

TABLES DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	I
TABLE DES MATIERES.....	II
LISTE DES FIGURES.....	V
LISTE DES TABLEAUX ET ORGANIGRAMMES.....	VII
LISTE DES NOTATIONS ET SYMBOLES.....	VIII
INTRODUCTION GENERALE.....	1

PARTIE I : INTRODUCTION

Chapitre I : CONTEXTE GENERAL.....	4
I.1 DEFINITION.....	4
I.2 CONSTITUTION.....	6
I.3 PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT.....	8
I.4 REGIME DE FONCTIONNEMENT.....	8
Chapitre II : MODELISATION DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE TRIPHASEE EN REGIME EQUILIBRE.....	10
II.1 CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT EN GENERATRICE.....	10
II.1.1 Conditions générales.....	10
II.1.2 Capacité d'excitation à vide.....	10
II.1.3 Excitation et désexcitation de la génératrice.....	11
II.2 MODELISATION.....	11
Chapitre III : POSITION DU PROBLEME.....	16

PARTIE II : METHODOLOGIE

Chapitre IV : MODELISATION DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE TRIPHASEE ILOTEE EN MARCHE BIPHASEE EN REGIME DESEQUILIBRE.....	19
VI.1 TRANSFORMATION DE FORTESCUE.....	19
VI.2 MODELISATION.....	20
Chapitre V : EQUILIBRAGE DE LA GENERATRICE.....	23
V.1 CONDITIONS GENERALES D'EQUILIBRE.....	23

V.2	DETERMINATION DE LA CAPACITE D'EXCITATION	25
V.3	SCHEMA MONOPHASE EQUIVALENT	28
Chapitre VI : CARACTERISTIQUES DE LA GENERATRICE.....		30
VI.1	DETERMINATION DE LA FONCTION DE TRANSFERT \underline{F}	30
VI.2	DETERMINATION DU POINT DE FONCTIONNEMENT NOMINAL	32
VI.3	COMPORTEMENT DE LA GENERATRICE EN REGIME DESEQUILIBRE	36

PARTIE III : SIMULATION DU COMPORTEMENT DE LA GENERATRICE EN REGIME DESEQUILIBRE

Chapitre VII ELABORATION DU LOGICIEL «ASYNCHRONOUS GENERATORS RZA».....		41
VII.1	CARACTERISTIQUES DE LA MACHINE D'ETUDE.....	41
VII.2	GESTION DES FENETRES	42
VII.3	PRESENTATION DU LOGICIEL.....	43
Chapitre VIII RESULTATS DES SIMULATIONS ET INTERPRETATIONS.....		49
VIII.1	HYPOTHESES	49
VIII.2	POINT DE FONCTIONNEMENT NOMINAL.....	50
VIII.3	COMPORTEMENT EN REGIME DESEQUILIBRE	51
Chapitre IX PROPOSITION DE PROTECTION ET SECURISATION DE L'INSTALLATION		75
IX.1 PROTECTION DE L'INSTALLATION		75
IX.1.1	Conditions générales	75
IX.1.2	Solutions proposées.....	75
IX.2 PROTECTION DE LA GENERATRICE.....		76
IX.2.1	Conditions générales	76
IX.2.2	Vibrations	77
IX.2.3	Surcharges	77
IX.2.4	Courts-circuits	78
IX.2.5	Liaisons équipotentielles	78

PARTIE VI : VOLET ENVIRONNEMENTAL

Chapitre X : ETUDE DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX	79
X.1 MOTIVATIONS	79
X.2 IMPACTS NEGATIFS.....	80
X.3 IMPACTS POSITIFS :	82
X.4 MESURES D'ATTENUATION DES IMPACTS NEGATIFS	83
CONCLUSION	85
BIBLIOGRAPHIE	87
WEBOGRAPHIE.....	88
ANNEXES	

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma synoptique de l'installation	2
Figure 2 : Bilan de conversion électromécanique	5
Figure 3 : Stator bobiné	6
Figure 4 : Rotor à cage d'écureuil	7
Figure 5 : Schéma d'une cage d'écureuil	7
Figure 6 : Rotor bobiné	8
Figure 7 : Couple électromagnétique en fonction du glissement	9
Figure 8 : Schéma équivalent en " T "	11
Figure 9 : Illustration de la LTIG	12
Figure 10 : Bilan de puissance d'une génératrice	15
Figure 11 : Position du problème	16
Figure 12: Schéma équivalent monophasé en « T », décomposé en système direct et inverse	21
Figure 13: Schéma multifilaire équivalent du système	23
Figure 14: Schéma de fonctionnement	27
Figure 15: Schéma du système équilibré	28
Figure 16: Fonctionnement en génératrice auto-excitée	30
Figure 17: Variation du couple mécanique en fonction de la vitesse de rotation	36
Figure 18: Lancement du logiciel	44
Figure 19: Interface d'accueil	44
Figure 20: Introduction des paramètres	45
Figure 21: Grandeurs au point de fonctionnement nominal	45
Figure 22: Choix de variation des charges	46
Figure 23: Variation d'une seule charge	46
Figure 24: Variation simultanée des charges	47
Figure 25: Caractéristiques avec des charges quelconques	47
Figure 26: Comportement de la génératrice pour une variation seule de la charge $R1$	54
Figure 27: Comportement de la génératrice pour une variation seule de la charge $R2$	58
Figure 28: Comportement de la génératrice si les deux charges varient simultanément	62
Figure 29: Comportement de la GAS si les charges varient avec de différents coefficients ...	65
Figure 30: Confrontation des résultats	72
Figure 31: Comparaison des deux caractéristiques	73
Figure 32: Protection thermique	77

Figure 33: Application	A
Figure 34: Langage de l'installation.....	A
Figure 35: Assistant d'installation.....	A
Figure 36: Contrat de licence	B
Figure 37: Mot de passe	B
Figure 38: Dossier de destination.....	C
Figure 39: Sélection du dossier du menu « Démarrer ».....	C
Figure 40: Tâches supplémentaires	C
Figure 41: Logiciel prêt à installer	D
Figure 42: Installation en cours	D
Figure 43: Fin de l'installation	D
Figure 44: Désinstallation	E

LISTE DES TABLEAUX ET ORGANIGRAMMES

ORGANIGRAMMES

Organigramme 1 : Recherche du point de fonctionnement nominal	35
Organigramme 2 : Recherche d'un nouveau point de fonctionnement équilibré.....	40
Organigramme 3 : Gestion des fenêtres	43

TABLEAUX

Tableau 1 : Valeurs lues sur la plaque signalétique	41
Tableau 2 : Paramètres directs et inverses de la machine	41
Tableau 3 : Grandeurs de référence.....	42
Tableau 4 : Observations des résultats pour une variation seule de la charge $R1$	54
Tableau 5 : Bilan des résultats si $R2$ varie seule	58
Tableau 6 : Bilan des résultats si $R1$ et $R2$ croissent simultanément.....	62
Tableau 7 : Bilan des résultats si $R1$ croît et $R2$ décroît	66
Tableau 8 : Effets physiologiques du courant sur le corps humain.....	80
Tableau 9 : Echelle du bruit selon le milieu.....	81

LISTE DES NOTATIONS ET SYMBOLES

LES INDICES

Com	Complémentaires	mag	Magnétique
Ch	Charge	max	Maximal
D	Direct	méc	Mécanique
El	Electrique	min	Minimal
Em	Electromagnétique	nom	Nominal
Ext	Extérieur	nouv	Nouveau
f, fer	Fer	o	Homopolaire / A vide
Fvl	Frottement et ventilation	p	Pertes
Frot	Frottement	r	Relatif au rotor
H	Entrefer	réf	Référence
I	Inverse	s	Relatif au stator
j, p	Numéro du circuit électrique	th	Thermique
Js	Joule statorique	u, utl	Utile
Jr	Joule rotorique	σ_r	Fuites relatives au rotor
M	Relative à la vitesse du rotor / Machine	σ_s	Fuites relatives au stator

NOTATIONS MATHÉMATIQUES

dx	Variation de X	$ X $	Valeur absolue de X
$\frac{d}{dt}$	Notation différentielle	$[X]_t$	Transposée de X
$\iint X$	Intégrale double de X	Σ	Somme
\underline{X}	Nombre complexe X	$\text{Re}(\underline{Z})$	Partie réelle de \underline{Z}
$[X]$	Matrice X	$\text{Im}(\underline{Z})$	Partie imaginaire de \underline{Z}
$[X]^{-1}$	Matrice inverse de [X]		

GRANDEURS GÉNÉRALES ÉLECTRIQUES ET MÉCANIQUES

C	Capacité d'un condensateur	$[\mu F]$
$\cos\varphi$	Facteur de puissance	
f	Fréquence	[Hz]
F	Force	[N]
ψ	Flux totalisé	[Wb]

φ, φ'	Déphasage	[rad]
G	Glissement	
I, J, i	Intensité de courant	[A]
k	Rapport entre R_2 et R_1	
L	Longueur	[m]
L	Inductance	[mH]
L'	Inductance ramenée	[mH]
N, n	Vitesse	[tr/min]
η	Rendement	
ω	Pulsation angulaire	[rad/s]
Ω	Vitesse angulaire de rotation	[rad/s]
P	Nombre de paires de pôle	
P	Puissance	[W]
R	Résistance électrique	[Ω]
S	Section/Surcharge	[m^2]
T	Couple	[Nm]
θ	Angle	[rad]
U, V, u	Tension composée, simple et instantanée	[V]
X	Réactance	[Ω]
W	Energie	[J]
Z, Y	Impédance et admittance	[Ω] et [Ω^{-1}]
Λ	Perméance	[H]

GRANDEURS EN FONCTION DE LA TENSION DIRECTE

\underline{F}	Fonction de transfert en régime déséquilibré
\underline{F}_{Ursid}	Fonction de transfert de la tension inverse
$\underline{F}_{Pét.utl}$	Fonction de transfert de la puissance électrique utile
\underline{F}_{pjsd}	Fonction de transfert des pertes Joule statoriques directes
\underline{F}_{pjsi}	Fonction de transfert des pertes Joule statoriques inverses
\underline{F}_{pfd}	Fonction de transfert des pertes fer directes
\underline{F}_{pfi}	Fonction de transfert des pertes fer inverses
\underline{F}_{pjrd}	Fonction de transfert des pertes Joule rotoriques directes

$\underline{E}_{p\,jri}$	Fonction de transfert des pertes Joule rotoriques
$P_{méc.turb}$	Puissance mécanique délivrée par la turbine

ABBREVIATIONS

1~	Monophasé
2~	Biphasé
3~	Triphasé
α	Coefficient de surcharge
CH	Charges
D	Délestage
DDR	Dispositifs Différentiels Résiduels
DDRHS	Dispositifs Différentiels Résiduels Haute Sensibilité
GAS	Génératrice ASynchrone
JIRAMA	Jiro sy RAno Malagasy
LTIG	Loi de la Tension Induite Généralisée
MAS	Machine ASynchrone
PFN	Point de Fonctionnement Nominal
p.u	Système « <i>per unit</i> »
RD	Régime Déséquilibré
RE	Régime Equilibré
S	Surcharge
S.E	Systèmes Electromécaniques
TURB	Turbine

INTRODUCTION GENERALE

Actuellement, toutes les recherches et les productions des industries ciblent toujours à améliorer la vie en générale de l'homme. Ceci en produisant des machines capables de faire des tâches à la place d'une ou de plusieurs personnes. C'est pour cela qu'il y a hausse de demande en énergie électrique par rapport aux offres. Pour couvrir ces demandes, en tenant compte de l'état et de la dégradation de l'environnement actuel, les recherches énergétiques s'orientent toutes à l'exploitation des ressources naturelles (eau, air, gisement solaire, ...). Ce domaine de recherche est intitulé « énergie verte » ou « énergie renouvelable ».

Dans la majorité de ces recherches, on exploite toutes les ressources naturelles produisant de l'énergie mécanique. En effet, cette énergie mécanique sera transformée en énergie électrique par l'intermédiaire des machines tournantes. Parmi ces machines, actuellement, les plus étudiées sont les machines asynchrones parce qu'elles présentent beaucoup d'avantages, notamment son faible prix (production en grande quantité) et sa facilité de maintenance.

Dans cette étude, on va exploiter l'énergie mécanique donnée par la force hydraulique en utilisant une turbine. La figure ci-dessous montre le schéma synoptique de l'installation à étudier.

Source : auteur

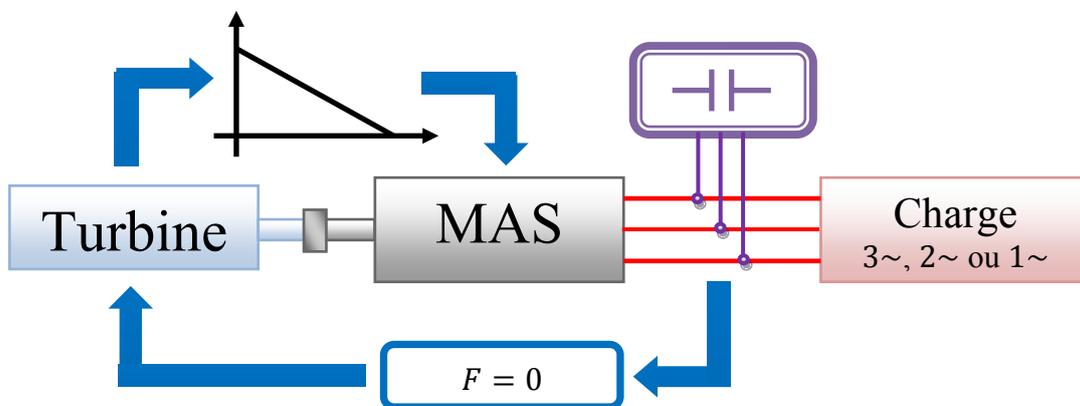


Figure 1 : Schéma synoptique de l'installation

Techniquement, le fonctionnement en génératrice de la machine asynchrone triphasée nécessite l'utilisation d'une autre source d'énergie électrique (par exemple JIRAMA) ou d'une batterie de condensateur pour assurer sa magnétisation.

Du point de vue technologique, c'est cette dernière qui est la plus exploitée car son branchement aux bornes des enroulements statoriques suffit pour la magnétisation de la

génératrice, et que cela la rend autonome. Ce qui rend son entretien plus facile et son coût moins élevé par rapport aux alternateurs synchrones.

Une turbine hydraulique, dont la courbe caractéristique mécanique $C = f(N)$ est supposée linéaire, constitue l'organe d'entraînement de la machine. La génératrice asynchrone assure la conversion de l'énergie mécanique reçue par le rotor en énergie électrique délivrée aux bornes du stator. L'énergie électrique ainsi obtenue peut être tout de suite exploitée par les utilisateurs. Les charges connectées aux enroulements statoriques de la génératrice peuvent être triphasées, biphasées ou monophasées.

On verra un peu plus loin dans cet ouvrage que l'annulation d'une fonction de transfert F garantit l'auto-excitation et le transfert total de l'énergie électrique entre la génératrice asynchrone triphasée et les charges.

Toutefois, la génératrice peut être soumise à des régimes déséquilibrés qui, selon leur amplitude, leur nature et leur durée de manifestation, peuvent nuire au bon fonctionnement de la machine ou de l'installation toute entière.

Ainsi, le présent travail consiste alors à élaborer un LOGICIEL qui prédéterminera le comportement d'une génératrice asynchrone triphasée excitée par un seul condensateur en marche biphasée, sans qu'il y ait toute forme d'asservissement ou régulation au niveau de la capacité et/ou de la vitesse de rotation.

Pour cela, le travail va être divisé en quatre parties :

- 👉 La première partie va être consacrée aux rappels théoriques utiles sur les systèmes électromécaniques, à la modélisation de la génératrice asynchrone triphasée en régime permanent équilibré, et à l'explicitation de la problématique ;
- 👉 La seconde partie contiendra tous les outils mathématiques nécessaires, la mise en équation du système et la détermination des grandeurs caractéristiques de la génératrice ;
- 👉 La troisième partie va représenter le logiciel de simulation, les résultats avec leurs interprétations ainsi que les commentaires ;
- 👉 La quatrième et dernière partie sera axée sur l'étude des impacts environnementaux de l'exploitation de ce type de machine.

INTRODUCTION

CHAPITRE I CONTEXTE GENERAL

I.1 DEFINITION

Les machines asynchrones peuvent être définies comme étant des systèmes électromécaniques caractérisés par k circuits électriques qui sont couplés magnétiquement entre eux. Le flux totalisé est donné par la relation suivante :

$$\Psi_j = \sum_{p=1}^k L_{jp} i_p = \sum_{p=1}^k N_j N_p \Lambda_{jp} i_p \quad (I.01)$$

Avec :

- 👉 L_{jp} : Inductance mutuelle entre les circuits j et p ;
- 👉 N_j, N_p : Nombres de spires ;
- 👉 Λ_{jp} : Perméance mutuelle entre les circuits j et p .

Avec

$$\Lambda_{jp} = \iint \mu \frac{dA}{l} \quad (I.02)$$

- 👉 μ : Perméabilité magnétique absolue ;
- 👉 dA : Élément de surface ;
- 👉 l : Longueur du circuit ;
- 👉 i_p : Intensité dans le circuit p .

Une machine asynchrone peut fonctionner soit en moteur, soit en générateur. Elle obéit au bilan d'énergie comme le montre la figure suivante :

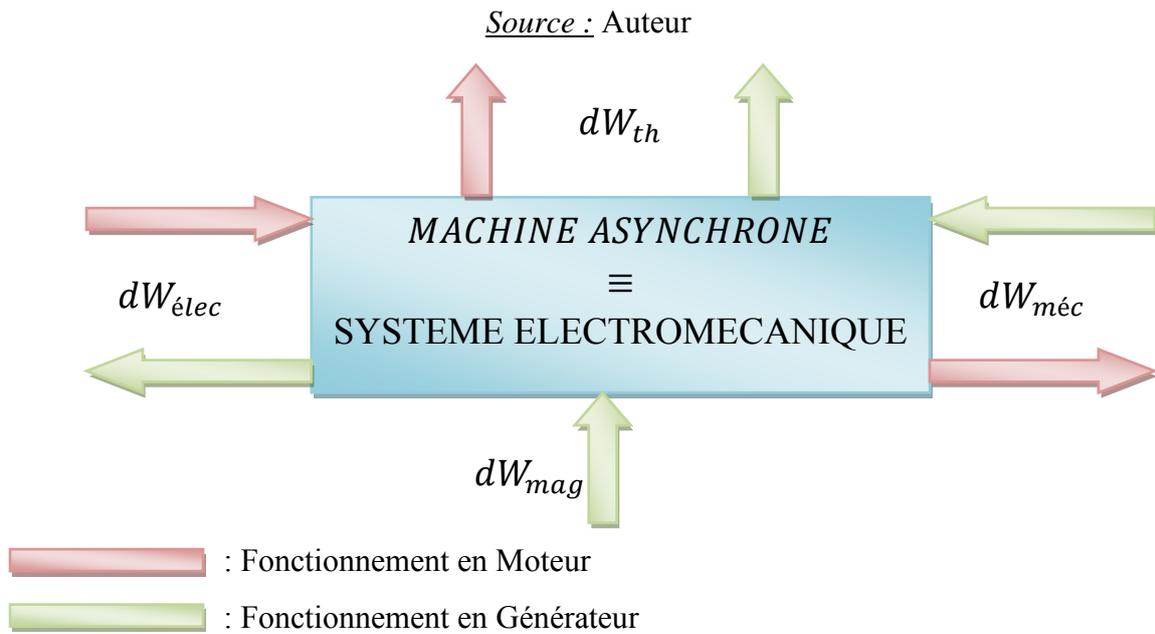


Figure 2 : Bilan de conversion électromécanique

Le bilan énergétique [6] correspondant au bilan de conversion électromécanique peut s'écrire comme suit :

👉 Si la machine fonctionne en moteur, on a :

$$dW_{él} = dW_{th} + dW_{méc} + dW_{mag} \quad (I.03)$$

Alors :

$$dW_{mag} = dW_{él} - (dW_{th} + dW_{méc}) \quad (I.04)$$

👉 Si la machine fonctionne en générateur, on aura :

$$dW_{méc} = dW_{th} + dW_{mag} + dW_{él} \quad (I.05)$$

Alors :

$$dW_{mag} = dW_{méc} - (dW_{th} + dW_{él}) \quad (I.06)$$

Avec :

🌿 $dW_{él}$: Variation d'énergie électrique

$$dW_{él} = \sum_{j=1}^k u_j i_j dt = \sum_{j=1}^k (R_j i_j^2 dt + i_j d\psi_j) \quad (I.07)$$

🌿 $dW_{méc}$: Variation d'énergie mécanique

$$dW_{méc} = \sum_{m=1}^n F_m dx_m \quad (I.08)$$

🌿 dW_{th} : Variation d'énergie thermique

$$dW_{th} = \sum R_j i_j^2 dt \quad (I.09)$$

🌿 dW_{mag} : Variation d'énergie magnétique

$$dW_{mag} = \sum_{j=1}^k i_j d\psi_j \quad (I.10)$$

I.2 CONSTITUTION

Les machines asynchrones sont constituées principalement d'un rotor, d'un stator et de l'entrefer.

