P = \frac{114.83(1-98.5)}{98.5}$$

$$\sum P = 1.74 \text{ MW}$$

c- Exercice 2

On considère un alternateur monophasé avec un circuit magnétique non saturé ayant les caractéristiques suivantes :

$U=380\text{V}$; $f=60\text{Hz}$; $n=900\text{tr/mn}$; $R=0.02$

Lorsque le courant vaut 9A, la tension à vide égal à 420V. De plus, pour un courant d'excitation 5A, le courant de court-circuit est égal 307A.

1. Déterminer le nombre de pôles de l'alternateur

2. Déterminer la réactance X_s

3. Le facteur de puissance de l'installation étant de 0.9, trouver les f.é.m. E_s et E_0 après avoir donné $U=380\text{V}$ et $I=120\text{A}$ en utilisant le diagramme de **Fresnel**.

D-Solution de l'exercice 2 :

1. Détermination du nombre de pôle

$$n = \frac{60f}{p}; \quad (4-22)$$

$$p = \frac{60f}{n};$$

$$\text{A.N: } p = \frac{60 \cdot 60}{900};$$

$$p = 4.$$

2. Calcul de la réactance X_s

$$\text{Or } X_s = \frac{E_0}{I_{cc}} \quad (4-23)$$

Où X_s : réactance

I_{cc} : Courant de court-circuit

$$I_{exc} = 5A \longrightarrow I_{cc} = 307 A$$

$$I_{exc} = 9A \longrightarrow I_{cc} ?$$

$$I_{cci} = \frac{307,9}{5}$$

$$I_{cci} = 552,6A$$

$$\text{Comme } X_s = \frac{E_0}{I_{cc}}$$

$$\text{A.N } X_s = \frac{420}{552,6}$$

$$X_s = 0.76\Omega$$

3. Détermination de E_s et E_0

Construisons le diagramme vectoriel

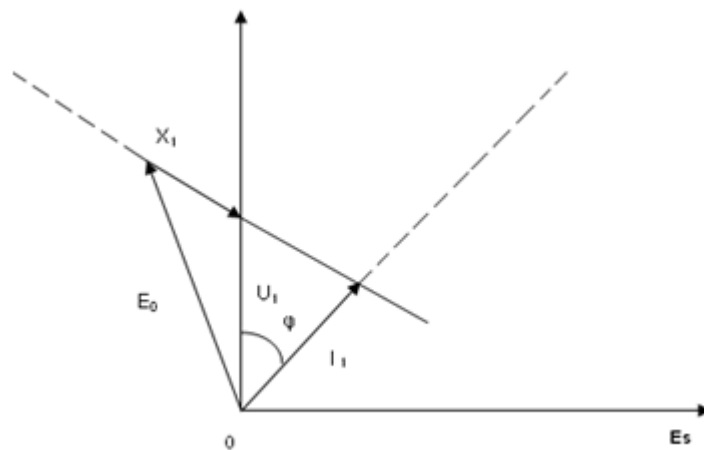


Figure 4.6 : Diagramme vectoriel

Avec ce diagramme on a

$$E_s = X_s \cdot I_i$$

$$\text{A.N } E_s = 0.76 \cdot 120$$

$$E_s = 91.2 V$$

Graphiquement on peut tirer que.

$$E_0 = 440 V$$

Thème 2 :

IV-2 : Réflexion sur l'enseignement des machines électriques aux Lycées.

Actuellement, les machines électriques occupent une place importante dans l'industrie et dans la vie quotidienne ; leur utilisation favorise et garantit le développement de plusieurs secteurs d'un pays.

Le développement d'un pays dépend certainement du système éducatif qui existe. C'est la raison pour laquelle, on doit lancer l'apprentissage sur l'étude d'une machine synchrone dès le plus bas niveau possible.

Le programme scolaire prévoit cette étude en classe de 3^{ème} année E.L aux Lycées Techniques.

L'élève doit être capable d'identifier, d'analyser le fonctionnement des machines électriques et aussi leur dimensionnement.

En d'autres termes, il doit être capable de résoudre les problèmes tant théoriques que pratiques. Ce que nous voulons mettre en cause est la façon comment la discipline en question est enseignée. Les enseignants concrétisent-ils le problème ou se contentent-ils de donner les problèmes « tout faits, voir à moitié résolus » ?

Le professeur a-t-il atteint le but de cet apprentissage ?

En effet, analysons cet enseignement par rapport aux types d'exercices souvent proposés aux élèves.

Soit l'exercice suivant :

A- Exercice

Soit l'alternateur synchrone triphasé à pôles lisses avec un enroulement d'induit couplé en étoile et dont les paramètres sont suivants :

- Nombres de spires dans chaque phase $N_1=520$;
- facteur de bobinage $k_b=0.96$;
- fréquence $f=50$ Hz ;
- $S_n=100$ K.V.A ;
- tension nominale $U_n=380/220V$

La charge est à caractère inductif avec $P_{ch} = 70KW$ et $\cos \varphi = 0.8$. Les chutes de tension relative dans les circuits de l'induit sont respectivement $u_i = 100\%$; $u_{si} = 20\%$; $u_r = 20\%$

- a) Déterminer les paramètres du schéma équivalent $R_i, X_i, X_{\partial i}$.
- b) A partir de diagramme vectoriel, déterminer la f.é.m. E_0 et la f.é.m. E_s .
- c) Déterminer la force magnétomotrice de réaction d'induit.
- d) Déterminer l'angle de charge θ et l'angle ψ_1 .
- e) Calculez le flux Φ de la machine.

B- Analyse

Normalement, les élèves n'ont aucune difficulté pour traiter ce type d'exercice. Mais la question qui se pose, est-ce qu'ils en savent, la signification, l'utilité et l'importance de ce qu'ils viennent de faire ?

Dans la majorité des cas, la réponse est négative. Et comme nous pouvons l'imaginer, ce fait influe négativement sur la motivation et la volonté des élèves.

Ce qui est à remarquer est que l'enseignement des disciplines (matières) scientifiques, y compris les machines électriques, est le manque de pratique.

Or, le but de l'apprentissage est qu'à la sortie du lycée ou de l'université les élèves doivent être capables de poursuivre les études et/ou de s'intégrer dans la vie active et professionnelle.

C- Suggestion

Comme nous le savons, les élèves de lycées techniques ou des universités bénéficient du cours de machine synchrone.

A part de l'étude théorique (E.T) et l'étude dirigée (E.D) les enseignants doivent consacrer un peu plus de temps sur les pratiques comme les travaux pratiques (T.P).

En effet, la maîtrise de la théorie des machines électriques, sans avoir le minimum de connaissances sur la pratique nous semble insuffisante. Donc, à la sortie de Lycées techniques ou de l'**ENSET**, les élèves devraient avoir le minimum de bagage pratique dans la vie professionnelle, et, de plus comme les étudiants sortant de l'**ENSET** sont orientés à enseigner les étudiants en B.T.S qui ont plus de besoin dans la pratique que dans la théorie.

D- Solution proposée

But :

Vu la lacune susmentionnée, nous proposons de séries de pratique sur le machines synchrones en réalisant les séries des manipulations de T.P.

Classe : 3^{ème} année EL

Matière : Électro thème

Durée : 3h de temps.

Moyen : photocopies, alternateur triphasé.

Objectifs : A la fin de séance les élèves doivent avoir la notion sur les différentes caractéristiques et essais possibles d'un alternateur triphasé.

Prérequis : Avant d'entamer de cette thème les élèves doivent avoir la Connaissance sur la machine synchrone.

Thème 3 :

IV-3 : Sujets de travaux pratiques (T.P)

A-Travaux pratiques N°1 :

Etude des caractéristiques d'un alternateur triphasé lors des différentes essayent

On dispose d'un alternateur triphasé tétrapolaire à entrefer constant qui porte les indications suivantes sur la plaque signalétique.

$$S_n = 55K.V.A, U_n = 380V, I_{eMax}, n'_n = 1500tr/mn$$

Les enroulements statorique sont couplés en étoile.

a- En effectuant les essais sur la machine à vide, on relève la caractéristique interne suivante à la vitesse nominale.

Tableau 4.1 : relevés des caractéristiques à vide interne.