I.2.1 Le « STATOR »

C'est la partie stationnaire de la machine. Il est constitué d'un cylindre ferromagnétique entaillé d'encoches permettant d'y loger les bobinages. Ce cylindre est constitué d'un empilement de plaques de tôle afin de limiter les courants de Foucault.

La figure suivante illustre cette littérature :

Source : Machine asynchrone en régime permanent [4]

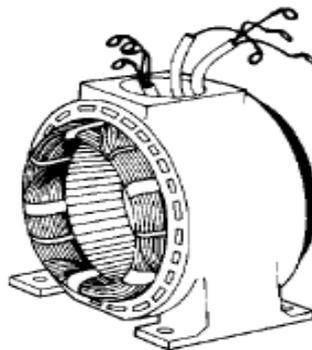


Figure 3 : Stator bobiné

I.2.2 Le « ROTOR »

C'est la partie mobile de la machine. Généralement, il est toujours constitué par des conducteurs ferromagnétiques.

En général, il existe 2 types de rotor :

👉 Rotor à cage d'écureuil ;

👉 Rotor bobiné.

🌿 Rotor à cage d'écureuil :

Source : Machine asynchrone en régime permanent [4]

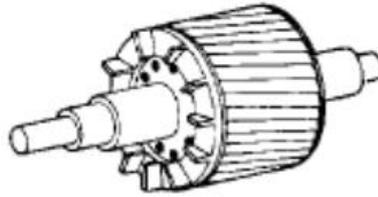


Figure 4 : Rotor à cage d'écureuil

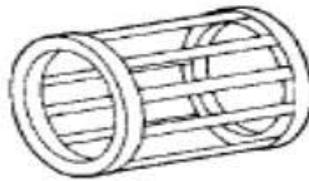


Figure 5 : Schéma d'une cage d'écureuil

C'est le type de rotor le plus fréquent. Inventé par Michail Ossipowitsch au début des années 1890, il est constitué de tôles ferromagnétique et de barres conductrices régulièrement réparties à la périphérie du rotor. Les barres sont reliés entres elles par deux anneaux de court-circuit. Les tôles ferromagnétiques servent à guider les lignes de champ tandis que les barres accueillent les courants induits. Pour les moteurs de faible puissance, les rotors sont réalisés à partir d'un empilement de tôles découpées et isolées les unes des autres (feuilletage) dans lesquelles on injecte un matériau conducteur de manière à constituer les barres ainsi que les anneaux de court-circuit. Pour les moteurs de forte puissance, les barres sont insérées dans le rotor puis les anneaux de court-circuit sont soudés ou brasés aux barres. Les matériaux constituant les barres et les anneaux de court-circuit sont généralement en alliage à base d'aluminium, mais on peut aussi rencontrer du cuivre ou du laiton. En général, les barres sont légèrement inclinées suivant l'axe du rotor afin que le nombre de barres présentes sous une phase statorique soit constant quelle que soit la position du rotor. Ce procédé permet de diminuer la variation de la réluctance du circuit magnétique au cours de la rotation du rotor (ou « effet d'encoches ») et de diminuer ainsi les oscillations de couple.

Remarque :

Il existe aussi des rotors à double cage. Ces rotors sont construits suivant le principe du rotor à cage simple, mais avec deux cages électriquement indépendantes.

🌿 Rotor bobiné :

Source : Machine asynchrone en régime permanent [4]

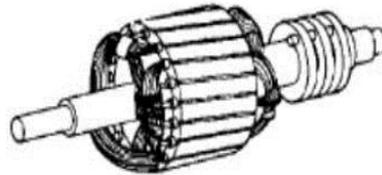


Figure 6 : Rotor bobiné

I.3 PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT

L'enroulement statorique est alimenté par une source triphasée puis les courants statoriques créent un champ dans l'entrefer. La vitesse du champ tournant, appelée vitesse de synchronisme est imposée par la fréquence de la source dans le stator. Ce qui signifie qu'il y a une variation de flux qui traverse l'enroulement rotorique (qui est court-circuité). Ensuite, il apparaît une force électromotrice induite qui va créer les courants rotorique. Et c'est ce courant rotorique qui fait apparaître le couple qui met en mouvement le rotor afin de s'opposer à la variation du flux. La machine est dite asynchrone car elle est dans l'impossibilité, sans la présence d'un entraînement extérieur, d'atteindre la même vitesse que le champ statorique.

Un fonctionnement en génératrice autonome est possible à l'aide de condensateurs connectés sur le stator, à condition qu'il existe un champ magnétique rémanent. Ce fonctionnement est mis en œuvre pour produire de l'électricité à l'aide des éoliennes, des turbines ou d'autres dispositifs qui peuvent fournir de l'énergie mécanique.

I.4 REGIME DE FONCTIONNEMENT

Le régime de fonctionnement est essentiellement en fonction du glissement.

I.4.1 Glissement

Le glissement est une grandeur qui rend compte de l'écart de vitesse de rotation d'une machine asynchrone par rapport à une machine synchrone hypothétique construite avec le même stator. Il correspond à la différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique exprimée sous la forme de pourcentage de la fréquence de rotation.

$$g = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (\text{I.11})$$

Sachant que : $n = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\Omega}{2\pi p}$

Alors on peut avoir les différentes expressions suivantes :

$$g = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} \tag{I.12}$$

Avec :

- 👉 n_s : Fréquence de rotation du champ statorique dans la machine ($n_s = \frac{f}{p} [\frac{tr}{s}]$);
- 👉 n_r : Fréquence de rotation de la machine ;
- 👉 ω_s : Vitesse angulaire de synchronisme du champ statorique dans la machine ;
- 👉 ω_r : Vitesse angulaire de rotation de la machine ;
- 👉 $2p$: Nombre de paire de pôle ;
- 👉 f : Fréquence.

I.4.2 Classification

Trois modes de fonctionnement peuvent se présenter, ceci en fonction de la grandeur du glissement :

- 👉 $-\infty < g < 0$: Fonctionnement en « GENERATRICE » ;
- 👉 $0 \leq g < 1$: Fonctionnement en « MOTEUR » ;
- 👉 $1 < g < +\infty$: Fonctionnement en « FREIN ELECTROMAGNETIQUE ».

L'allure du couple électromagnétique en fonction du glissement explicite et résume la classification de ces modes de fonctionnement :

Source : Prédétermination du comportement en régimes transitoires d'une GAS [9]

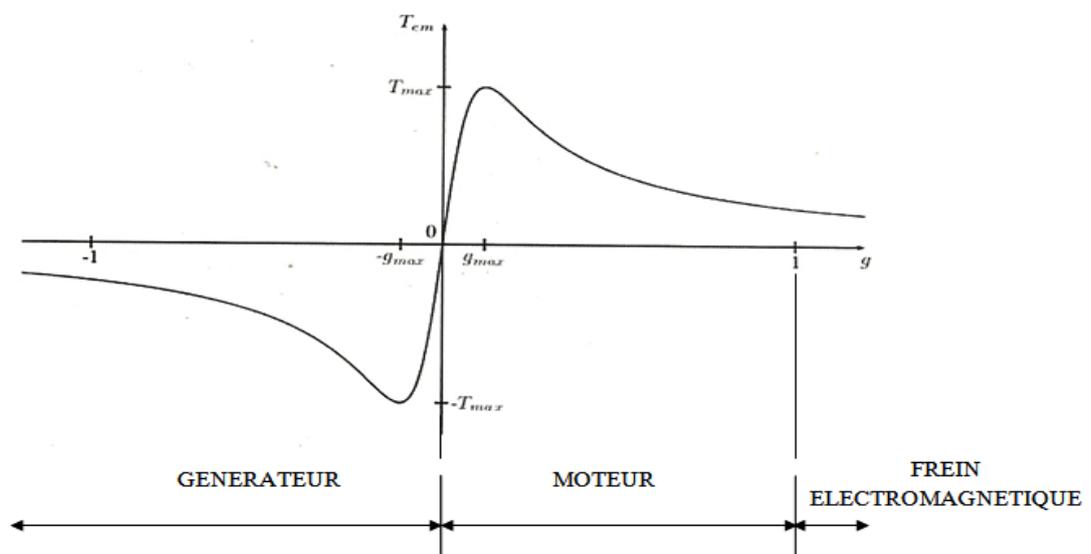


Figure 7 : Couple électromagnétique en fonction du glissement

CHAPITRE II MODELISATION DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE TRIPHASEE EN REGIME EQUILIBRE

Ce chapitre a pour but de nous expliciter le fonctionnement en génératrice d'une machine asynchrone triphasée en régime équilibré. Pour cela, on va adopter les hypothèses simplificatrices suivantes :

- 👉 Les enroulements statoriques sont couplés en triangle ;
- 👉 Les courants traversant les bobinages sont supposés triphasés et équilibrés ;
- 👉 La machine est bipolaire pour faciliter les écritures des diverses expressions.

Le rotor tourne dans le sens du champ magnétique glissant (sens positif conventionnel) et qu'à l'instant initial, l'angle mécanique est nul.

II.1 CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT EN GENERATRICE

II.1.1 Conditions générales

Trois conditions s'avèrent nécessaires et suffisantes pour qu'une machine asynchrone fonctionne en générateur :

- 👉 Excitation pour avoir une magnétisation de l'entrefer à l'aide d'une batterie de condensateur;
- 👉 Existence de rémanence pour l'amorçage de la génératrice asynchrone;
- 👉 Le rotor doit être entraîné à l'hypersynchronisme, d'où la nécessité d'un organe d'entraînement comme la turbine.

Il est important de rappeler que, grâce à l'emploi d'une batterie de condensateur, on peut rendre autonome une génératrice asynchrone.

II.1.2 Capacité d'excitation à vide

On montre qu'en régime équilibré, la capacité d'excitation à vide [9] est :

$$C_0 = \frac{1}{(L_{hd} + L_{\sigma_s})\omega_m^2} \quad (\text{II.01})$$

Où :

👉 ω_m est la pulsation mécanique de glissement nul ;

👉 L_{hd} et $L_{\sigma s}$ sont les inductances de fuite au niveau du stator et la branche magnétisante de la machine.

Pratiquement, la capacité à brancher aux bornes du stator doit être supérieure à C_0 pour la compensation en énergie réactive, donc pour pouvoir fonctionner en régime équilibré.

II.1.3 Excitation et désexcitation de la génératrice

II.1.3.a Excitation

D'abord, seule la batterie de condensateur est connectée aux bornes de la machine. Puis on accélère progressivement la génératrice. À partir d'une certaine vitesse, il apparaît une tension aux bornes de cette dernière. Lorsque la vitesse du synchronisme est atteinte, les charges peuvent être connectées aux bornes de la génératrice.

II.1.3.b Désexcitation

La désaimantation d'une génératrice asynchrone est possible dans le cas où il y a une très forte augmentation des charges ou lors d'un démarrage en charge. Dans le cas où la tension rémanente est nulle (machine totalement désaimantée), l'application momentanée d'une faible tension continue (à l'aide d'une batterie d'accumulateur) suffit pour ré-aimanter la machine. Pratiquement, on utilise une batterie de 24V-250Ah.

II.2 MODELISATION

II.2.1 Schéma équivalent en « T »

Le schéma équivalent est indispensable pour la modélisation de la génératrice asynchrone, il se présente comme suit :

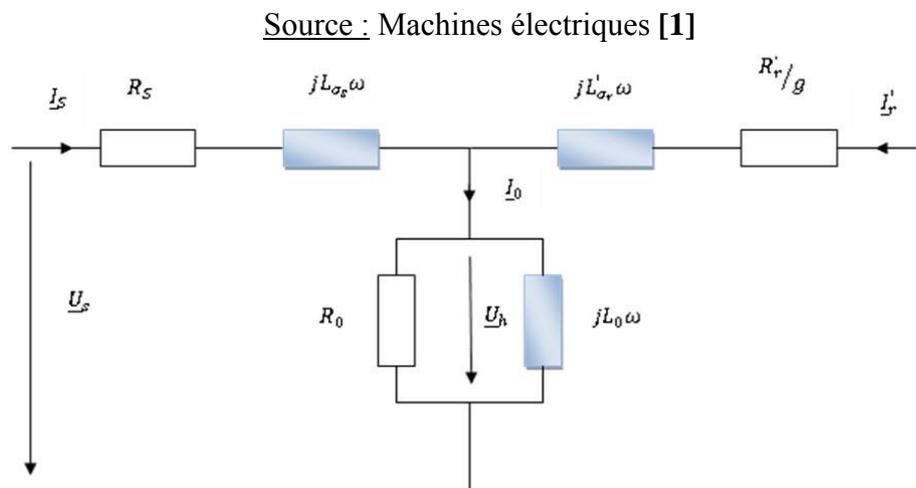


Figure 8 : Schéma équivalent en " T "

Avec :

- 👉 \underline{U}_S : Tension aux bornes du stator ;
- 👉 \underline{U}_h : Tension réduite à la résistance principale ;
- 👉 \underline{I}_S : Courant statorique ;
- 👉 \underline{I}_0 : Courant dans le circuit magnétisant ;
- 👉 \underline{I}'_r : Courant rotorique ;
- 👉 R_S : Résistance statorique ;
- 👉 R_0 : Résistance dans le circuit magnétisant ;
- 👉 R'_r : Résistance rotorique ramenée au stator ;
- 👉 L_{σ_s} : Inductance de fuite statorique ;
- 👉 L'_{σ_r} : Inductance de fuite ramenée au stator ;
- 👉 ω : Pulsation ($\omega = 2\pi f$) ;
- 👉 g : Glissement.

II.2.2 Equation de fonctionnement

II.2.2.a Equations aux tensions

Schématiquement, la loi de la tension induite généralisée (LTIG) est représentée comme suit :

Source : Auteur

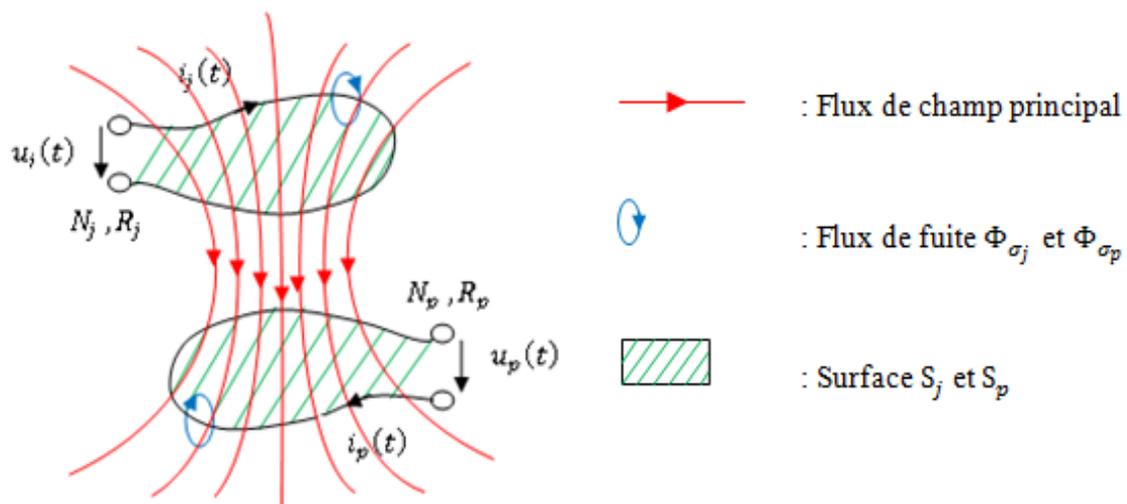


Figure 9 : Illustration de la LTIG

Ainsi, on peut écrire :

$$u_j = R_j i_j + \frac{d}{dt}(\psi_j) \quad (\text{II.02})$$

Avec :

$$\psi_j = \sum (L_{jp} i_p) \quad (\text{II.03})$$

On a :

$$\frac{d}{dt}(\psi_j) = \frac{d}{dt} \left(\sum (L_{jp} i_p) \right) = \sum_{p=1}^k \left(\frac{dL_{jp}}{dt} i_p + L_{jp} \frac{di_p}{dt} \right) \quad (\text{II.04})$$

Pour une machine asynchrone triphasée, on a alors :

👉 Pour le stator

$$[u_{123}] = R_s [i_{1,2,3}] + \frac{d\psi_{1,2,3}}{dt} \quad (\text{II.05})$$

Avec :

$$[u_{123}] = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix} \quad (\text{II.06})$$

$$[i_{abc}] = \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix} \quad (\text{II.07})$$

$$\left[\frac{d\psi_{1,2,3}}{dt} \right] = \begin{pmatrix} \frac{d\psi_1}{dt} \\ \frac{d\psi_2}{dt} \\ \frac{d\psi_3}{dt} \end{pmatrix} \quad (\text{II.08})$$

👉 Pour le rotor

$$[u_{abc}] = R_r [i_{abc}] + \frac{d\psi_{a,b,c}}{dt} \quad (\text{II.09})$$

Avec :

$$[u_{abc}] = \begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} \quad (\text{II.10})$$

$$[i_{abc}] = \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (\text{II.11})$$

$$\left[\frac{d\psi_{abc}}{dt} \right] = \begin{pmatrix} \frac{d\psi_a}{dt} \\ \frac{d\psi_b}{dt} \\ \frac{d\psi_c}{dt} \end{pmatrix} \quad (\text{II.12})$$

II.2.2.b Equations des flux

👉 Pour le stator

$$\psi_s = [L_s][i_s] + [L_{sr}][i_r] \quad (\text{II.13})$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} \\ L_{12} & L_{22} & L_{23} \\ L_{13} & L_{23} & L_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{12} \\ L_{12} & L_{11} & L_{12} \\ L_{12} & L_{12} & L_{11} \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

$$[L_{sr}] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

L_{11} : Inductance d'une phase statorique ;

$L_{12} = L_{21}$: Inductance mutuelle entre phase statorique et rotorique ;

$[L_{sr}]$: Matrice d'inductance mutuelle statorique-rotorique.

👉 Pour le rotor

$$\psi_r = [L_r][i_r] + [L_{sr}]^t[i_s] \quad (\text{II.16})$$

Avec :

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ab} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ac} & L_{bc} & L_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ab} \\ L_{ab} & L_{aa} & L_{ab} \\ L_{ab} & L_{ab} & L_{ab} \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

L_{aa} : Inductance d'une phase rotorique ;

$L_{ab} = L_{ba}$: Inductance mutuelle entre phase rotorique et statorique ;

$[L_{sr}]^t$: Transposé de la matrice d'inductance mutuelle statorique-rotorique.

II.2.2.c Bilan des puissances

Le bilan de puissance est représenté comme suit :

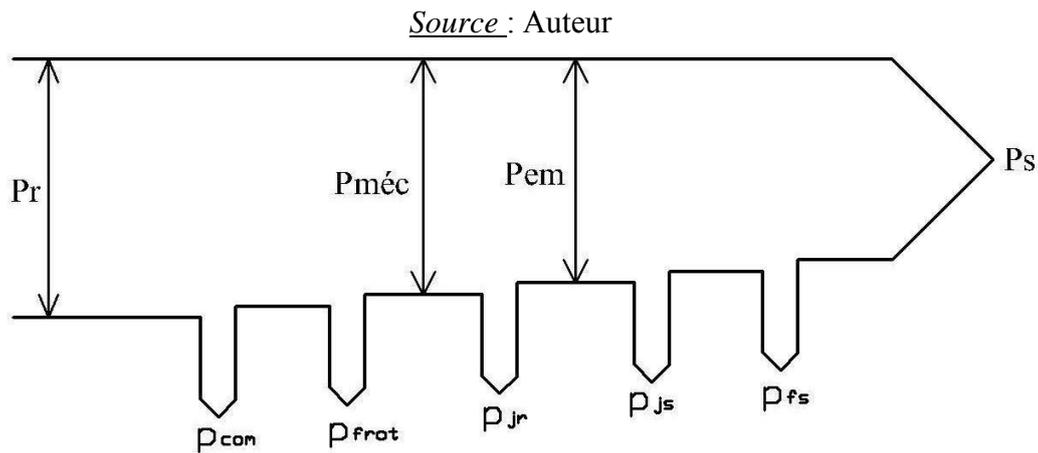


Figure 10 : Bilan de puissance d'une génératrice

Avec :

👉 P_r : Puissance mécanique reçue par le rotor

$$P_r = P_{méc} + p_{com} + p_{frot} \quad (II.18)$$

👉 $P_{méc}$: Puissance mécanique

$$P_{méc} = P_r - p_{com} - p_{frot} \quad (II.19)$$

👉 P_{em} : Puissance électromagnétique

$$P_{em} = (1 - g)P_{méc} = P_{méc} - p_{jr} \quad (II.20)$$

👉 P_s : Puissance électrique disponible au stator

$$P_s = 3 * U_s * I_s * \cos\varphi = P_{em} - p_{js} - p_{fs} \quad (II.21)$$

👉 p_{fs} : Pertes en fer

$$p_{fs} = 3R_0 I_0^2 \quad (II.22)$$

👉 p_{js} : Pertes en Joule statorique

$$p_{js} = 3R_s I_s^2 \quad (II.23)$$

👉 p_{jr} : Pertes en Joule rotorique

$$p_{jr} = 3R_r I_r^2 \quad (II.24)$$

👉 p_{frot} : Pertes dues aux roulements et au ventilateur

👉 p_{com} : Pertes complémentaires

Ainsi, le rendement de la génératrice est le rapport entre la puissance électrique délivrée aux bornes du stator et la puissance mécanique fournie au rotor, c'est-à-dire :

$$\eta = \frac{P_s}{P_r} \quad (II.25)$$

CHAPITRE III POSITION DU PROBLEME

Comme la machine asynchrone est équivalente à un système électromécanique, donc elle est aussi réversible. Ainsi, le présent travail consiste à exploiter cette réversibilité pour produire de l'énergie électrique. Pour cela, la MAS doit être entraînée à l'hypersynchronisme, d'où la nécessité d'un organe d'entraînement ; et doit utiliser une autre source d'énergie électrique ou d'une batterie de condensateur pour assurer l'apport en énergie réactive.

On rappelle que l'emploi d'une batterie de condensateur rend la génératrice autonome.

Le schéma synoptique suivant illustre la position du problème :

Source : Auteur

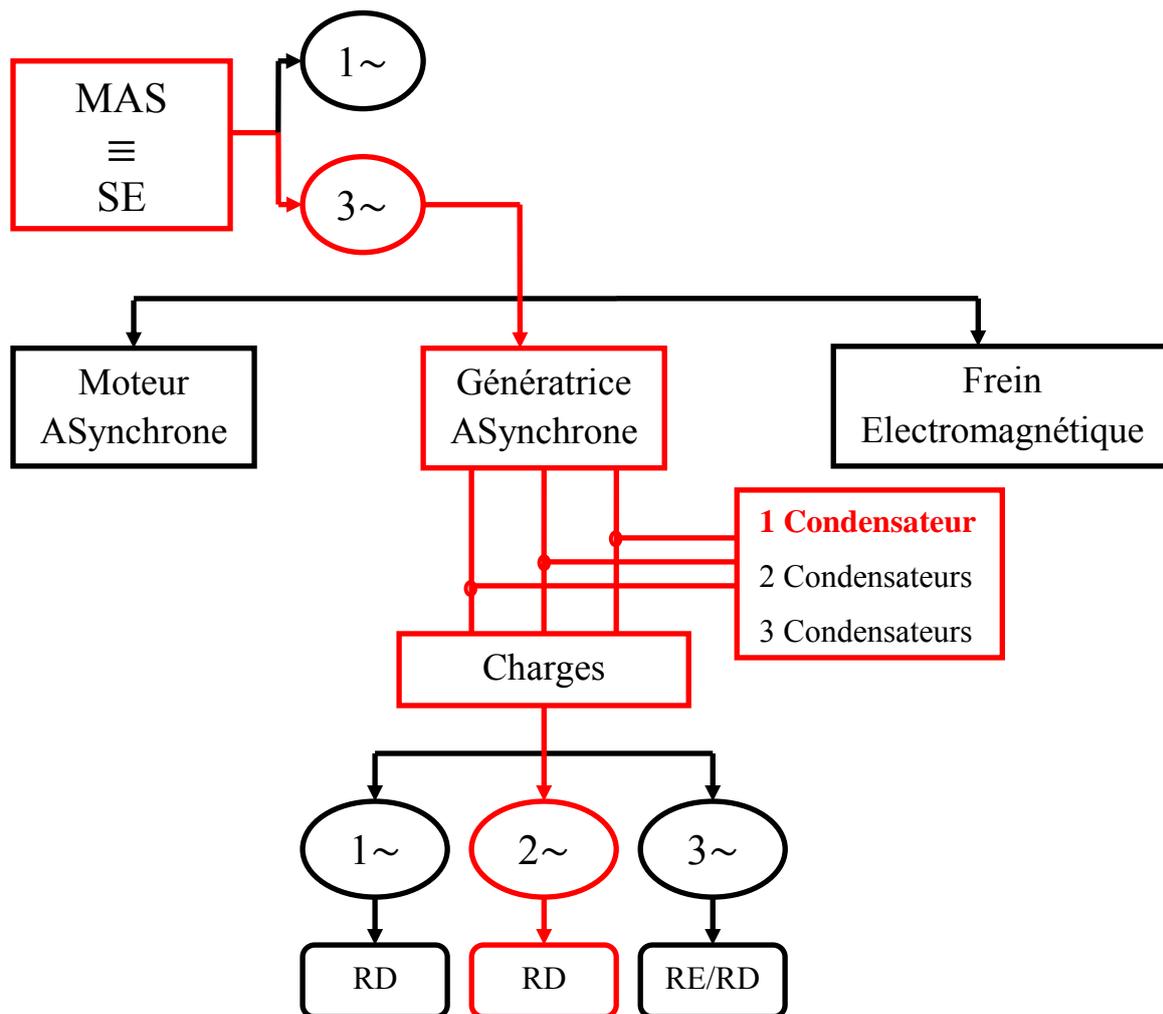


Figure 11 : Position du problème

En supposant qu'il n'y a aucun problème au niveau de la turbine, l'étude va être fixée sur l'exploitation d'une machine asynchrone triphasée qui travaille en tant que génératrice.

Pour assurer le fonctionnement en génératrice asynchrone, on doit brancher aux bornes du stator un (01), deux (02), trois (03), ou voir plusieurs condensateurs pour garantir l'apport en énergie électrique.

Les charges à connecter aux bornes statoriques peuvent être triphasées, biphasées ou même monophasée. En supposant la machine équilibrée de fabrication, le problème se pose alors au niveau des charges à appliquer.

Une charge triphasée branchée aux bornes du stator, formant un système {GAS – CH 3~}, peut entraîner un fonctionnement en régime équilibré ou déséquilibré (si les valeurs des charges sont différentes). Dans le cas où les charges à appliquer sont biphasées ou monophasée, le fonctionnement en régime déséquilibré est inévitable. Sachant que le fonctionnement en ce régime peut provoquer des « dégâts » plus ou moins importants, alors, pour minimiser (éviter) cela, il faut résoudre les problèmes du système {GAS - CH}.

Parmi les recherches déjà effectuées, on peut citer :

- 👉 « ELABORATION D'UN LOGICIEL DE PREDETERMINATION DU COMPORTEMENT EN CHARGE D'UNE GENERATRICE ASYNCHRONE TRIPHASEE ILOTEE EN MARCHE BIPHASEE », réalisée par Monsieur Maheritiana Rivonandrasana RAKOTOMAMONJY en 2005. En effet cet ouvrage utilise deux (2) condensateurs pour assurer la magnétisation de l'entrefer ;
- 👉 « PREDETERMINATION DU COMPORTEMENT D'UNE MACHINE ASYNCHRONE TRIPHASEE EN MARCHE INVERSE-MODELISATION et REGIME TRANSITOIRE », réalisée par Monsieur Nestor RAZANAMPARANY en 2004 ;
- 👉 « ANALYSE NUMERIQUE DU COMPORTEMENT EN CHARGE D'UNE GENERATRICE ASYNCHRONE MONOPHASEE », réalisée par Monsieur Tsiry Angelos ANDRIAMANAMPISOA en 2002 ;
- 👉 « ETUDE DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE TRIPHASEE ILOTEE SUR CHARGE MONOPHASEE », réalisée par Monsieur Harivelo RAKOTOZANANY et Monsieur Hansen Andry RATSIMBA en 2000. Cet ouvrage utilise deux (2) condensateurs pour assurer la magnétisation l'entrefer.

Vu que ces ouvrages scientifiques sont encore incomplets, alors, pour clore les recherches dans ce domaine (GAS 3~), le projet va être orienté à l'étude d'une génératrice asynchrone triphasée excitée par un seul (01) condensateur et dont les charges connectées aux bornes du stator sont biphasées.

En se référant aux données et aux paramètres obtenus par des différents essais classiques d'une machine asynchrone, on va développer toutes les démarches théoriques suivies d'une simulation des résultats avec le logiciel MATLAB 7.8. A partir de cela, on a l'occasion de concevoir un logiciel résolvant ce problème de déséquilibre pour n'importe quelle caractéristique de MAS triphasée disponible.

En supposant les charges purement résistives, on se demande alors :

1. Pour quelle valeur du condensateur et des charges la machine retrouve-t-elle son point de fonctionnement nominal ?
2. Qu'est-ce qui va se passer s'il y a surcharge ou délestage ?
3. Les résultats obtenus sont-ils meilleurs par rapports aux autres résultats précédents ?

METHODOLOGIE

CHAPITRE IV MODELISATION DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE TRIPHASEE ILOTEE EN MARCHE BIPHASEE EN REGIME DESEQUILIBRE

Le but de ce chapitre est d'expliciter le fonctionnement en régime déséquilibré d'une génératrice asynchrone triphasée ilotée en marche biphasée.

On rappelle qu'un système de trois grandeurs de même nature et de même pulsation est dit équilibré si ces grandeurs ont même amplitude et sont déphasées les unes des autres de $120^\circ (2\pi/3 \text{ rad})$. Un système triphasé qui ne respecte pas ces conditions est dit « système déséquilibré ».

Dans toute la suite, on supposera que la machine est d'origine équilibrée. Ainsi, l'outil mathématique le plus approprié à l'étude du régime déséquilibré est la « Transformation de FORTESCUE ».

VI.1 TRANSFORMATION DE FORTESCUE

Selon FORTESCUE [10], un système triphasé déséquilibré peut être décomposé en trois composantes :

- 👉 Composante directe ;
- 👉 Composante inverse ;
- 👉 Composante homopolaire.

Ainsi, on a les relations matricielles :

$$\begin{pmatrix} \underline{G}_1 \\ \underline{G}_2 \\ \underline{G}_3 \end{pmatrix} = [\underline{F}] \begin{pmatrix} \underline{G}_d \\ \underline{G}_i \\ \underline{G}_o \end{pmatrix} \quad (\text{IV.01})$$

$$\begin{pmatrix} \underline{G}_d \\ \underline{G}_i \\ \underline{G}_o \end{pmatrix} = [\underline{F}]^{-1} \begin{pmatrix} \underline{G}_1 \\ \underline{G}_2 \\ \underline{G}_3 \end{pmatrix} \quad (\text{IV.02})$$

Avec,

$$[\underline{F}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.03})$$

$$[\underline{F}]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.04})$$

Où,

👉 G_1, G_2 et G_3 sont respectivement les grandeurs 1,2 et 3 ;

👉 G_d, G_i et G_o sont respectivement les grandeurs directes, inverses et homopolaire ;

👉 « a » représente la rotation de $2\pi/3$, c'est-à-dire : $a = e^{j2\pi/3}$. Par conséquent on a :

$$1 + a + a^2 = 0 \quad (\text{IV.05})$$

$$a^3 = 1 \quad (\text{IV.06})$$

VI.2 MODELISATION

L'installation d'une charge déséquilibrée aux bornes de la génératrice provoque des déséquilibres, surtout aux grandeurs électriques de la machine. La marche biphasée de la génératrice est un cas particulier de déséquilibre puisque deux charges ne peuvent pas constituer un système de charge équilibrée lorsqu'on les branche aux bornes de la génératrice. Ainsi, pour pouvoir équilibrer le système {GAS-CH}, les courants de charges seront décomposés en composante directe et en composante inverse. Sachant que l'enroulement statorique est sans neutre en sortie, la composante homopolaire est éliminée.

De ce fait,

👉 La composante directe crée un champ glissant tournant à la vitesse $\Omega_d = \frac{\omega}{p}$, où ω est la pulsation des courants et p le nombre de paires de pôles. Sachant la pulsation de rotation du rotor Ω , le glissement s'écrit :

$$g_d = \frac{\Omega_d - \Omega}{\Omega_d} \quad (\text{IV.07})$$

👉 La composante inverse crée aussi un champ glissant tournant à la vitesse $\Omega_i = -\Omega_d$. Le glissement devient :

$$g_i = \frac{\Omega_i - \Omega}{\Omega_i} = \frac{-\Omega_d - \Omega}{-\Omega_d} = 2 - g_d \quad (\text{IV.08})$$

👉 La composante homopolaire ne peut pas créer un champ magnétique glissant. Autrement dit, la superposition des états directs et inverses définit le fonctionnement de la machine.

La modélisation de la génératrice en marche biphasée se fera donc à l'aide des deux (2) schémas équivalents en « T » correspondant respectivement au fonctionnement direct et au fonctionnement inverse.

Source : Prédétermination du comportement en charge d'une génératrice asynchrone [8]

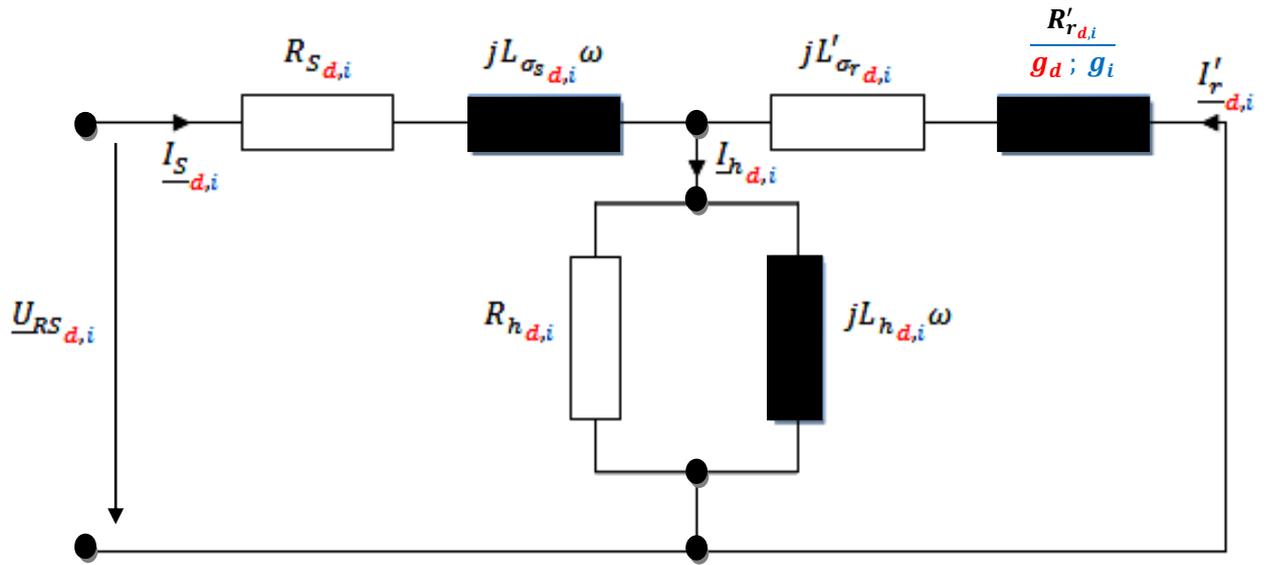


Figure 12: Schéma équivalent monophasé en « T », décomposé en système direct et inverse

De ce schéma, on peut trouver facilement les impédances directes et inverses de la génératrice :

Les impédances statoriques sont :

$$\begin{cases} \underline{Z}_{s_d} = R_{s_d} + jL_{\sigma_{s_d}}\omega \\ \underline{Z}_{s_i} = R_{s_i} + jL_{\sigma_{s_i}}\omega \end{cases} \quad (IV.09)$$

Au niveau du rotor, on a :

$$\begin{cases} \underline{Z}_{r_d} = \frac{R'_{r_d}}{g} + jL'_{\sigma_{r_d}}\omega \\ \underline{Z}_{r_i} = \frac{R'_{r_i}}{2-g} + jL'_{\sigma_{r_i}}\omega \end{cases} \quad (IV.10)$$

Dans la branche magnétisante, on a :

$$\begin{cases} \underline{Z}_{h_d} = \frac{R_{h_d}(L_{h_d}\omega)^2}{R_{h_d}^2 + (L_{h_d}\omega)^2} + j \frac{R_{h_d}^2 L_{h_d}\omega}{R_{h_d}^2 + (L_{h_d}\omega)^2} \\ \underline{Z}_{h_i} = \frac{R_{h_i}(L_{h_i}\omega)^2}{R_{h_i}^2 + (L_{h_i}\omega)^2} + j \frac{R_{h_i}^2 L_{h_i}\omega}{R_{h_i}^2 + (L_{h_i}\omega)^2} \end{cases} \quad (IV.11)$$

D'où les impédances directe et inverse de la machine :

$$\begin{cases} \underline{Z}_{m_d} = \underline{Z}_{s_d} + \frac{\underline{Z}_{r_d}\underline{Z}_{h_d}}{\underline{Z}_{r_d} + \underline{Z}_{h_d}} \\ \underline{Z}_{m_i} = \underline{Z}_{s_i} + \frac{\underline{Z}_{r_i}\underline{Z}_{h_i}}{\underline{Z}_{r_i} + \underline{Z}_{h_i}} \end{cases} \quad (\text{IV.12})$$

Dans toute la suite, on va utiliser ce schéma pour présenter une phase de la machine asynchrone.

CHAPITRE V EQUILIBRAGE DE LA GENERATRICE

L'équilibrage de la génératrice asynchrone revient à éliminer les composantes inverse et homopolaire des courants de charge. En supposant que le couplage de la machine est en «triangle», la composante homopolaire du courant de charge est nulle (système sans neutre sortie : $\underline{J}_{RS_0} = 0$). La composante inverse est éliminée par la présence d'une (des) condensateur(s) (d'équilibrage).

Cette étude sera fixée sur le système « **GENERATRICE (équilibré) - CHARGES (déséquilibrées)** »

V.1 CONDITIONS GENERALES D'EQUILIBRE

On va utiliser le schéma du montage suivant pour déterminer le point de fonctionnement nominal et la(les) capacité(s) d'excitation.

Source : Auteur

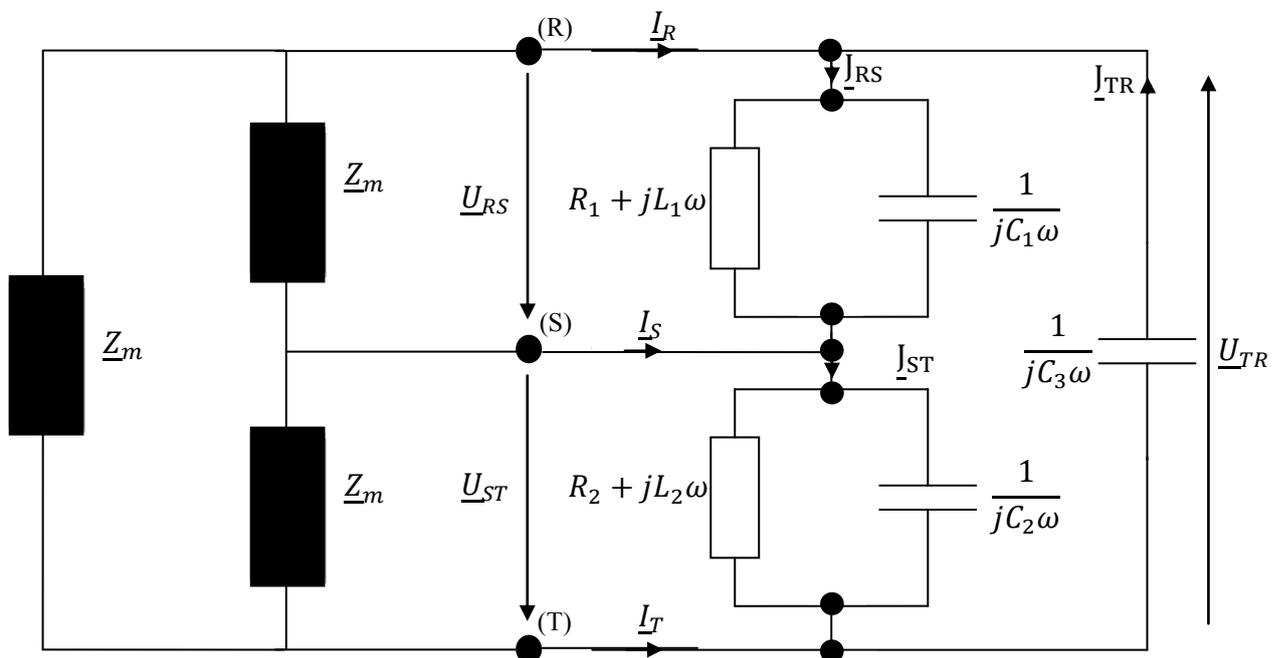


Figure 13 : Schéma multifilaire équivalent du système

Où les données connues sont :

- 👉 \underline{Z}_m : Impédance équivalente unifilaire de la machine ;
- 👉 R_1, L_1 et R_2, L_2 : Charges branchées aux bornes (RS) et (ST) du stator.

Et les inconnues sont les capacités C_1 , C_2 et C_3 .

En notant \underline{Y}_{RS} , \underline{Y}_{ST} et \underline{Y}_{TR} les admittances connectées aux bornes RS, ST et TR, on a :

$$\underline{Y}_{RS} = \frac{1}{R_1 + jX_1} + jC_1\omega \quad (\text{V.01})$$

$$\underline{Y}_{ST} = \frac{1}{R_2 + jX_2} + jC_2\omega \quad (\text{V.02})$$

$$\underline{Y}_{TR} = jC_3\omega \quad (\text{V.03})$$

Avec $X_1 = L_1\omega$ et $X_2 = L_2\omega$.