U(V)	0	46	85	130	160	185	205	216	225	232
I(A)	0	0,23	0,46	0,80	1,110	1,46	1,90	2,30	2,50	3,20

b- Ensuite durant l'essai en court circuit donne :

-Courant d'excitation $I_f = 0.48$

-Courant dans une phase $I=20A$

c- De plus lors des essais réactifs arrière on obtient :

-Courant d'excitation $I_f = 2.50$

-Courant dans une phase $I=20A$

d- On a encore décidé de faire un essai complémentaire qui montre à vide la puissance mécanique P qu'il faut fournir à l'arbre de l'alternateur et qui fait varier le courant d'excitation I selon le tableau suivant :

Tableau 4.2 : relevés des caractéristiques complémentaire.

P(W)	175	204	277	335	375	387
I(A)	0	0,46	1,10	1,90	2,50	3,20

Notons que la résistance totale $R=0.6$ et l'excitation ont été fournies par une source séparée.

Sous la tension composée $U=314V$, l'alternateur fournit à un récepteur triphasé équilibré indicatif a une puissance active de 9000W et réactive 12000VAR.

Travaux demandés :

A partir de ces données pratiques :

Déterminer le courant en ligne.

On utilise deux wattmètres pour mesurer la puissance active.

Quelle indication a chacun de ces wattmètres.

Essayer de tracer la caractéristique interne $U=f(I)$.

En utilisant le diagramme Poitier ou autre diagramme.

-Déterminer le courant d'excitation de l'alternateur, le couple moteur que l'on doit développer sur l'arbre si on néglige les pertes supplémentaire.

Indication

- Appliquer la formule des puissances active et réactive.
- Appliquer la conservation de puissances $P=P_1+P_2$.
- A partir de relevés des caractéristiques, tracer $E_v=f(J)$.
- Trouver la f.é.m. résultantes E_r et le courant d'excitation équivalent I_r .
- Faire le bilan énergétique pour la puissance totale.
- Tirer le couple en divisant ce dernier par Ω .

B- Travaux pratiques N°2 :

Mesures des paramètres

Dans le laboratoire, on dispose d'un alternateur triphasé dont la plaque signalétique comporte les indications suivantes :

Fréquence nominale : $f = 50$ Hz, vitesse nominale : $V = 1500$ tr/mn, puissance nominale : $S = 33$ KVA.

Enroulements du stator en étoile :

- tension nominale : $U = 380V$
- courant nominale : $I = 50A$
- facteur de puissance nominale : 0.8
- Circuit d'excitation
- tension nominale : $U_f = 80V$
- courant nominale : $2.50A$

1-Calculs préliminaire.

a. Déterminer la tension nominale de phase V_{phN} et le courant nominale de phase I_{phN} .

b. Quel est le nombre de paires de pôles p .

2- On décide d'effectuer un essai à vide en réalisant le montage ci-dessous :

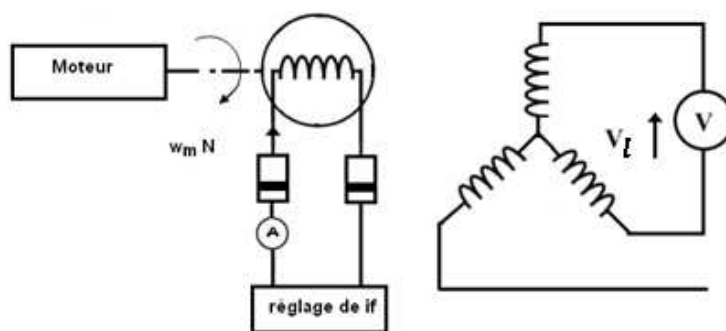


Figure 4-7 : Schéma équivalent à un enroulement d'une génératrice synchrone.

La machine étant entraînée à vitesse nominale, on mesure la tension de ligne à vide V_1 en fonction du courant d'excitation i_f .

a. Relever la caractéristique qui existe entre V_1 et i_f , tracer ensuite cette caractéristique expérimentale.

b. Déterminer le coefficient reliant E_0 à i_f si on approche cette caractéristique par la droite issue de l'origine passant par le point pour lequel V_1 atteint la valeur nominale de la tension de la machine.