En appliquant le théorème de FORTESCUE et en prenant comme référence \underline{J}_{RS} , on a les relations matricielles suivantes :

$$\begin{pmatrix} \underline{J}_{RS} \\ \underline{J}_{ST} \\ \underline{J}_{TR} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \underline{J}_{RSd} \\ \underline{J}_{RSi} \\ \underline{J}_{RS0} \end{pmatrix} \quad (\text{V.04})$$

$$\begin{pmatrix} \underline{Y}_{RS} \\ \underline{Y}_{ST} \\ \underline{Y}_{TR} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \underline{Y}_{RSd} \\ \underline{Y}_{RSi} \\ \underline{Y}_{RS0} \end{pmatrix} \quad (\text{V.05})$$

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_{RS} \\ \underline{U}_{ST} \\ \underline{U}_{TR} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \underline{U}_{RSd} \\ \underline{U}_{RSi} \\ \underline{U}_{RS0} \end{pmatrix} \quad (\text{V.06})$$

Ainsi, d'après la fig. V.1, on peut écrire les relations entre les courants de lignes et les courants de phases :

$$\begin{cases} \underline{I}_R = \underline{J}_{RS} - \underline{J}_{TR} \\ \underline{I}_S = \underline{J}_{ST} - \underline{J}_{RS} \\ \underline{I}_T = \underline{J}_{TR} - \underline{J}_{ST} \end{cases} \quad (\text{V.07})$$

En introduisant l'équation (V.04) dans (V.07), avec $\underline{J}_{RS0} = 0$, on a les relations suivantes :

$$\begin{cases} \underline{I}_R = (1 - a)\underline{J}_{RSd} - (1 - a^2)\underline{J}_{RSi} \\ \underline{I}_S = a^2(1 - a)\underline{J}_{RSd} - a(1 - a^2)\underline{J}_{RSi} \\ \underline{I}_T = a(1 - a)\underline{J}_{RSd} - a^2(1 - a^2)\underline{J}_{RSi} \end{cases} \quad (\text{V.08})$$

Sous forme matricielle, on a :

$$\begin{pmatrix} \underline{I}_R \\ \underline{I}_S \\ \underline{I}_T \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ a^2 & a \\ a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (1 - a)\underline{J}_{RSd} \\ (1 - a^2)\underline{J}_{RSi} \end{bmatrix} \quad (\text{V.09})$$

Comme $\underline{J}_{RS0} = 0$, alors $\underline{I}_{RS0} = 0$. Ainsi, on retrouve facilement les relations suivantes :

$$\begin{cases} \underline{J}_{RSd} = (1 - a)\underline{J}_{RSd} \\ \underline{J}_{RSi} = (1 - a^2)\underline{J}_{RSi} \end{cases} \quad (\text{V.10})$$

D'après la fig. V.1, on peut écrire :

$$\begin{pmatrix} \underline{J}_{RS} \\ \underline{J}_{ST} \\ \underline{J}_{TR} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{Y}_{RS} \\ \underline{Y}_{ST} \\ \underline{Y}_{TR} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \underline{U}_{RS} \\ \underline{U}_{ST} \\ \underline{U}_{TR} \end{pmatrix} \quad (\text{V.11})$$

Après identification, les équations (V.04), (V.05) et (V.06) introduites dans l'équation (V.11) donne :

$$\begin{cases} \underline{J}_{RSd} = \underline{Y}_{RSo}\underline{U}_{RSd} + \underline{Y}_{RSi}\underline{U}_{RSi} + \underline{Y}_{RS0}\underline{U}_{RSd} \\ \underline{J}_{RSi} = \underline{Y}_{RSd}\underline{U}_{RSd} + \underline{Y}_{RS0}\underline{U}_{RSi} + \underline{Y}_{RSi}\underline{U}_{RS0} \\ \underline{J}_{RS0} = \underline{Y}_{RSi}\underline{U}_{RSd} + \underline{Y}_{RSd}\underline{U}_{RSi} + \underline{Y}_{RS0}\underline{U}_{RS0} \end{cases} \quad (\text{V.12})$$

Comme on a un système triphasé sans neutre sortie, alors $J_{RS0} = 0$, par conséquent $U_{RS0} = 0$;

Ainsi, comme on veut avoir un système équilibré, alors $J_{RSi} = 0$, donc $U_{RSi} = 0$;

$$\underline{J}_{RSi} = 0 = \underline{Y}_{RSd}\underline{U}_{RSd} + \underline{Y}_{RS0} * 0 + \underline{Y}_{RSi} * 0 \quad (\text{V.13})$$

Alors, $\underline{Y}_{RSd}\underline{U}_{RSd} = 0$

Or \underline{U}_{RSd} est la tension que va fournir la génératrice, donc non nulle.

La condition générale d'équilibre de la génératrice, quelque soit le type de charge (équilibrée ou non), est alors imposée par l'équation suivante :

$$\underline{Y}_{RSd} = \frac{1}{3}(\underline{Y}_{RS} + a\underline{Y}_{ST} + a^2\underline{Y}_{TR}) = \mathbf{0} \quad (\text{V.14})$$

V.2 DETERMINATION DE LA CAPACITE D'EXCITATION

En utilisant toujours la fig. V.1, étudions la condition d'équilibre pour déterminer la capacité d'excitation de la génératrice.

D'après les équations (V.01), (V.02) et (V.03), on peut trouver facilement les expressions suivantes :

$$\begin{cases} Y_{RS} = \frac{R_1}{R_1^2 + X_1^2} + j \left(C_1\omega - \frac{X_1}{R_1^2 + X_1^2} \right) \\ aY_{ST} = -\frac{1}{2} \left(\frac{R_2 - \sqrt{3}X_2}{R_2^2 + X_2^2} + \sqrt{3}C_2\omega \right) + j \frac{1}{2} \left(\frac{\sqrt{3}R_2 + X_2}{R_2^2 + X_2^2} - C_2\omega \right) \\ a^2Y_{TR} = \frac{1}{2} (\sqrt{3}C_3\omega - jC_3\omega) \end{cases} \quad (\text{V.15})$$

En introduisant le système d'équation (V.15) dans l'expression (V.14), on aura :

$$\begin{cases} C_2 - C_3 = \frac{1}{\sqrt{3}\omega} \left(\frac{2R_1}{R_1^2 + X_1^2} - \frac{R_2 - \sqrt{3}X_2}{R_2^2 + X_2^2} \right) \\ C_2 + C_3 = 2C_1 - \frac{1}{\omega} \left(\frac{2X_1}{R_1^2 + X_1^2} + \frac{\sqrt{3}R_2 + X_2}{R_2^2 + X_2^2} \right) \end{cases} \quad (\text{V.16})$$

En supposant que les charges sont purement résistives (c'est-à-dire $X_1 = 0$ et $X_2 = 0$), on aura :

$$C_2 - C_3 = \frac{1}{\sqrt{3}\omega} \left(\frac{2}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (\text{V.17})$$

$$C_2 + C_3 = 2C_1 + \frac{\sqrt{3}}{R_2\omega} \quad (\text{V.18})$$

Ainsi, pour raison d'économie, on va essayer de supprimer un ou deux condensateurs à l'aide de ces dernières équations. En paramétrant ces équations par le condensateur C_1 , on a :

$$C_2 = C_1 + \frac{1}{\sqrt{3}\omega} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (\text{V.19})$$

$$C_3 = C_1 + \frac{1}{\sqrt{3}\omega} \left(\frac{2}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) \quad (\text{V.20})$$

Pour $C_1 = 0$, les expressions de (V.19) et (V.20) deviennent :

$$C_2 = \frac{1}{\sqrt{3}\omega} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (\text{V.21})$$

$$C_3 = \frac{1}{\sqrt{3}\omega} \left(\frac{2}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) \quad (\text{V.22})$$

👉 Si $C_3 = 0$, les équations (V.21) et (V.22) permettent d'écrire :

$$C_2 = \frac{1}{\sqrt{3}\omega} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (\text{V.23})$$

$$R_2 = 2R_1 \quad (\text{V.24})$$

👉 Si $C_2 = 0$, on trouvera :

$$C_3 = \frac{\sqrt{3}}{R_2\omega} \quad (\text{V.25})$$

$$R_1 = -R_2 \quad (\text{V.26})$$

La condition (V.26) est absurde puisque R_1 et R_2 sont des résistances, donc supérieures à 0 (zéro), c'est-à-dire que $\forall j \in N$, on a toujours : $R_j \geq 0$. Donc, C_2 ne peut pas être nul.

Finalement, on a comme résultat:

$$\begin{cases} C_1 = 0 \\ C_2 = \frac{\sqrt{3}}{2R_1\omega} \\ C_3 = 0 \end{cases} \quad (\text{V.27})$$

Ainsi, on doit remplir la condition suivante :

$$R_1 = \frac{1}{2}R_2 \quad (\text{V.28})$$

Or, dans la pratique, remplir cette condition est presque impossible. Etudions alors le cas où cette condition n'est pas remplie pour pouvoir généraliser la valeur du condensateur à connecter.

Ainsi, deux cas peuvent se présenter :

👉 Cas 1 : $R_2 < 2R_1$

$$R_2 < 2R_1 \Leftrightarrow \frac{1}{R_2} > \frac{1}{2R_1} \Leftrightarrow \frac{1}{\sqrt{3}\omega} \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1} \right) > \frac{1}{\sqrt{3}\omega} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{2R_1} \right) \Leftrightarrow C_2 > \frac{\sqrt{3}}{2R_1\omega} \quad (\text{V.29})$$

👉 Cas 2 : $R_2 > 2R_1$

$$R_2 > 2R_1 \Leftrightarrow \frac{1}{R_2} < \frac{1}{2R_1} \Leftrightarrow \frac{1}{\sqrt{3}\omega} \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1} \right) < \frac{1}{\sqrt{3}\omega} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{2R_1} \right) \Leftrightarrow C_2 < \frac{\sqrt{3}}{2R_1\omega} \quad (\text{V.30})$$

On voit bien que la valeur du condensateur varie en fonction des charges, en prenant k le rapport entre R_2 et R_1 , on a :

$$k = \frac{R_2}{R_1} \text{ avec } k > 0 \quad (\text{V.31})$$

$$C_2 = \frac{(k+1)\sqrt{3}}{3kR_1\omega} \quad (\text{V.32})$$

Pour $k = 2$, on retrouve les expressions (V.27) et (V.28) et le système est toujours équilibré. Ainsi, pour toute valeur de $k \neq 2$, le système redeviendra déséquilibré.

Le schéma équivalent de notre système devient alors comme suit :

Source : Auteur

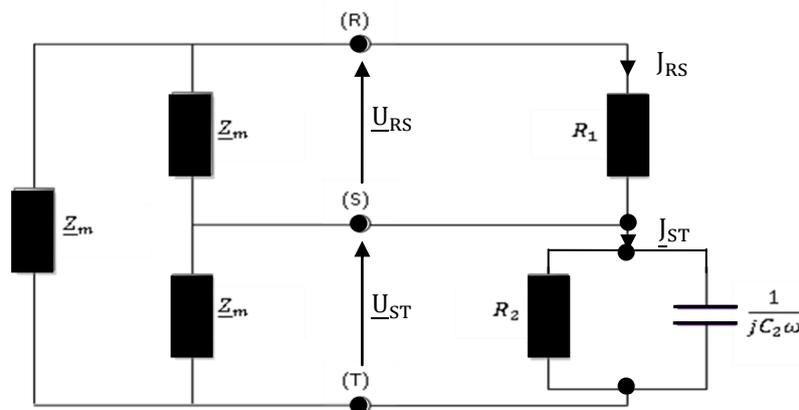


Figure 14 : Schéma de fonctionnement

Dans toute la suite, l'étude va être basée sur ce schéma d'installation.

Remarque :

A l'équilibre, les admittances directes et inverses sont nulles ($\underline{Y}_{RSd} = 0$ et $\underline{Y}_{RSi} = 0$), l'admittance homopolaire \underline{Y}_{RS0} est l'équivalent de l'admittance équivalent des charges branchées (virtuellement) sur les trois phases du stator de la génératrice.

V.3 SCHEMA MONOPHASE EQUIVALENT

Notre but ici est de déterminer le schéma équivalent monophasé du système {GAS-CH} pour la détermination de la tension de sortie de la machine.

On sait que le branchement des charges biphasées entraînent inévitablement le déséquilibre du système, or, tout système déséquilibré est équivalent à un système fictif équilibré.

Le schéma monophasé équivalent est alors représenté comme suit :

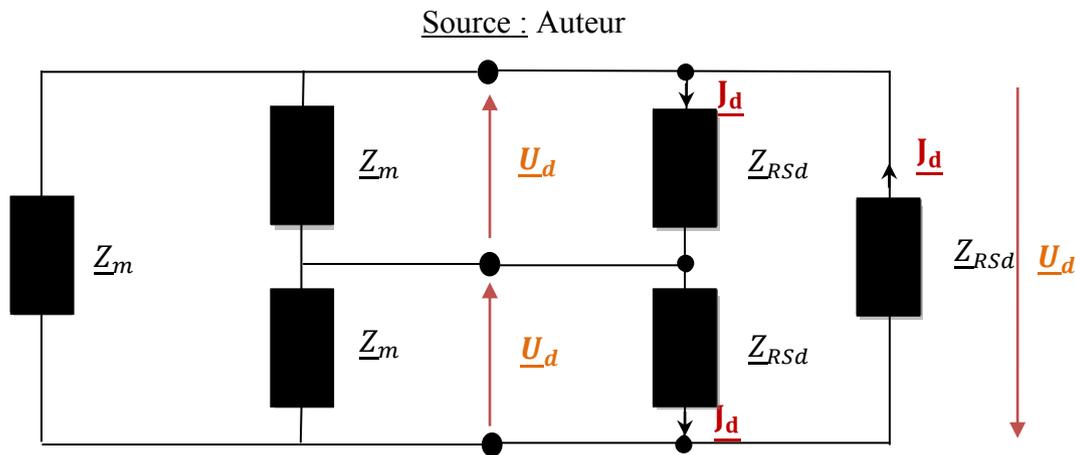


Figure 15: Schéma du système équilibré

On note, d'après la figure (schéma de fonctionnement) :

$$\underline{Z}_{RS} = R_1 \quad (\text{V.33})$$

$$\underline{Z}_{ST} = \underline{Z}(R_2 // C_2) = \frac{kR_1}{1 + \left(\frac{(k+1)\sqrt{3}}{3}\right)^2} \left(1 - j \frac{(k+1)\sqrt{3}}{3}\right) \quad (\text{V.34})$$

Pour $k = 2$, on a :

$$\underline{Z}_{ST} = \frac{R_1}{2} (1 - j\sqrt{3}) \quad (\text{V.35})$$

Ainsi, on peut écrire :

$$\underline{U}_{RS} = \underline{Z}_{RS} \underline{J}_{RS} \quad (\text{V.36})$$

$$\underline{U}_{ST} = \underline{Z}_{ST} \underline{J}_{ST} \quad (\text{V.37})$$

$$\underline{U}_{TR} = -(\underline{U}_{RS} + \underline{U}_{ST}) = -(\underline{Z}_{RS}\underline{J}_{RS} + \underline{Z}_{ST}\underline{J}_{ST}) \quad (\text{V.38})$$

Le théorème de Fortescue permet d'écrire :

$$\underline{U}_{RSd} = \frac{1}{3}(\underline{U}_{RS} + a\underline{U}_{ST} + a^2\underline{U}_{TR}) \quad (\text{V.39})$$

$$\underline{J}_{RS} = \underline{J}_{RSd} + \underline{J}_{RSi} \quad (\text{V.40})$$

$$\underline{J}_{ST} = a^2\underline{J}_{RSd} + a\underline{J}_{RSi} \quad (\text{V.41})$$

La figure 15 donne :

$$\underline{U}_{RSd} = \underline{Z}_{RSd} * \underline{J}_{RSd} \quad (\text{V.42})$$

En introduisant les équations (V.36), (V.37) et (V.38) dans (V.39), on a :

$$\underline{U}_{RSd} = \frac{1}{3} \left((1 - a^2)\underline{Z}_{RS}\underline{J}_{RS} + (a - a^2)\underline{Z}_{ST}\underline{J}_{ST} \right) \quad (\text{V.43})$$

Les équations (V.40) et (V.41) dans (V.43) donne :

$$\underline{U}_{RSd} = \frac{1}{3} \left(((1 - a^2)\underline{Z}_{RS} + (1 - a)\underline{Z}_{ST})\underline{J}_{RSd} + ((1 - a^2)\underline{Z}_{RS} + (a^2 - 1)\underline{Z}_{ST})\underline{J}_{RSi} \right) \quad (\text{V.43})$$

A l'équilibre, on a $\underline{J}_{RSi} = 0$, l'équation (V.44) devient alors :

$$\underline{U}_{RSd} = \frac{1}{3} \left((1 - a^2)\underline{Z}_{RS} + (1 - a)\underline{Z}_{ST} \right) \underline{J}_{RSd} \quad (\text{V.45})$$

En identifiant l'équation (V.41) à (V.45), on a :

$$\underline{Z}_{RSd} = \frac{1}{3} \left((1 - a^2)\underline{Z}_{RS} + (1 - a)\underline{Z}_{ST} \right) \quad (\text{V.46})$$

Les équations (V.33) et (V.34) dans (V.46), on a :

$$\underline{Z}_{RSd} = \frac{1}{3} \left((1 - a^2)R_1 + (1 - a)R_1 \frac{1 - j\sqrt{3}}{2} \right) \quad (\text{V.47})$$

Après calcul, on trouve :

$$\underline{Z}_{RSd} = \underline{Z}_{ch} = \frac{R_1}{6} (3 - j\sqrt{3}) \quad (\text{V.48})$$

Remarque :

\underline{Z}_{ch} n'est que l'impédance équivalente des charges et que l'on peut maintenant représenter les charges dans le schéma équivalent monophasé.

Actuellement, il est possible de déterminer la tension de sortie de la génératrice grâce au schéma équivalent unifilaire de la génératrice.

CHAPITRE VI CARACTERISTIQUES DE LA GENERATRICE

Notre but ici est de déterminer le point de fonctionnement nominal, la tension de sortie aux bornes de la génératrice ainsi que toutes les autres grandeurs électriques au point de fonctionnement où les charges subissent une lente variation.

La recherche du point de fonctionnement nominal revient à déterminer, non seulement les charges nominales et la capacité d'excitation nominale, mais aussi une fonction de transfert qui nous permettra de déterminer tous les caractéristiques du point de fonctionnement nominal. Notamment la vitesse de rotation, la puissance et l'état de saturation, etc. Cette fonction permet aussi de voir le comportement de l'installation lorsque la charge biphasée subit une lente variation puis d'en dégager les limites de fonctionnement de l'installation ilotée en marche biphasée.

Déterminons maintenant la fonction de transfert qui nous permettra de déterminer le point de fonctionnement nominal lorsque la génératrice est ilotée en marche biphasé.

VI.1 DETERMINATION DE LA FONCTION DE TRANSFERT F

Sachant que pour une génératrice asynchrone (auto-excitée) débitant sur un réseau d'impédance \underline{Z}_{ch} , on a toujours le phénomène suivant :

Source : Auteur

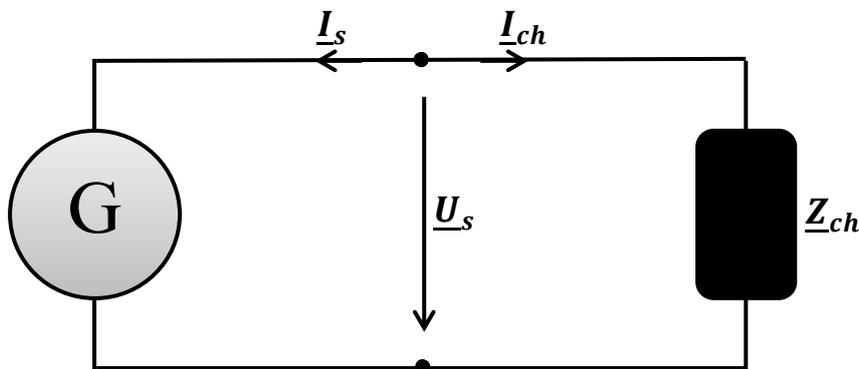


Figure 16: Fonctionnement en génératrice auto-excitée

C'est-à-dire :

$$\underline{U}_s = \underline{Z}_m \underline{I}_s = -\underline{Z}_{ch} \underline{I}_s \quad (\text{VI.01})$$

Où \underline{Z}_m est l'impédance équivalente de la génératrice, qui peut aussi se décomposer en composante directe et inverse (\underline{Z}_{m_d} et \underline{Z}_{m_i}).

De ce fait, on peut écrire les relations suivantes :

$$\underline{J}_{RSd}^{(GAS)} + \underline{J}_{RSd}^{(ch)} = 0 \quad (\text{VI.02})$$

$$\underline{J}_{RSi}^{(GAS)} + \underline{J}_{RSi}^{(ch)} = 0 \quad (\text{VI.03})$$

Où :

$$\underline{J}_{RSd}^{(GAS)} = \frac{\underline{U}_{RSd}}{\underline{Z}_{m_d}} \quad (\text{VI.04})$$

$$\underline{J}_{RSi}^{(GAS)} = \frac{\underline{U}_{RSi}}{\underline{Z}_{m_i}} \quad (\text{VI.05})$$

Au point de vue charge, on a :

$$\underline{J}_{RSd}^{(ch)} = \frac{1}{3} (\underline{J}_{RS} + a \underline{J}_{ST} + a^2 \underline{J}_{TR}) \quad (\text{VI.06})$$

$$\underline{J}_{RSi}^{(ch)} = \frac{1}{3} (\underline{J}_{RS} + a^2 \underline{J}_{ST} + a \underline{J}_{TR}) \quad (\text{VI.07})$$

Avec :

$$\underline{J}_{RS} = \underline{Y}_{RS} \underline{U}_{RS} \quad (\text{VI.08})$$

$$\underline{J}_{ST} = \underline{Y}_{ST} \underline{U}_{ST} \quad (\text{VI.09})$$

$$\underline{J}_{TR} = \underline{Y}_{TR} \underline{U}_{TR} \quad (\text{VI.10})$$

Et :

$$\underline{U}_{RS} = \underline{U}_{RSd} + \underline{U}_{RSi} \quad (\text{VI.11})$$

$$\underline{U}_{ST} = a^2 \underline{U}_{RSd} + a \underline{U}_{RSi} \quad (\text{VI.12})$$

$$\underline{U}_{TR} = a \underline{U}_{RSd} + a^2 \underline{U}_{RSi} \quad (\text{VI.13})$$

D'après ces huit (08) dernières équations, les courants de phases directe et inverse deviennent :

$$\underline{J}_{RSd}^{(ch)} = \frac{1}{3} [\underline{U}_{RSd} (\underline{Y}_{RS} + \underline{Y}_{ST} + \underline{Y}_{TR}) + \underline{U}_{RSi} (\underline{Y}_{RS} + a^2 \underline{Y}_{ST} + a \underline{Y}_{TR})] \quad (\text{VI.14})$$

$$\underline{J}_{RSi}^{(ch)} = \frac{1}{3} [\underline{U}_{RSd} (\underline{Y}_{RS} + a \underline{Y}_{ST} + a^2 \underline{Y}_{TR}) + \underline{U}_{RSi} (\underline{Y}_{RS} + \underline{Y}_{ST} + \underline{Y}_{TR})] \quad (\text{VI.15})$$

On reconnaît facilement les admittances directe, inverse et homopolaire.

$$\underline{Y}_{RSd} = \frac{1}{3} (\underline{Y}_{RS} + a \underline{Y}_{ST} + a^2 \underline{Y}_{TR}) \quad (\text{VI.16})$$

$$\underline{Y}_{RSi} = \frac{1}{3} (\underline{Y}_{RS} + a^2 \underline{Y}_{ST} + a \underline{Y}_{TR}) \quad (\text{VI.17})$$

$$\underline{Y}_{RS_0} = \frac{1}{3} (\underline{Y}_{RS} + \underline{Y}_{ST} + \underline{Y}_{TR}) \quad (\text{VI.18})$$

Les courants de phase deviennent alors :

$$\underline{J}_{RSd}^{(ch)} = \underline{Y}_{RS_0} \underline{U}_{RSd} + \underline{Y}_{RSi} \underline{U}_{RSi} \quad (\text{VI.19})$$

$$\underline{J}_{RSi}^{(ch)} = \underline{Y}_{RSd} \underline{U}_{RSd} + \underline{Y}_{RS_0} \underline{U}_{RSi} \quad (\text{VI.20})$$

Les équations (VI.07) et (VI.08) permettent d'écrire les relations suivantes :

$$\frac{\underline{U}_{RSd}}{\underline{Z}_{m_d}} + \underline{Y}_{RS_0} \underline{U}_{RSd} + \underline{Y}_{RSi} \underline{U}_{RSi} = 0 \quad (\text{VI.21})$$

$$\frac{\underline{U}_{RSi}}{\underline{Z}_{m_i}} + \underline{Y}_{RSd} \underline{U}_{RSd} + \underline{Y}_{RS_0} \underline{U}_{RSi} = 0 \quad (\text{VI.22})$$

De l'équation (VI.22), on a :

$$\underline{U}_{RSi} = \underline{F}_{Ursid} \underline{U}_{RSd} \quad (\text{VI.23})$$

Avec

$$\underline{F}_{Ursid} = - \frac{\underline{Y}_{RSd}}{\frac{1}{\underline{Z}_{m_i}} + \underline{Y}_{RS_0}} \quad (\text{VI.24})$$

En rapportant ce résultat (VI.21), on a :

$$\underline{U}_{RSd} \left(\frac{1}{\underline{Z}_{m_d}} + \underline{Y}_{RS_0} - \frac{\underline{Y}_{RSi} \underline{Y}_{RSd}}{\frac{1}{\underline{Z}_{m_i}} + \underline{Y}_{RS_0}} \right) = 0 \quad (\text{VI.25})$$

Comme $\underline{U}_{RSd} \neq \mathbf{0}$, alors on a la fonction de transfert \underline{F} en régime déséquilibré qui est égale à zéro ($\underline{F} = 0$).

$$\underline{F} = \frac{1}{\underline{Z}_{m_d}} + \underline{Y}_{RS_0} - \frac{\underline{Y}_{RSi} \underline{Y}_{RSd}}{\frac{1}{\underline{Z}_{m_i}} + \underline{Y}_{RS_0}} = 0 \quad (\text{VI.26})$$

La résolution de l'équation $\underline{F} = 0$ garantit le transfert total d'énergie entre la génératrice et la charge. Ainsi, elle permet de trouver le point de fonctionnement nominal.

VI.2 DETERMINATION DU POINT DE FONCTIONNEMENT NOMINAL

Non seulement le transfert d'énergie est complet mais l'annulation de cette fonction de transfert \underline{F} assure aussi l'auto-excitation de la génératrice.

Au point de fonctionnement nominal, en exploitant la condition générale d'équilibre (relation (V.14)), la fonction de transfert sera réduite comme suit :

$$\underline{F} = \frac{1}{\underline{Z}_{m_d}} + \underline{Y}_{RSO} = 0 \quad (\text{VI.27})$$

Cela signifie que :

$$\begin{cases} \text{Re} \left(\frac{1}{\underline{Z}_{m_d}} + \underline{Y}_{RSO} \right) = 0 \\ \text{Im} \left(\frac{1}{\underline{Z}_{m_d}} + \underline{Y}_{RSO} \right) = 0 \end{cases} \quad (\text{VI.28})$$

Pratiquement, beaucoup de facteur ne nous permet pas de remplir la condition (VI.26).

Pour une vitesse de rotation appliquée au stator, parmi ces facteurs, on peut citer [8]:

- 👉 L'effet de la saturation : l'évolution de la plupart des paramètres de la machine en dépend, mais les plus sensibles sont ceux de la branche magnétisante R_{fd} et L_{hd} . Il faut donc considérer l'évolution de ces paramètres dans le procédé de calcul ;
- 👉 L'influence de la fréquence électrique : les pertes ferromagnétiques de la machine sont fonction de la fréquence ;
- 👉 L'influence de l'échauffement : l'échauffement peut modifier les valeurs des résistances et causer des erreurs sur les solutions.

Pour une précision ε donnée, le système d'équation (VI.28) devient un système d'inéquation comme suit:

$$\underline{F} = \frac{1}{\underline{Z}_{m_d}} + \underline{Y}_{RSO} \leq \varepsilon \quad (\text{VI.29})$$

C'est-à-dire :

$$\begin{cases} \text{Re} \left(\frac{1}{\underline{Z}_{m_d}} + \underline{Y}_{RSO} \right) \leq \varepsilon \\ \text{Im} \left(\frac{1}{\underline{Z}_{m_d}} + \underline{Y}_{RSO} \right) \leq \varepsilon \end{cases} \quad (\text{VI.30})$$

On note que la résolution numérique de ce système d'inéquation (VI.30) permet de :

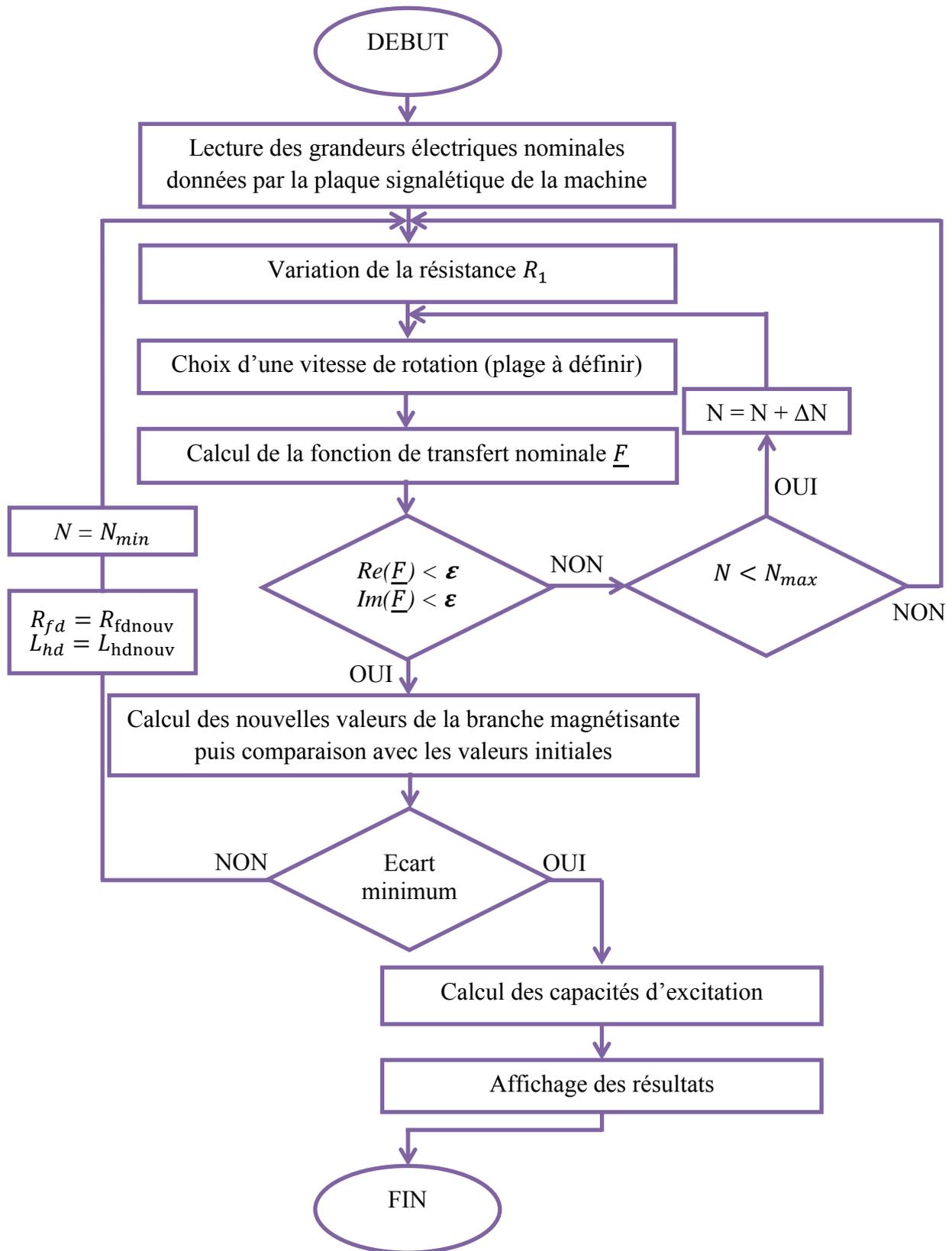
- 👉 Déterminer la capacité nominale d'amorçage, la vitesse et les charges nominaux ;
- 👉 Déterminer le point de fonctionnement de la génératrice lorsque la(les) charge(s), parfaitement équilibrée(s), subit (subissent) une lente variation, par contre la capacité d'excitation étant fixée à sa valeur nominale.

Ainsi, la résolution de ce système d'inéquation doit passer par cinq étapes :

- 👉 Calcul de la fonction de transfert \underline{F} pour une charge R_1 donnée (plages de variation étant définies) et pour une vitesse de rotation N . Les valeurs des paramètres dans la branche magnétisante utilisées sont encore non saturées, elles sont tirées par des essais classiques sur une machine asynchrone;
- 👉 Vérification du couple « charge-vitesse » qui remplit le système d'inéquation (VI.30);
- 👉 Calcul de la tension aux bornes de la branche magnétisante pour corriger les paramètres sensibles de celle-ci, à savoir R_{fd} et L_{hd} ;
- 👉 Confrontation des valeurs corrigées avec les valeurs non saturées et pour une précision demandée sur l'écart, ces dernières déterminées seront réintroduites dans le cycle de calcul ;
- 👉 Traçage des courbes représentatives des différentes grandeurs.

Ces étapes sont représentés par l'organigramme suivant.

Source : Auteur



Organigramme 1 : Recherche du point de fonctionnement nominal

VI.3 COMPORTEMENT DE LA GENERATRICE EN REGIME DESEQUILIBRE

Déterminer le comportement de la génératrice revient à trouver un nouveau point de fonctionnement lorsque les charges nominales subissent une lente variation. En posant α le coefficient de surcharge, on peut définir la charge comme suit : $R = \alpha R_{nom}$. On dit qu'il y a surcharge quand $\alpha < 1$ et délestage quand $\alpha > 1$. On note que $\alpha = 1$ représente le point de fonctionnement nominal.

Ainsi, pour $\alpha \neq 1$, l'écriture du bilan de puissance entre l'organe d'entraînement et la génératrice asynchrone lorsque la condition (VI.28) est satisfaite, permet de déterminer toutes les grandeurs électriques caractérisant le nouveau point de fonctionnement.

Le bilan de puissance se traduit ainsi par la relation suivante :

$$\text{Puissance mécanique fournie} = \text{Puissance électrique utile} + \sum \text{Pertes}$$

Pour toute la suite, on suppose que pour le système hydraulique (turbine), la caractéristique « Couple-Vitesse » est linéaire. Elle est représentée par la figure suivante :

Source : Prédétermination du comportement en régime transitoire d'une GAS [9]

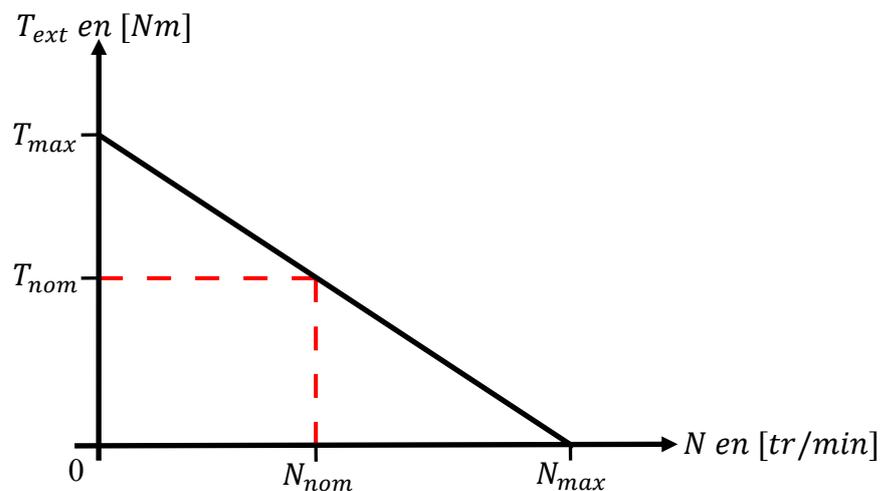


Figure 17 : Variation du couple mécanique en fonction de la vitesse de rotation

Déterminons maintenant toutes les grandeurs caractérisant le nouveau point de fonctionnement :

👉 Puissance mécanique délivrée par la turbine :

Compte tenu de la linéarité du système « couple-vitesse », elle est définie comme suit :

$$P_{méc.turb} = 2\pi T_{max} \left(1 - \frac{N}{N_{max}}\right) \frac{N}{60} \quad (VI.31)$$

👉 Puissance électrique utile :

Comme la charge est biphasée alors on a :

$$P_{él.utl} = \frac{U_{RS}^2}{R_1} + \frac{U_{ST}^2}{R_2} \quad (VI.32)$$

En prenant toujours (RS) comme référence, les tensions aux bornes des phases s'écrivent :

$$\underline{U}_{RS} = \underline{U}_{RSd} + \underline{U}_{RSi} \quad (VI.33)$$

$$\underline{U}_{ST} = a^2 \underline{U}_{RSd} + a \underline{U}_{RSi} \quad (VI.34)$$

En tenant compte de la relation (VI.23), on a alors :

$$P_{él.utl} = \underline{F}_{Pél.utl} \underline{U}_{RSd}^2 \quad (VI.35)$$

Avec :

$$\underline{F}_{Pél.utl} = \frac{(1 + \underline{F}_{Ursid})^2}{R_1} + a^2 \frac{(a + \underline{F}_{Ursid})^2}{R_2} \quad (VI.36)$$

👉 Pertes joules statoriques directe et inverse :

Par définition, on a :

$$\begin{cases} \underline{p}_{j_{sd}} = 3R_{sd} \left(\frac{1}{Z_{m_d}}\right)^2 \underline{U}_{RSd}^2 \\ \underline{p}_{j_{si}} = 3R_{si} \left(\frac{1}{Z_{m_i}}\right)^2 \underline{U}_{RSi}^2 \end{cases} \quad (VI.37)$$

Soit :

$$\begin{cases} \underline{p}_{j_{sd}} = \underline{F}_{pj_{sd}} \underline{U}_{RSd}^2 \\ \underline{p}_{j_{si}} = \underline{F}_{pj_{si}} \underline{U}_{RSi}^2 \end{cases} \quad (VI.38)$$

Avec :

$$\underline{F}_{pj_{sd}} = 3R_{sd} \left(\frac{1}{Z_{m_d}}\right)^2 \quad (VI.39)$$

$$\underline{F}_{pj_{si}} = 3R_{si} \left(\frac{1}{Z_{m_i}}\right)^2 \underline{F}_{Ursid}^2 \quad (VI.40)$$

👉 Pertes fer :

Par définition, on a :

$$\begin{cases} \underline{p}_{fd} = 3 \frac{V_{hd}^2}{R_{fd}} \\ \underline{p}_{fi} = 3 \frac{V_{hi}^2}{R_{fi}} \end{cases} \quad (\text{VI.41})$$

Avec :

$$\begin{cases} \underline{V}_{hd} = \left(1 - \frac{Z_s}{Z_{md}}\right) V_{RSd} \\ \underline{V}_{hi} = \left(1 - \frac{Z_s}{Z_{mi}}\right) V_{RSi} \end{cases} \quad (\text{VI.42})$$

Finalement, on a :

$$\underline{p}_{fd} = \underline{F}_{pfd} U_{RSd}^2 \quad (\text{VI.43})$$

$$\underline{p}_{fi} = \underline{F}_{pfi} U_{RSd}^2 \quad (\text{VI.44})$$

Où :

$$\underline{F}_{pfd} = 3 \frac{1}{R_{fd}} \left(1 - \frac{Z_s}{Z_{md}}\right)^2 \quad (\text{VI.45})$$

$$\underline{F}_{pfi} = 3 \frac{1}{R_{fi}} \left(1 - \frac{Z_s}{Z_{mi}}\right)^2 \underline{F}_{Ursid}^2 \quad (\text{VI.46})$$

👉 Pertes joules rotoriques directe et inverse :

Par définition, on a :

$$\begin{cases} \underline{p}_{jrd} = \underline{F}_{pjrd} U_{RSd}^2 \\ \underline{p}_{jri} = \underline{F}_{pjri} U_{RSd}^2 \end{cases} \quad (\text{VI.47})$$

Avec :

$$\underline{F}_{pjrd} = 3 \frac{R'_d}{Z_r^2} \left(1 - \frac{Z_{sd}}{Z_{md}}\right)^2 \quad (\text{VI.48})$$

$$\underline{F}_{pjri} = \frac{3}{2} \frac{R'_i}{Z_r^2} \left(1 - \frac{Z_{si}}{Z_{mi}}\right)^2 \underline{F}_{Ursid}^2 \quad (\text{VI.49})$$

La puissance mécanique reçue par la génératrice peut donc se décomposer en composante directe et inverse. En quittant des expressions complexes à valeurs réelles, on a :

$$P_{méc.reçue} = P_{él.utl} + p_{jsd} + p_{jsi} + p_{fd} + p_{fi} + p_{jrd} + p_{jri} \quad (\text{VI.50})$$

Ainsi, on a :

$$\begin{aligned} P_{méc.reçue} &= P_{méc.turb} - p_{fvl} \\ &= (F_{Pél.utl} + F_{jsd} + F_{jsi} + F_{pfd} + F_{pfi} + F_{pjrd} + F_{pjri}) U_{RSd}^2 \end{aligned} \quad (\text{VI.51})$$

Où p_{fvl} représente les pertes par ventilation et par frottement.