3- Maintenant, on passe à l'essai en court-circuit en réalisant le montage suivant :

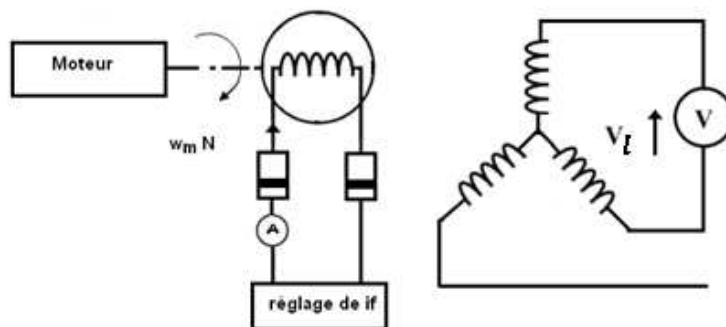


Figure 4-8 : Schéma équivalent à un enroulement d'une génératrice synchrone

La machine étant entraînée à vitesse nominale et l'induit mis en court-circuit, on relève le courant de ligne débité I_L en fonction du courant d'excitation i_f .

a. Relever la caractéristique de $I_L = f(i_f)$ et tracer ce relevé.

b. On mesure également la puissance fournie par le moteur d'entraînement. En passant du point correspondant à $i_f = 0$ au point correspondant à $i_f = 1.235A$, pour lequel le courant d'induit I_L atteint sa valeur nominale (50A), la puissance fournie augmente de $\Delta P_{meca} = 300W$.

Calculer alors la réactance synchrone $j\omega_s$ et la résistance R_s des enroulements de l'induit.

IV-4 : Importance de l'analyse des erreurs des apprenants.

Quel que soit le type d'enseignement (discipline), il est vraiment important de ne pas oublier l'analyse des erreurs des élèves par rapport aux cours et exercices faits puisque la correction de leurs erreurs éclaircit l'horizon, le doute qui existe chez les élèves.

Une fois les erreurs sont corrigées, suite à l'application de(s) méthode(s) pédagogique, les élèves arrivent à améliorer de plus en plus leurs connaissances, leurs expériences et leur savoir-faire. De plus, cela forme leurs esprits et les mène à l'autocritiquée sur leur étude.

CONCLUSION GENERALE

On constate avec force que la formation technique d'aujourd'hui se penche beaucoup vers une utilisation intense de la technique de calcul appelée couramment « informatique » cette formation technique moderne forge les futurs spécialistes à la pratique des connaissances antérieurement acquises, renforce les habitudes dans la résolutions des problèmes mathématiques de la programmation et dans l'analyse des solutions ou résultats des ordinateurs.

Ce mémoire à pour but d'étudier le comportement d'un générateur synchrone suite à un régime transitoire. La méthode utilisée pour sa résolution est celle de Runge-kutta d'autant plus qu'elle est reconnue pour sa précision élevée. Les équations résolues qui régissent ce régime de fonctionnement sont des équations différentielles non linéaires que l'on connaît par les difficultés de leur résolution.

Il y a plusieurs régimes qui peuvent provoquer le régime transitoire. Le seul qu'on choisit c'est le phénomène transitoire qui s'appelé court-circuit brusque. Le courant du court-circuit en régime transitoire étudier est très élevé, il dépend surtout des conditions initiales et les moments où le générateur démarre entraîné par la turbine hydraulique.

Dans le cas le plus défavorable, ce courant peut atteindre une valeur 5 à 6 fois sa valeur nominale. Ce ci dépend du paramètre et du type de la machine synchrone. La pointe du courant dans l'excitation peut augmenter aussi jusqu' a 5 fois de sa valeur nominale. Les amortis de la machine jouent un rôle capital pour l'amortissement des courants dans la machine.

BIBLIOGRAPHIE

[1] **Jean CHATELAIN** ; TRAITE D'ELECTRICITE Volume X, machines électriques édition GEORGI, Lausanne 1984 ;

[2] **Harimalala RAKOTOSALAMA** ; Etude par vie analogique d'un régime transitoire d'une machine électrique ; Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du CAPEN ; promotion MANITRA, Décembre 2007 ;

[3] **M^r SAID M'zée** ; cours électrotechnique II Année 2007-2008 ;

[4] **RAJAONARIVO Rolland** ; simulation d'une microcentrale hydraulique munie d'une machine synchrone, Projet I Octobre 2008 ;

[5] **TSIRESY Lucien** ; Etude du court-circuit brusquement d'un générateur synchrone, Mémoire de fin d'étude pour l'obtention de diplôme ingénieur, promotion Jiro Décembre 2004 ;