De cette équation, on peut avoir l'expression de la tension directe de la génératrice :

$$U_{RSd} = \sqrt{\frac{P_{méc.turb} - p_{fvl}}{F_{Pél.utl} + F_{jsd} + F_{jsi} + F_{pfd} + F_{pfi} + F_{pjr d} + F_{pjr i}}} \quad (VI.52)$$

Connaissant la tension aux bornes de la génératrice, on peut trouver facilement les valeurs de toutes les grandeurs électriques :

👉 Les tensions directe et inverse

$$\underline{U}_{RSd} = \underline{U}_{RSd} \quad (VI.53)$$

$$\underline{U}_{RSi} = F_{Ursid} \underline{U}_{RSd} \quad (VI.54)$$

👉 Tensions aux bornes des trois phases

$$\underline{U}_{RS} = \underline{U}_{RSd} + \underline{U}_{RSi} \quad (VI.55)$$

$$\underline{U}_{ST} = a^2 \underline{U}_{RSd} + a \underline{U}_{RSi} \quad (VI.56)$$

$$\underline{U}_{TR} = a \underline{U}_{RSd} + a^2 \underline{U}_{RSi} \quad (VI.57)$$

👉 Tensions directe et inverse de la branche magnétisante

$$\underline{U}_{hd} = \left(1 - \frac{Z_s}{Z_{md}}\right) \underline{U}_{RSd} \quad (VI.58)$$

$$\underline{U}_{hi} = \left(1 - \frac{Z_s}{Z_{mi}}\right) F_{Ursid} \underline{U}_{RSd} \quad (VI.59)$$

👉 Courants directe et inverse de la phase RS

$$\underline{J}_{RSd} = \frac{1}{Z_{md}} \underline{U}_{RSd} \quad (VI.60)$$

$$\underline{J}_{RSi} = \frac{1}{Z_{mi}} F_{Ursid} \underline{U}_{RSd} \quad (VI.61)$$

👉 Courants statoriques

$$\underline{J}_{RS} = \underline{J}_{RSd} + \underline{J}_{RSi} \quad (VI.62)$$

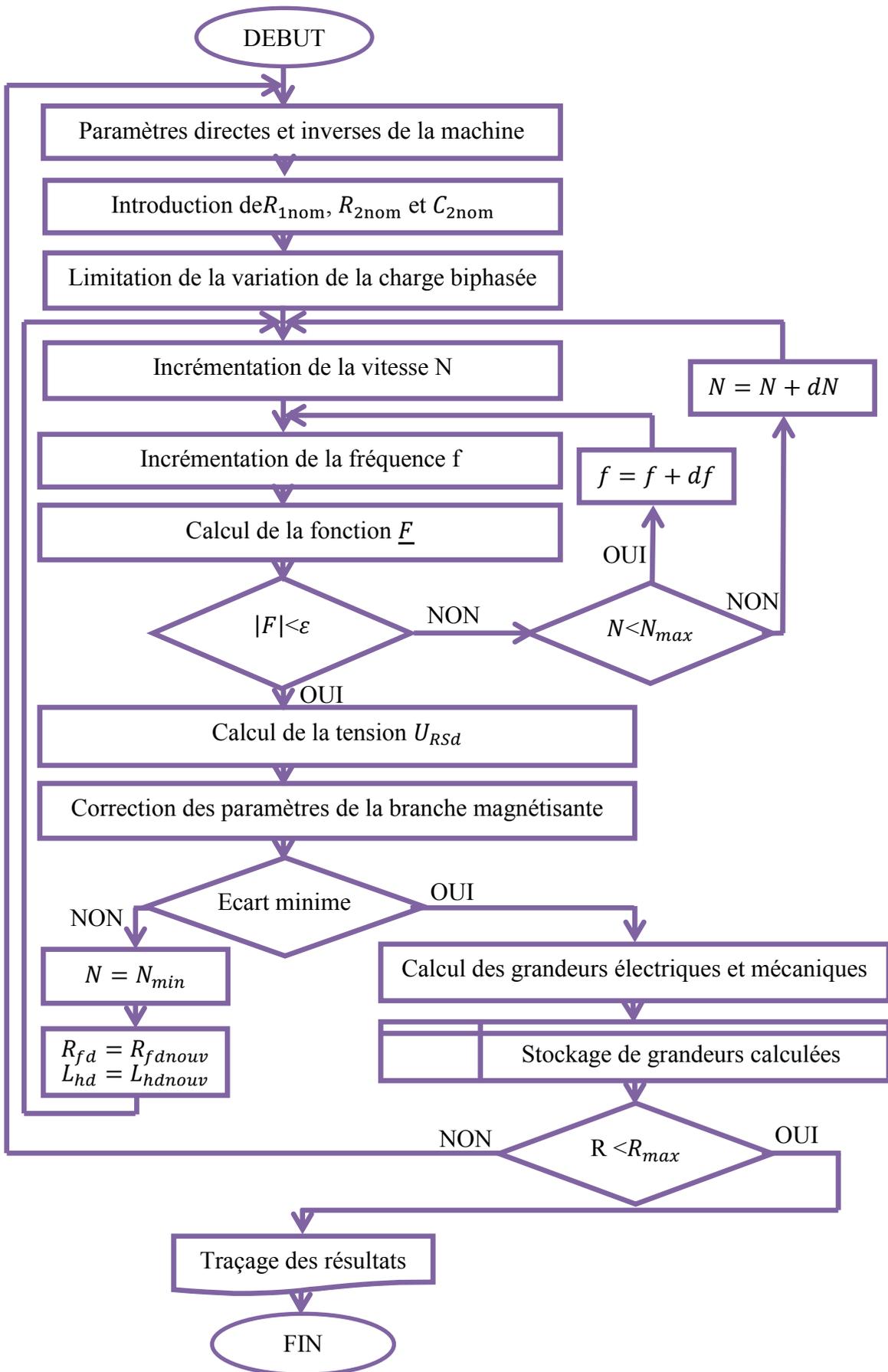
$$\underline{J}_{ST} = a^2 \underline{J}_{RSd} + a \underline{J}_{RSi} \quad (VI.63)$$

$$\underline{J}_{TR} = a \underline{J}_{RSd} + a^2 \underline{J}_{RSi} \quad (VI.64)$$

Grâce à toutes ces équations, on peut procéder à la résolution numérique pour voir de près le comportement de la machine lorsque les charges subissent des variations (lentes).

Pour cela, l'organigramme correspondant à cette résolution est la suivante :

Source : Auteur



Organigramme 2 : Recherche d'un nouveau point de fonctionnement équilibré

SIMULATION DU
COMPORTEMENT DE LA
GENERATRICE EN REGIME
DESEQUILIBRE

CHAPITRE VII ELABORATION DU LOGICIEL «ASYNCHRONOUS GENERATORS RZA»

L'objectif de ce chapitre est de concevoir un logiciel permettant la prédétermination du comportement de la génératrice en régime déséquilibré. Pour cela, il faut avoir les données nécessaires et suffisantes, c'est-à-dire les grandeurs caractéristiques de la machine.

VII.1 CARACTERISTIQUES DE LA MACHINE D'ETUDE

👉 Les grandeurs nominales lues sur la plaque signalétique sont données par le tableau suivant :

Grandeurs	Désignation	Valeurs	Unités
Tension	U_{nom}	220.00	[V]
Courant	I_{nom}	2.80	[A]
Fréquence	f_{nom}	50.00	[Hz]
Vitesse de rotation	n_{nom}	1500.00	[tr/min]
Puissance à l'arbre	P_{nom}	1100.00	[W]
Nombre de paires de pôle	p	2	

Tableau 1 : Valeurs lues sur la plaque signalétique

👉 Paramètres directs et inverses de la machine :

Pour l'étude du régime déséquilibré, les composantes du schéma monophasé de la figure 12 sont représentés par le tableau suivant [8]:

Grandeurs	Unités	Composantes directes	Composantes inverses
Résistance statorique	[Ω]	5.97	5.97
Inductance statorique	[mH]	17.90	17.90
Résistance rotorique	[Ω]	7.41	7.41
Inductance rotorique	[mH]	17.70	17.70
Résistance du fer	[Ω]	1323.00	112.56
Inductance principale	[mH]	340.40	57.00

Tableau 2 : Paramètres directs et inverses de la machine

👉 Grandeurs de référence :

L'utilisation du système « *per unit* » nécessite la connaissance des grandeurs de bases. Elles sont données par le tableau suivant :

Grandeurs	Valeurs	Unités
Fréquence	50.00	[Hz]
Vitesse	1500.00	[tr/min]
Courant	2.80	[A]
Tension	220.00	[V]
Puissance mécanique	1319.10	[W]
Couple mécanique	8.26	[Nm]

Tableau 3 : Grandeurs de référence

👉 Grandeurs mécaniques :

👉 Inertie du rotor : $J = 3.00 \cdot 10^{-3} [kg \cdot m^2]$

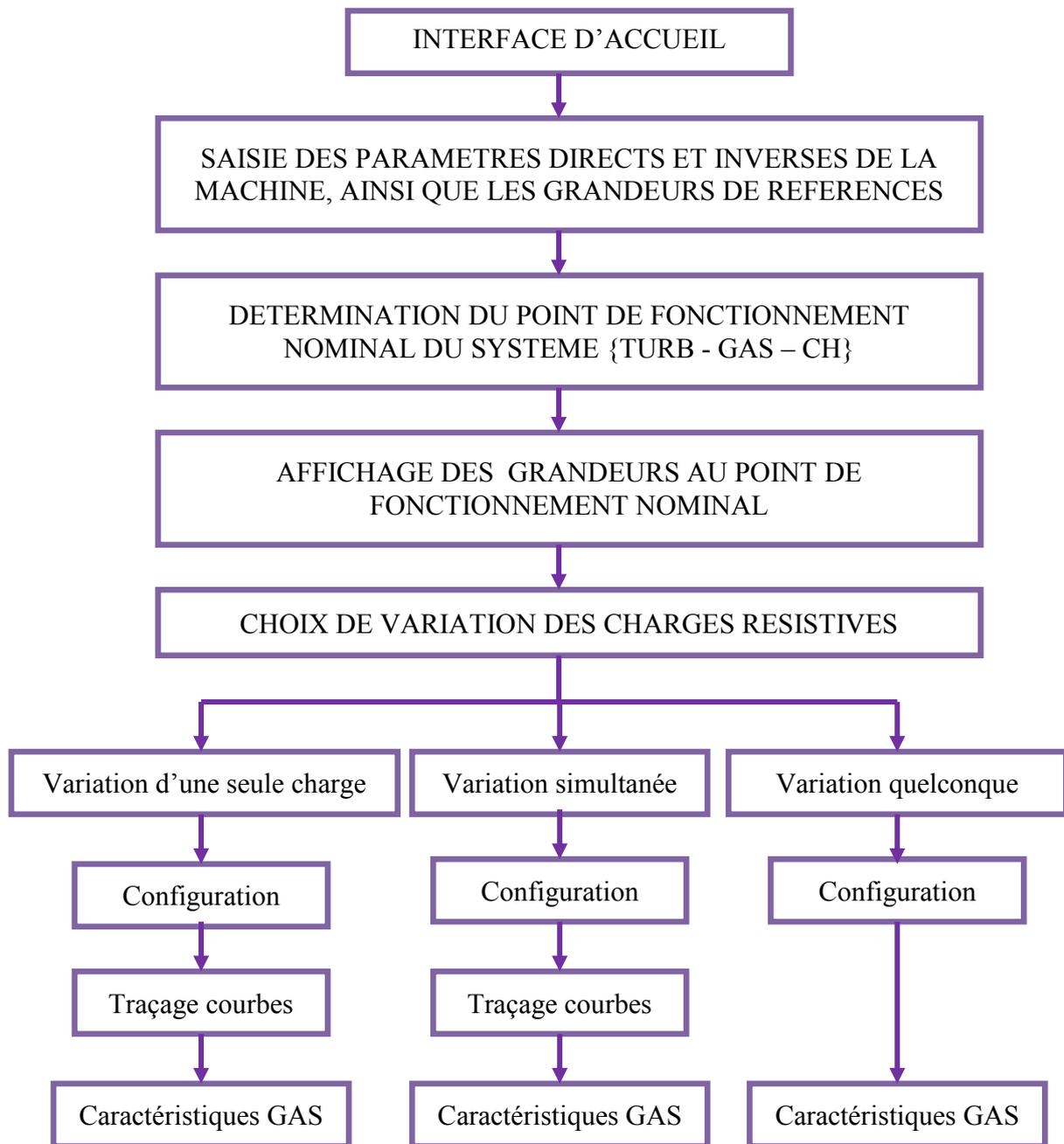
👉 Constante de temps mécanique : $\tau_m = 4.01 \cdot 10^{-2}$

VII.2 GESTION DES FENETRES

L'élaboration du logiciel, intitulé « ASYNCHRONOUS GENERATORS RZA », permet de faciliter l'étude du comportement d'une génératrice asynchrone triphasée en régime déséquilibré.

Avant d'expliquer le mode d'emploi du logiciel, voici d'abord l'enchaînement des fenêtres qui le constitue :

Source : Auteur



Organigramme 3 : Gestion des fenêtres

VII.3 PRESENTATION DU LOGICIEL

Les interfaces graphiques correspondant à cet arbre sont conçues avec le logiciel MATLAB 7.8. En effet, ce logiciel, intitulé « ASYNCHRONOUS GENERATORS RZA », est à installer dans le système d'exploitation. L'explication de l'installation et de la désinstallation du logiciel se fera en annexe. Par conséquent, le lancement du logiciel se fait en exécutant l'application « AGRZA.exe » dans le menu démarrer. Ceci est illustré par la figure suivante :

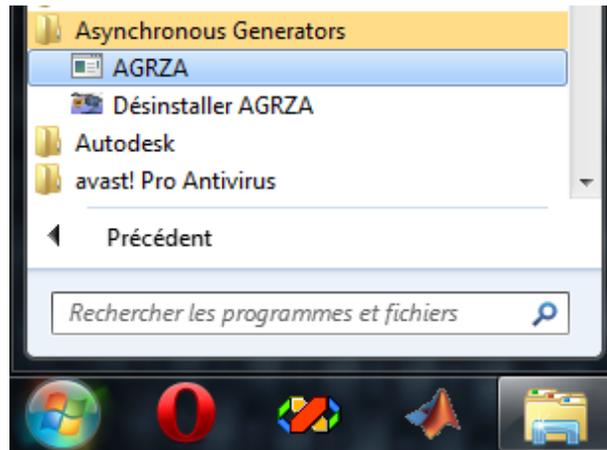


Figure 18 : Lancement du logiciel

En exécutant cette application, une interface d'accueil s'ouvre. Elle se présente comme suit :



Figure 19 : Interface d'accueil

Le bouton « SUIVANT >> » permet de passer à l'interface numéro 2. C'est dans cette dernière qu'on introduit les paramètres directs et inverses de la machine ainsi que les grandeurs de référence.



Figure 20 : Introduction des paramètres

Le bouton « << PRECEDENT » appelle l'interface d'accueil. Le bouton « REINITIALISER » permet de réintroduire les paramètres. La commande « SUIVANT >> » fait appel à l'interface suivant et calcule les valeurs des charges résistives à installer ainsi que la valeur de la batterie de condensateur à brancher aux bornes statoriques, c'est-à-dire qu'il permet la détermination du point de fonctionnement nominal. Elle se présente comme suit :

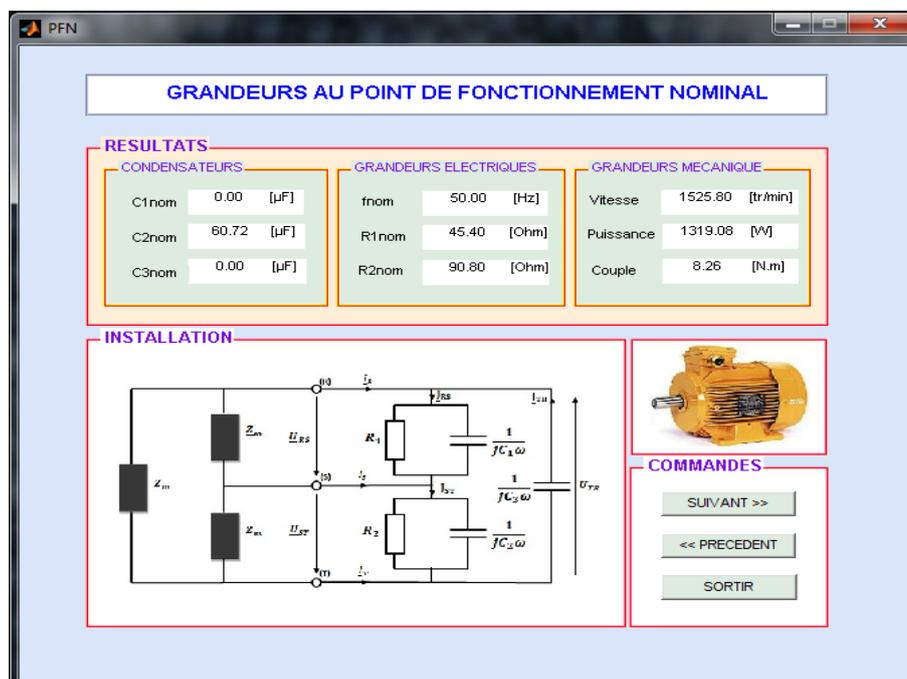


Figure 21 : Grandeurs au point de fonctionnement nominal

Ici, le bouton « SUIVANT >> » mène les utilisateurs au choix de fonctionnement lorsqu'il y a variation lente des charges résistives.

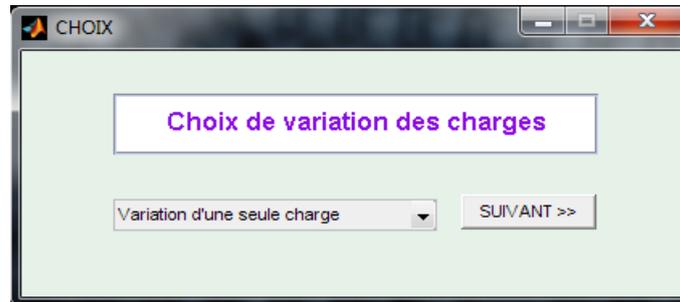


Figure 22 : Choix de variation des charges

Avec cette interface, on peut choisir entre la variation d'une seule, variation simultanée ou variation quelconque des charges.

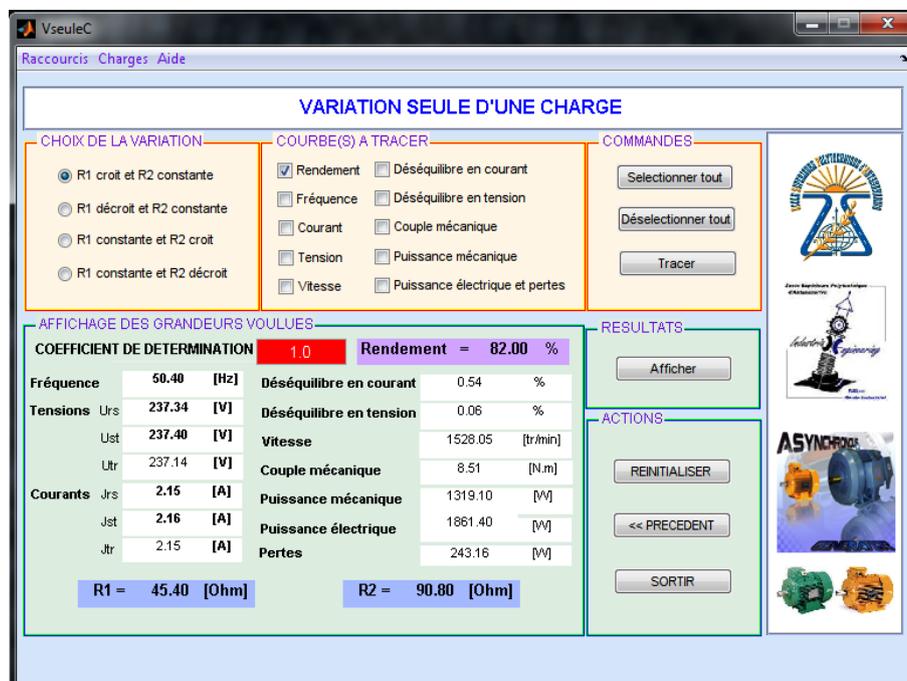


Figure 23 : Variation d'une seule charge

En effet, cette fenêtre trace les courbes voulues (bouton « Tracer ») en précisant le choix de la variation. Ainsi, en donnant le coefficient de détermination, les valeurs des caractéristiques de la machine s'affichent à leurs cases correspondantes (bouton « Afficher »). L'onglet « Raccourcis » permet de revenir à l'interface « PARAMETRES » ou « PFN ». Les onglets « Charges » et « Aide » servent respectivement à faciliter le passage entre interfaces (raccourcis) et de donner des conseils. Ainsi, l'interface suivante représente la prédétermination du comportement de la génératrice pour une variation simultanée des charges.