[6] **RANDRIANTANANA Séraphin** ; Mise en marche d'un alternateur au L.T.P Antsiranana, Projet I Octobre 2008 ;

[7] **R.Bourgeois, D.Coguiel** ; Mémotech électrotechnique 5^{em} édition,

[8] This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only;

[9] **LAMARISA** ; Elaboration d'un protocole de T.P. sur les équations différentielles sous Excel en terminale Projet I 2008,

[10] **Guy SEGUIER, Francis NOTELET** ; Electrotechnique industrielle 2^{em} édition Technique & Documentation 1996 ;

[11] **Programme d'action PACER** -Energies renouvelables office fédéral des questions conjoncturelles, Petites centrales hydrauliques – Turbines hydraulique journées de formation pour ingénieurs ;

[12] **Programme d'action PACER** -Energies renouvelables office fédéral des questions conjoncturelles- Petites centrales hydrauliques-Le choix, Le dimensionnement et les essais de réception d'une mini turbine.

[13] **M^r SAID M'zé** ; cours centrale Année 2007-2008 ;

[14] **TSIAMBALAKA Colin Elido** ; Etude par voie numériques des phénomènes transitoire dans les machines électriques promotion MANITRA, Décembre 2007 ;

ANNEXE : LISTING DE PROGRAMMATION

Programme en Matlab

```

%*****PROGRAMME*****
%*****Réalise par VELONJARA Judicaël Eric*****
%*****Filière Génie Electrique-MEMOIRE 2009*****

function [y]=RK-44(A,B,to,dt,tmax,yo,n)
%
% *****
% * Méthode de Runge-Kutta à l'ordre 4 *
% *****
%
% RK-44(A,B,to,dt,tmax,yo,n)
% RESOLUTION DE SYSTÈME DE LA FORME Y'=AY+B
% to : TEMPS INITIALE
% dt : LE PAS DE LA VARIABLE
% tmax :TEMPS MAXIMAL
% yo : VECTEUR COLONNE QUI CONTIENT LES VALEUR INITIALES
% n : NOMBRE DE COURBE A TRACER (Y1,Y2,...,Yn)
y(:,1)=yo;t(1)=to;i=1;

while t<=tmax
    k1=dt*(A*y(:,i)+B);
    k2=dt*(A*(y(:,i)+k1/2)+B);
    k3=dt*(A*(y(:,i)+k2/2)+B);
    k4=dt*(A*(y(:,i)+k3)+B);
    y(:,i+1)=y(:,i)+(1/6)*(k1+2*k2+2*k3+k4);
    t(i+1)=i*dt;
    i=i+1;
end
plot(t,y(1:n,:));
grid on;
return

```

```

function F=RK4(y)
%***** DONNEES DU PROBLEME *****

Laq=1.12;LsigD=0.5;LsigQ=0.02;Lf=0.092;Lad=1.745;Lsigd=1.191;LsigDf=0.668;
Lsigf=0.92;Lsigq=0.191;L0=0.9;Dtm=0.15;jt=1;jm=2;p=2;Dtm=0.15;

%***** DONNEES SECOND MEMBRE*****

ud=0;uq=0;u0=0;f=50;wn=2*pi*f;wm=wn;omegat=13.7*pi;Ct=0.931;Cem=1.2;
rs=0.3;rf=0.1;rD=0.015;rQ=0.012; uf=rf*ifo;
Cct=0.02;Dct=0.18;Dm=0.018;Dtm=0.15;ktm=0.18;

%***** SAISIE DE LA MATRICE M*****

M=[Lad+Lsigq      0      0      Lad      Lad      0      0      0      0
0;
      0      Laq+Lsigq      0      0      0      Laq      0      0      0
0;
      0      0      L0      0      0      0      0      0      0
0;
      Lad      0      0      Lad+LsigD      Lad+LsigDf      0      0      0      0
0;
      Lad      0      0      Lad+LsigDf      Lad+LsigDf+Lsigf      0      0      0      0
0;
      0      Laq      0      0      0      Laq+LsigQ      0      0      0
0;
      0      0      0      0      0      0      0      0      jt
0;
      0      0      0      0      0      0      jm/p      0      0
0;
      0      0      0      0      0      0      Dtm/p      0      -Dtm
1;
      0      0      0      0      0      0      0      1      0
0];
%*****Matrice B*****
B=zeros(10,10);
B(1,1)=(wn*(-rs+wm*Lad));B(1,4)=(wn*(wm*Lad));B(1,5)=(wn*(wm*Lad));B(1,1)=(wn*(wm*Lsigd));
B(2,2)=(wn*(-rs-wm*Lad));B(2,4)=(wn*(-wm*Lad));B(2,5)=(wn*(-wm*Lad));B(2,2)=(wn*(-wm*Lsigd));
B(3,3)=(wn*(-rs));
B(4,4)=(wn*(-rD));
B(5,5)=(wn*(-rf));
B(6,6)=(wn*(-rQ));
B(7,7)=-1;B(7,9)=1-Dct;
B(8,7)=1;B(8,8)=-Dm/p;
B(9,8)=-ktm/p;B(9,9)=ktm;
B(10,8)=1;
%*****Matrice C*****
C=[-wn*ud -wn*uq wn*u0 0 wn*uf 0 0 Cem 0 0]';
%*****Matrice y*****
id=0;iq=0;i0=0;iD=0;ifo=0.8;iQ=0;Ct=0.93;wm=100*pi;omegat=13.7*pi;tetar=pi;
y0=[id iq i0 iD iF iQ Ct wm omegat tetar]';
%*****
F=inv(M)*(B*y0+C);
A=inv(M);B=inv(M)*C;
[y]=RK-44(A,B,0,0.02,150,y0,6);
Return

```

```
%*****Traçage des figures*****
```

```
figure(1);
plot(t,ia,'k');
xlabel('Temps en [s]');
ylabel('Courant en [p.u]]');
title ('Le courant statorique ia');
legend('i_a');
grid ;
figure(2);
plot(t,if);
xlabel('Temps en [s]');
ylabel('Courant if');
title ('Courant d''excitation en [p.u]]');
grid;
figure(3);
plot(t,iD);
xlabel('Temps en [s]');
ylabel('courant iD en[p.u]]');
grid;
figure(4);
plot(t,iQ);
xlabel('Temps en [s]');
ylabel('Courant iQ en [p.u]]');
grid ;
figure(5);
plot(t,iD,t,iQ);
xlabel('Temps en [s]');
ylabel('Courant en [p.u]]');
title ('Courants amortisseurs ');
legend('i_D','i_Q');
grid ;
figure(6);
plot(t,ia,'k',t,ib,'r',t,ic,'b');
xlabel('Temps en [s]');
ylabel('Les courants en [p.u]]');
title ('Les courants des phases statoriques ia,ib,ic ');
legend('i_a','i_b','i_c');
grid ;
figure(7);
plot(t,ib,'r');
xlabel('temps en [s]');
ylabel('courant en [p.u]]');
title ('Le courant statorique ib');
legend('i_b');
grid ;
figure(8);
plot(t,ic,'b');
xlabel('Temps en [s]');
ylabel('Courant en [p.u]]');
title ('Le courant statorique ic ');
legend('i_c');
grid ;
figure(9);
plot(t,Cem,'b');
xlabel('Temps en [s]');
ylabel('couple en [p.u]]');
title ('couple électromagnétique Cem');
legend('C_em');
grid ;
```

```
figure(10);
plot(t,Cmec, 'b');
xlabel('Temps en [s]');
ylabel('Couple en [p.u]]');
title ('Couple mécanique Cmec');
legend('C_mec');
grid ;
figure(11);
plot(t,P, 'b');
xlabel('Temps en [s]');
ylabel('Puissance en [p.u]]');
title (' Puissance active [Pa] ');
legend('Pa');
grid ;
figure(12);
plot(t,Q, 'r');
xlabel('Temps en [s]');
ylabel('Courant en [p.u]]');
title ('Puissance réactive [Pr]');
legend('Pr');
grid ;
```