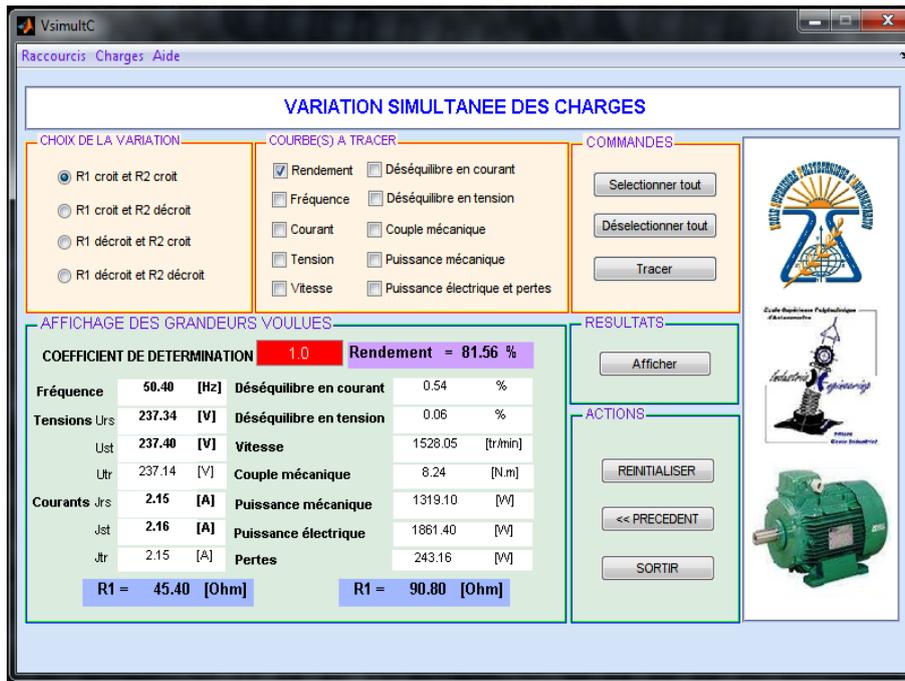


Figure 24 : Variation simultanée des charges

Le bouton « Tracer » et « Afficher » ainsi que les onglets « Raccourcis », « Charges » et « Aide » fonctionnent comme précédemment. L'interface, qui va suivre, offre la possibilité de déterminer les grandeurs caractéristiques de la génératrice pour n'importe quelle valeur des charges résistives.

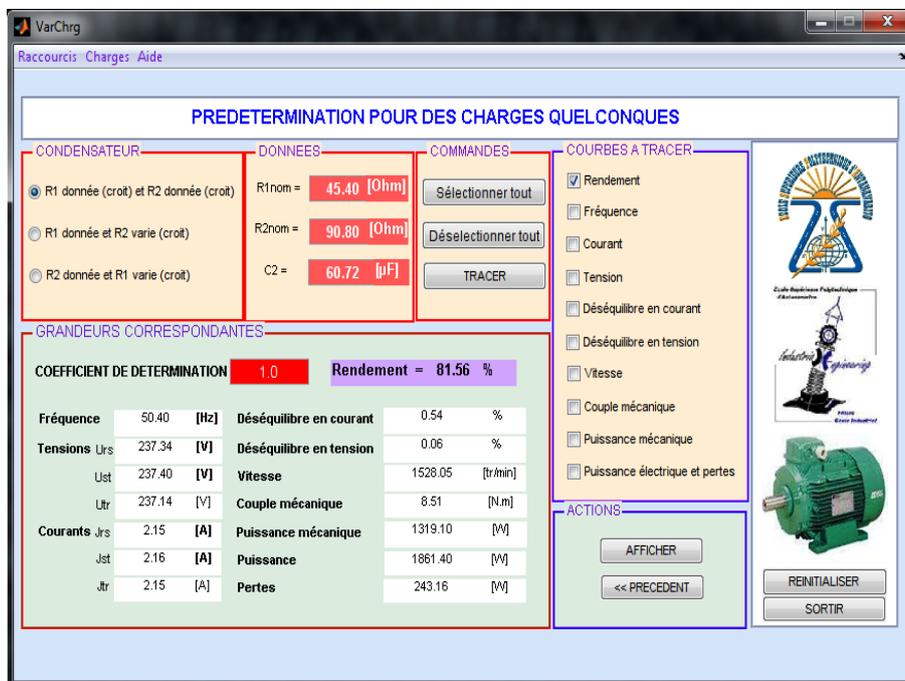


Figure 25 : Caractéristiques avec des charges quelconques

Les champs en rouge doivent être remplis pour pouvoir déterminer toutes les grandeurs correspondant aux valeurs des charges introduites.

Les principaux avantages du logiciel sont sa clarté et sa facilité d'exploitation. En effet, les courbes obtenues peuvent être facilement interprétées. En outre, les caractéristiques suivantes peuvent être observées : les courants de phases statoriques, les tensions des charges, la vitesse, le couple mécanique, la puissance mécanique délivrée par la turbine, la fréquence électrique et la puissance électrique utile délivrée aux charges.

CHAPITRE VIII **RESULTATS DES SIMULATIONS ET INTERPRETATIONS**

Cette partie est l'une des pièces maîtresses de cet ouvrage puisqu'elle permet de voir avec simplicité le comportement au point de fonctionnement nominal et en régime déséquilibré de la machine.

En partant des hypothèses, on va, en exploitant les organigrammes déjà établi auparavant, déterminer le point de fonctionnement nominal de la génératrice. En partant de ce point, on va prévoir le comportement de la machine lorsqu'il y a variation des charges.

VIII.1 **HYPOTHESES**

Toutes les hypothèses déjà vu auparavant sont toujours à considérer surtout dans cette partie de simulation.

Dans le cas où il y a une variation des charges, on suppose que la diminution de la vitesse de rotation délivrée par la turbine (pas de problème mécanique de l'organe d'entraînement), donc reçue par le rotor, n'est pas brusque.

Dans la pratique, il est vraiment presque impossible de stabiliser la valeur des charges appliquées au stator parce que la consommation varie principalement en fonction du temps. C'est pour cela qu'on considère une variation des charges dans cette partie. Ainsi, on suppose que cette variation est lente, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de branchement ou débranchement simultané de plusieurs charges (variation brusque des charges résistives).

Sachant que pour un système de charge donné, il existe un point de fonctionnement équivalent. La variation des charges conduit donc à l'apparition d'un nouveau point de « fonctionnement équilibré ». En posant α le coefficient de surcharge, on peut avoir les trois possibilités suivantes :

- 👉 $\alpha < 1$: Surcharge ;
- 👉 $\alpha = 1$: Point de fonctionnement nominal ;
- 👉 $\alpha > 1$: Délestage.

Théoriquement, une surcharge se traduit par une augmentation de la puissance électrique utile délivrée à la charge résistive. Comme les capacités sont des valeurs fixes, cela requiert un surplus de couple électromagnétique plus élevé, donc une augmentation du couple mécanique et, d'après la caractéristique couple-vitesse de la figure 17, un ralentissement de la turbine.

Un délestage est, en suivant le même raisonnement, caractérisé par la diminution de la puissance électrique utile délivrée à la charge résistive. Les phénomènes qui s'y présentent sont l'inverse de celle d'une surcharge.

Schématiquement, ces phénomènes se présentent comme suit :

👉 Pour une **surcharge** : $R \uparrow \Leftrightarrow P_{ch} \downarrow \Rightarrow T_{ém} \uparrow \Rightarrow T_{méc} \uparrow \Rightarrow N \downarrow \Rightarrow f \downarrow$

👉 Pour un **délestage** : $R \downarrow \Leftrightarrow P_{ch} \uparrow \Rightarrow T_{ém} \downarrow \Rightarrow T_{méc} \downarrow \Rightarrow N \uparrow \Rightarrow f \uparrow$

Où P_{ch} représente la puissance électrique demandée par les charges.

VIII.2 POINT DE FONCTIONNEMENT NOMINAL

En exploitant l'organigramme 1 établi dans la partie méthodologie, et en utilisant le logiciel MATLAB 7.8, on a obtenu les résultats suivants :

👉 Charges nominales

$$R_{1nom} = 45.40 [\Omega]$$

$$R_{2nom} = 90.80 [\Omega]$$

👉 Capacités nominales

$$C_{1nom} = 0$$

$$C_{2nom} = 60.72 [\mu F]$$

$$C_{3nom} = 0$$

👉 Vitesse de rotation nominale

$$N_{nom} = 1525.80 [tr/min]$$

👉 Composantes corrigées de la branche magnétisante

$$R_{fd_{nouv}} = 629.90 [\Omega]$$

$$L_{hd_{nouv}} = 106.95 [mH]$$

👉 Fonction de transfert

$$|\underline{F}| = 1.4110^{-2} [\Omega^{-1}]$$

$$Re(\underline{F}) = 1.16 \cdot 10^{-2}$$

$$Im(\underline{F}) = -8.0010^{-3}$$

👉 Puissance mécanique de la turbine

$$P_{méc} = 1319.10 [W]$$

👉 Couple nominal développé au niveau de l'arbre de la turbine

$$T_{nom} = 8.26 [Nm]$$

A partir des valeurs de ces grandeurs nominales, on peut maintenant passer à la prédétermination du comportement de la génératrice lorsque les charges subissent une lente variation.

VIII.3 COMPORTEMENT EN REGIME DESEQUILIBRE

Sachant qu'il y a une infinité de cas possible pour les valeurs des charges appliquées aux bornes du stator, alors, on ne va s'intéresser que sur la variation seule d'une charge, puis sur la variation avec le même coefficient et de différent coefficient.

VIII.3.1 Variation de la charge R_1

a. Hypothèses :

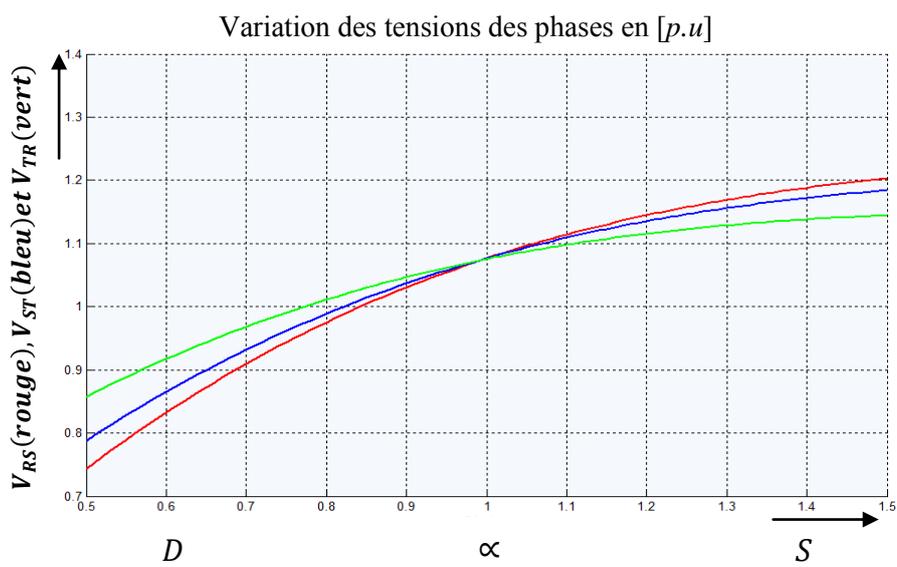
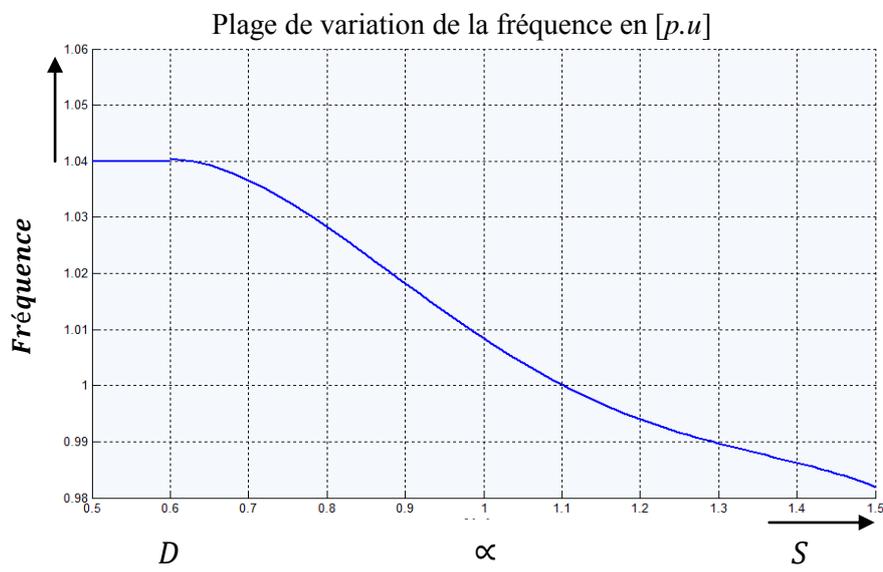
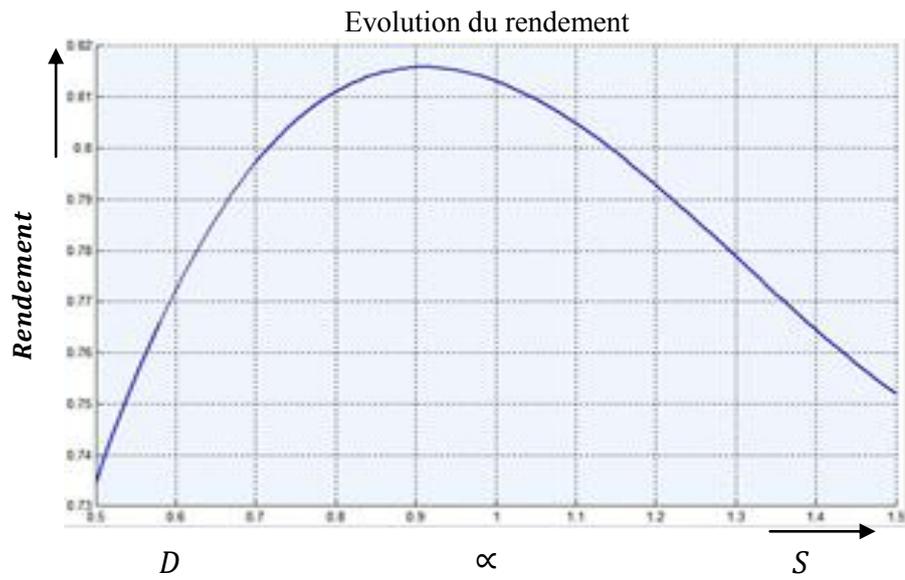
Seule la charge R_1 varie de 0.5 à 1.5 fois de sa valeur nominale. R_2 et C_2 étant gardés à ses valeur nominales, c'est-à-dire :

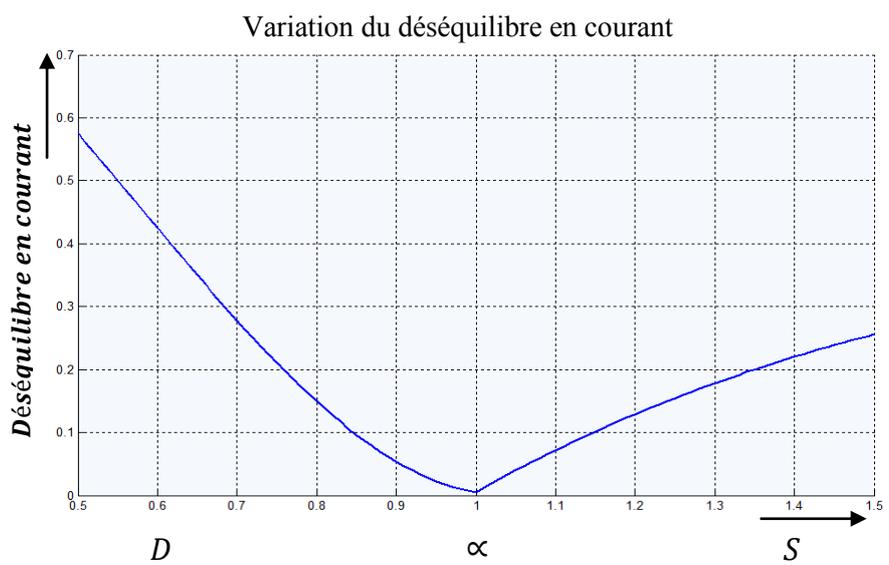
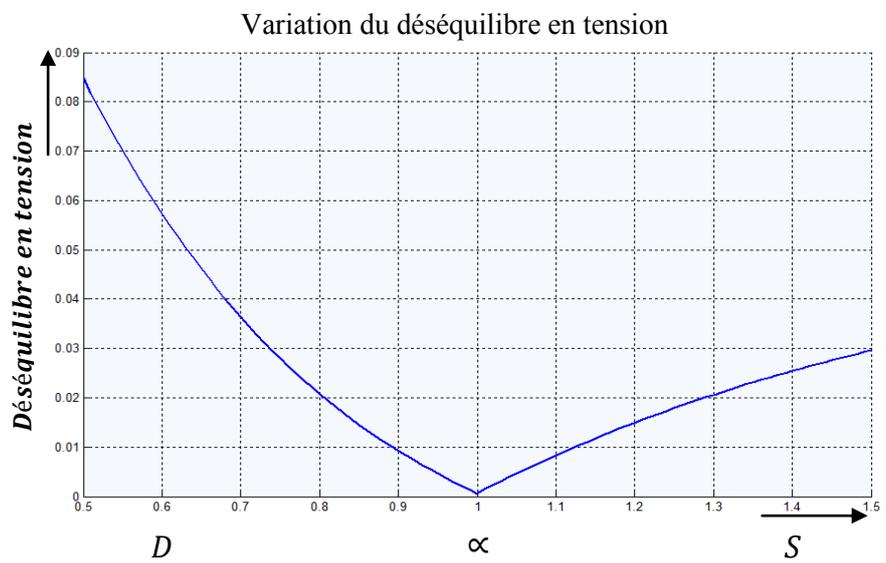
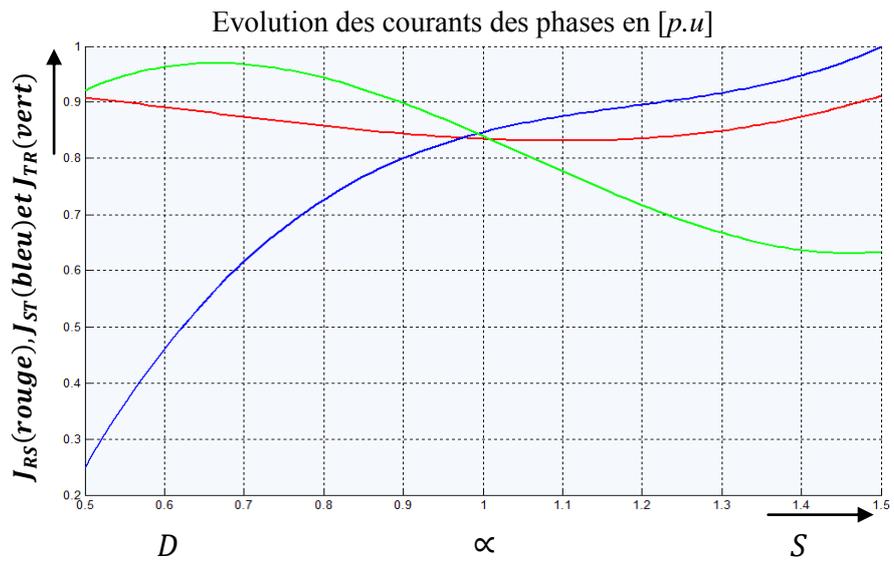
$$👉 R_1 = \alpha * R_{1nom}$$

$$👉 R_2 = R_{2nom}$$

$$👉 C_2 = C_{2nom}$$

b. Résultats :





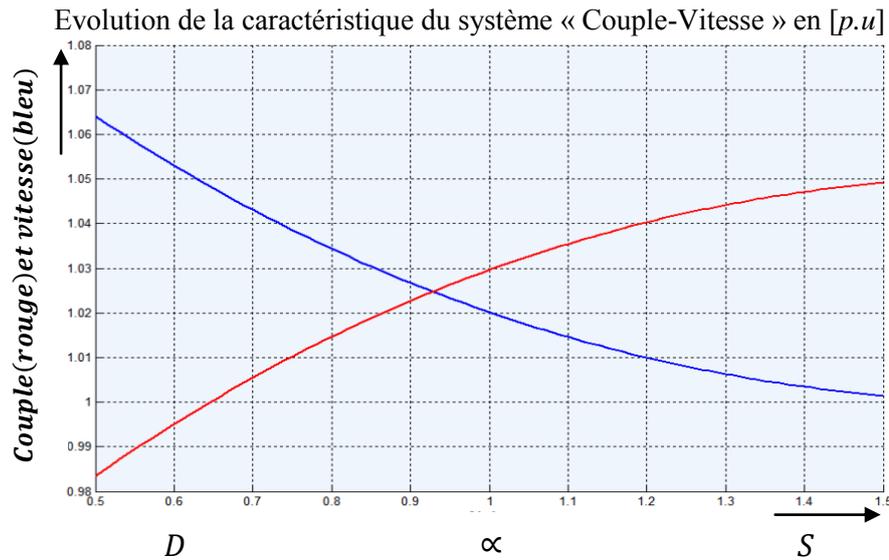


Figure 26 : Comportement de la génératrice pour une variation seule de la charge R_1

c. Bilan des résultats

Grandeurs	Délestage	Surcharge	PFN	$\alpha = 0.9$
Rendement	↑↓	↓	81.50%	81.58 %
Fréquence	↑	↓	1.01 [p.u]	1.18 [p.u]
Tensions des phases	↓	↑	1.08 [p.u]	1.04 [p.u]
Courants des phases	JRS : ↑	JRS : ↑	0.83 [p.u]	0.85 [p.u]
	JST : ↓	JST : ↑	0.83 [p.u]	0.80 [p.u]
	JTR : ↑	JTR : ↓	0.83 [p.u]	0.90 [p.u]
Déséquilibre en tension	↑	↑	0.05 %	0.92 %
Déséquilibre en courant	↑	↑	0.52 %	5.37 %
Vitesse	↑	↓	1.02 [p.u]	1.03 [p.u]
Puissance mécanique	↓	↑	1.00 [p.u]	0.99 [p.u]
Couple mécanique	↓	↑	1.03 [p.u]	1.02 [p.u]
Pertes	↓↑	↑	246.49 [W]	242.90 [W]

Tableau 4 : Observations des résultats pour une variation seule de la charge R_1

d. interprétations

Pour une variation de la charge R_1 , on remarque que, en quittant du point de fonctionnement nominal, toutes les grandeurs caractéristiques de la GAS subissent des variations. La raison de ces changements est la recherche d'un nouveau point de fonctionnement équilibré. Cette recherche se fait par la minimisation de la fonction de transfert \underline{F} , qui se traduit par

l'optimisation du transfert d'énergie entre la turbine et la machine. L'évolution de ces grandeurs peut provoquer des dégâts plus ou moins importants au niveau du système {TURB-GAS-CH}.