Table des matières

Remerciements

Liste des principaux symboles utiles

INTRODUCTION	6
Chapitre I: Notion générale sur une centrale hydraulique	7
I-1 Historique	8
I-2 Eléments d'une microcentrale hydraulique	9
I-3 Microcentrale	10
I-3-1 Classification des microcentrales et de leurs composants	10
I-3-2-1 Notions concernant l'utilisation de la force hydraulique	11
I-3-2-2 Puissance d'une chute d'eau	12
I-3-3 Turbines	13
I-3-4 Différents types des turbines hydrauliques	13
I-4 Sélection d'un ou plusieurs types des turbines	18
Chapitre II : Généralité sur la machine synchrone	20
II- 1 Généralité sur la machine synchrone	21
II-1-1. Principaux types des machines synchrones du point de vue leur construction	21
II-1-2 Stator de la machine synchrone	22
II-1-3 Les rotors de la machine synchrone	23
II-2-1 Principe de fonctionnement	24
II-2-2-1 Structure d'une machine synchrone	25
II-2-2-3 Caractéristiques d'un alternateur synchrone	25
II-2-2-4 Caractéristique de charge d'une génératrice synchrone	27
II-3-1 Bilan de puissance d'un alternateur	27
II-3-2 Représentation de bilan des puissances	29
II-3-3 Le rendement	29
II- 4-1 Mise en équation de la machine synchrone	30
II- 4-2 Définitions des différents enroulements	30
II-4-3 Equation de tension et de flux en grandeurs de phase	31
Chapitre III : Modélisation du système et l'indication des différentes grandeurs lors du phénomène transitoire	34
III-1 Introduction	35
III-1-1 Représentation d'une microcentrale hydraulique	35
III- 2 Modèle de Turbine	35
III-2-1 Transformation de Park appliquée à la machine synchrone	36
III -2-2 Equation de Park de la machine synchrone	37
III-2-3 Expression de puissance et du couple	38
III-2-4- Equation de mouvement	39
III-2-4-2 Grandeurs relatives (p.u)	40
III-2-4 Equations de Park de la machine synchrone en valeur relatives (p.u)	42
III-2-4-1 Tensions	42
a) Pour les' équations de tension de stator	42
b) Pour les' équations de tension de rotor	42
c) Pour les' équations de flux statorique prennent la forme	42
d) Pour les' équation de flux statorique	42
III-3-1 Etude du régime transitoire	45
III-3-2 Différents types des régimes transitoires dans une machine synchrone	45
III -3-2-1 Phénomènes transitoires lors du démarrage	45
III -3-2-2 Phénomènes transitoires lors de la synchronisation	45
III -3-2-3 Phénomènes transitoire à la variation de l'excitation et à la désexcitation	45
III -3-2-4 Phénomènes transitoire en court - circuit brusque	45
III-4-1 Oscillations électromécaniques de la machine synchrone	46

III-4-2 Mouvement.....	46
III-5-1 Analyse du système d'équations numérique	48
Description du problème	48
III-5-2 Formulation mathématique du problème.....	49
III -5-3 Equations d'état de la machine	51
III -5-4 : Résolution numérique d'un système différentiel par la méthode de Runge-kutta.	53
Mise en œuvre de la méthode	53
Choix des programmes	55
III-6-1 : Les paramètres et caractéristiques de la microcentrale hydraulique sont les suivantes	56
II-6-2 : Les résultats du programme	57
III-6-1-3- Analyse des résultats	63
Chapitre : IV Implication pédagogique	65
IV-1 Introduction	66
Thème 1	67
IV-1 Etude théorique d'une génératrice synchrone triphasée	67
IV-1-2 Travaux dirigés.....	69
a- Exercice	69
b-Solution de l'exercice1	70
Détermination de valeur maximale	71
B-1 : Détermination des puissances active, réactive et apparente.	72
2. Détermination de puissance absorbé	72
3. Détermination des pertes de puissance de l'alternateur	72
c- Exercice 2	72
D-Solution de l'exercice 2	73
Thème 2	74
IV-2 : Réflexion sur l'enseignement des machines électriques aux Lycées.....	74
A- Exercice.....	74
C- Suggestion	75
D- Solution proposée.....	75
Thème 3	76
IV-3 : Sujets de travaux pratiques (T.P)	76
A-Travaux pratiques N°1	76
Etude des caractéristiques d'un alternateur triphasé lors des différentes essayent 76	
B- Travaux pratiques N°2	77
IV-4 : Importance de l'analyse des erreurs des apprenants.	78
CONCLUSION GENERALE	79
BIBLIOGRAPHIE	80