On constate que le meilleur rendement de la génératrice est caractérisé par le coefficient $\alpha = 0.9$, i.e. $R_1 = 40.86 [\Omega]$ et $R_2 = 90.80 [\Omega]$. En ce point, on remarque que les valeurs des grandeurs électriques (tensions, courants et fréquence) ne présentent aucun danger pour les charges. Le délestage de 0.10 a minimisé les pertes (donc de l'échauffement), et a provoqué des accroissements des déséquilibres en tension et en courant. Or, ce sont ces déséquilibres, surtout en courant, qui sont les responsables de l'apparition d'un courant inverse dans la machine. Cela se traduit par l'apparition d'un couple inverse au niveau du rotor, s'opposant à la vitesse de rotation de la turbine. Alors, en fonction de son grandeur, il y a un risque de torsion d'arbre.

En dessous d'un délestage de 0.85 ou d'une surcharge plus de 1.15, le taux de déséquilibre est très élevé (>10%), l'échauffement et la torsion d'arbre deviennent très importants. On note que cette torsion d'arbre conduit aussi à la vibration de la machine, pourtant, c'est la vibration qui est la source fondamentale de destruction de tout système mécanique. Alors, l'exploitation à moindre risque est caractérisée par l'intervalle de coefficient de surcharge : [0.85 ; 1.14] (le rendement varie entre 80.04 à 81.58 %).

En tenant compte du comportement de la machine par rapport aux dangers qu'elle peut encourir, l'exploitation à rendement maximal est autorisée.

VIII.3.2 Variation de la charge R_2

a. Hypothèses :

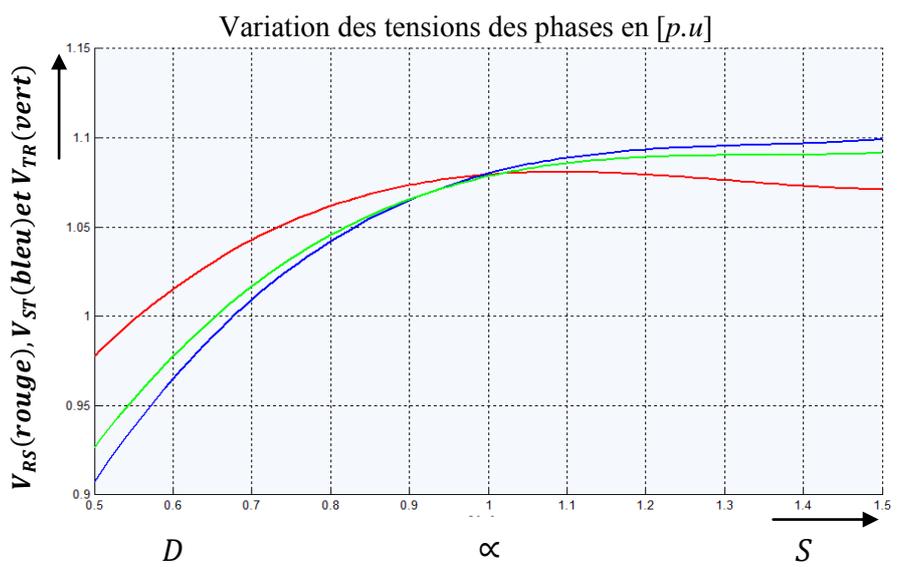
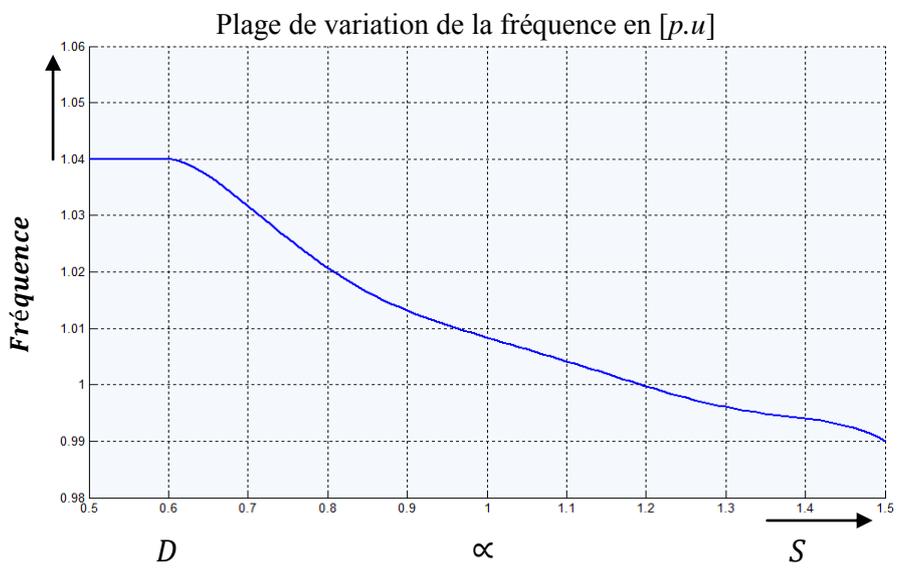
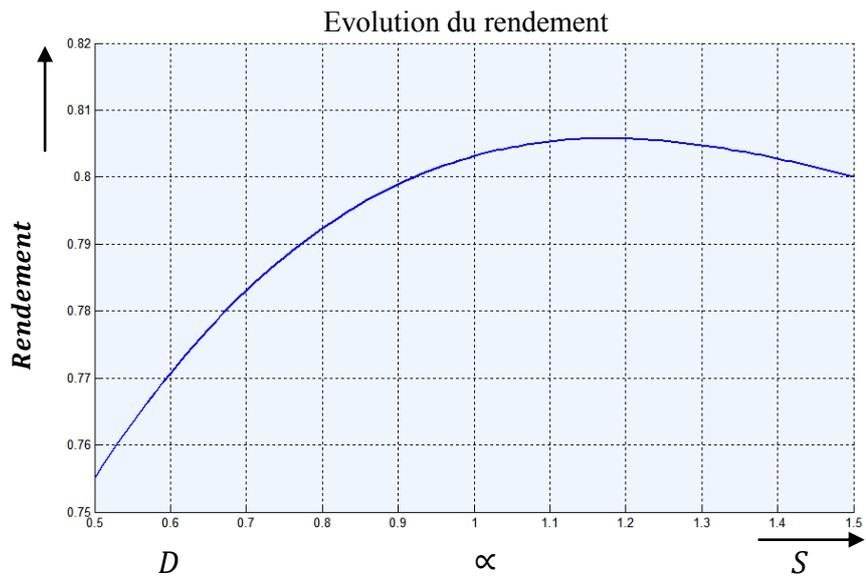
La charge R_2 varie de 0.50 à 1.50 fois de sa valeur nominale, et, R_1 et C_2 sont gardés à ses valeurs nominales, c'est-à-dire :

$$\text{👉 } R_1 = R_{1nom} ;$$

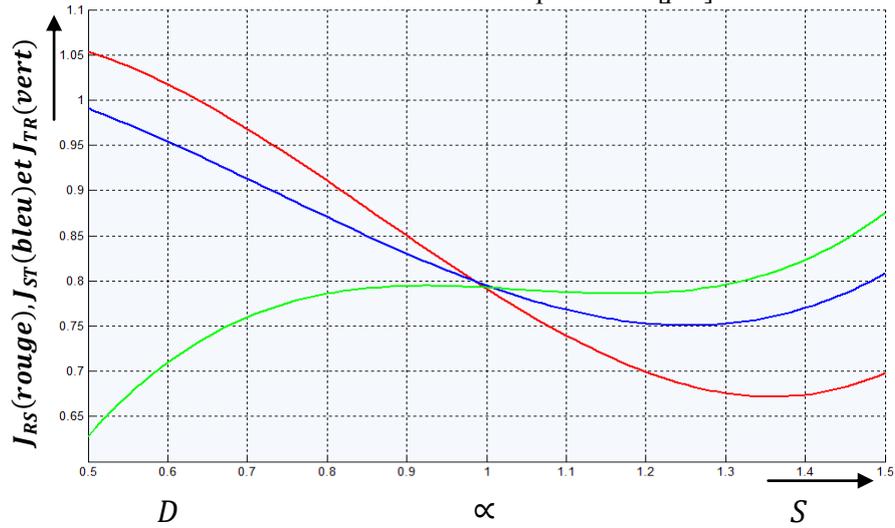
$$\text{👉 } R_2 = \alpha * R_{2nom} ;$$

$$\text{👉 } C_2 = C_{2nom} .$$

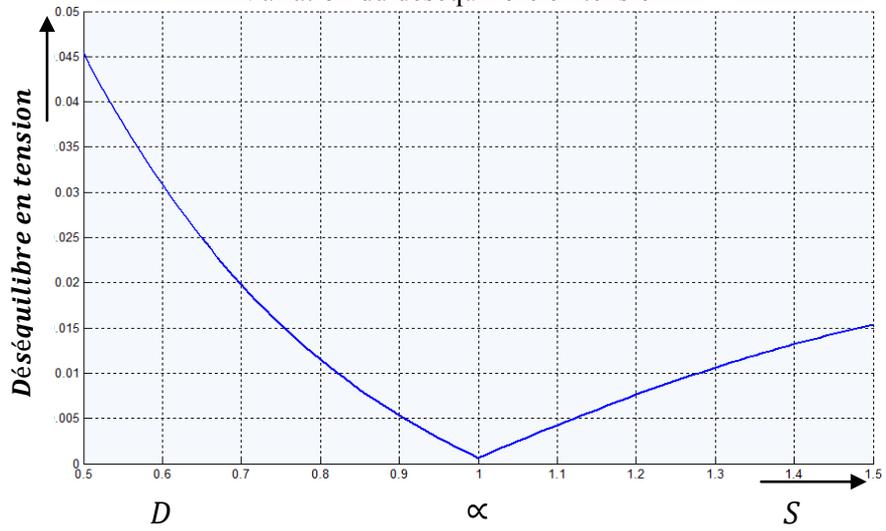
b. Résultats :



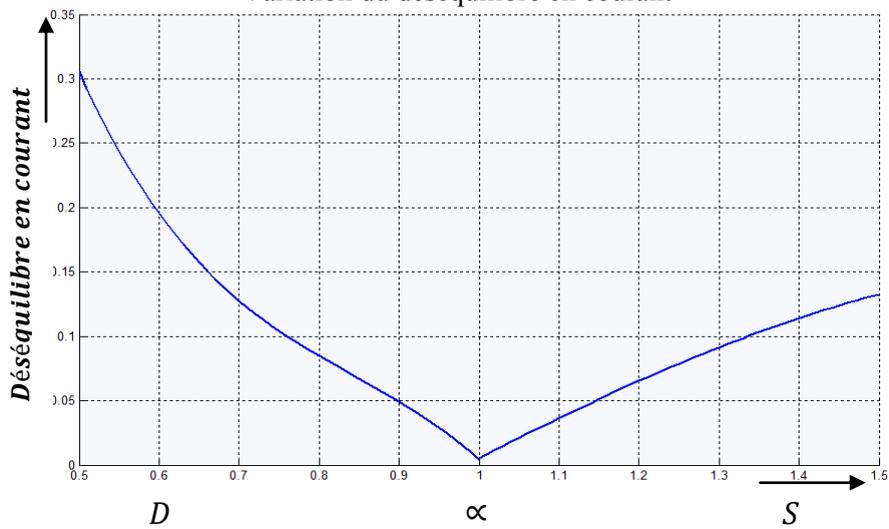
Evolution des courants des phases en [p.u]



Variation du déséquilibre en tension



Variation du déséquilibre en courant



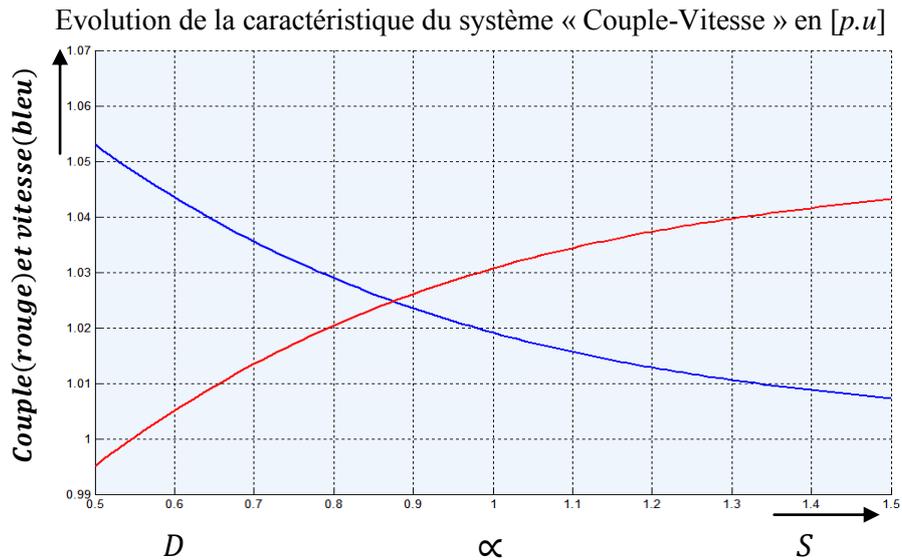


Figure 27 : Comportement de la génératrice pour une variation seule de la charge R_2

c. Bilan des résultats :

Grandeurs	Délestage	Surcharge	PFN	$\alpha = 1.10$
Rendement	↓	↓	81.50 %	81.69 %
Fréquence	↑	↓	1.01 [p.u]	1.00 [p.u]
Tensions des phases	↓	↑	1.08 [p.u]	1.09 [p.u]
Courants des phases	JRS : ↑	JRS : ↓↑	0.80 [p.u]	0.74 [p.u]
	JST : ↓	JST : ↓↑	0.80 [p.u]	0.77 [p.u]
	JTR : ↑	JTR : ↑	0.80 [p.u]	0.79 [p.u]
Déséquilibre en tension	↑	↑	0.06 %	0.34 %
Déséquilibre en courant	↑	↑	6.14 %	6.55 %
Vitesse	↓	↓	1.02 [p.u]	1.03 [p.u]
Puissance mécanique	↓	↑	1.00 [p.u]	1.00 [p.u]
Couple mécanique	↓	↑	1.03 [p.u]	1.02 [p.u]
Pertes	↓↑	↑	239.53 [W]	237.31 [W]

Tableau 5 : Bilan des résultats si R_2 varie seule

d. Interprétations

Pour une variation seule de la charge R_2 , en quittant du point de fonctionnement nominal, toutes les grandeurs électriques et mécaniques subissent des variations. Ces évolutions, causées par la recherche d'un nouveau point de fonctionnement, peuvent provoquer des dégâts plus ou moins importants au niveau du système {TURB-GAS-CH}.

On remarque que, pour $\alpha = 1.10$, i.e. $R_1 = 45.40 [\Omega]$ et $R_2 = 99.88 [\Omega]$, le rendement de la génératrice est au maximum. En ce point, les déséquilibres en courant et en tension sont de l'ordre de 3.64 % et 0.42 %. Cela signifie que le couple inverse (créé par le courant inverse) n'est pas dangereux pour le risque de torsion d'arbre. Ainsi, comme toutes les grandeurs électriques correspondant ne présentent aucuns dangers (surtension, surintensité,...) pour les charges, alors, on peut exploiter la génératrice en ce nouveau point de fonctionnement.

Pour un délestage inférieur à 0.76 ou d'une surcharge supérieure à 1.34, l'exploitation du système {TURB-GAS-CH} est fortement déconseillée par ce que le taux de déséquilibre en courant dépasse la limite. Donc, le couple inverse créé s'opposant au sens de rotation de la vitesse est très important. Cela signifie que le système {TURB-GAS-CH} s'expose au risque de torsion d'arbre et d'échauffement fatal. Pour une telle plage de variation de charge, le rendement correspondant varie entre 79.87 à 81.69 %.

En tenant compte du comportement de la machine et de la qualité (en amplitude) de toutes les grandeurs électriques, l'exploitation de la génératrice en ce point de fonctionnement (là où le rendement est maximal) est souhaitée.

VIII.3.3 Accroissent simultanément des charges R_1 et R_2

a. Hypothèses :

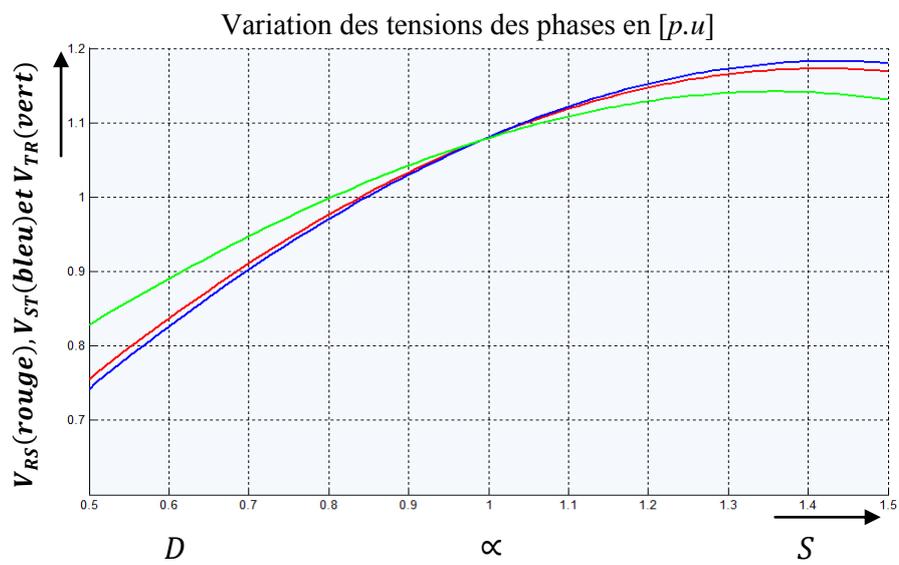
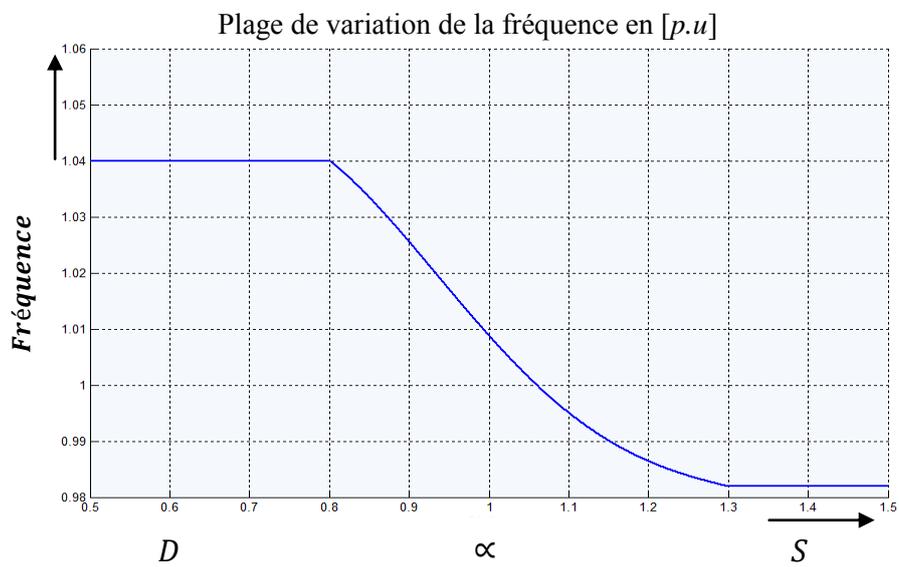
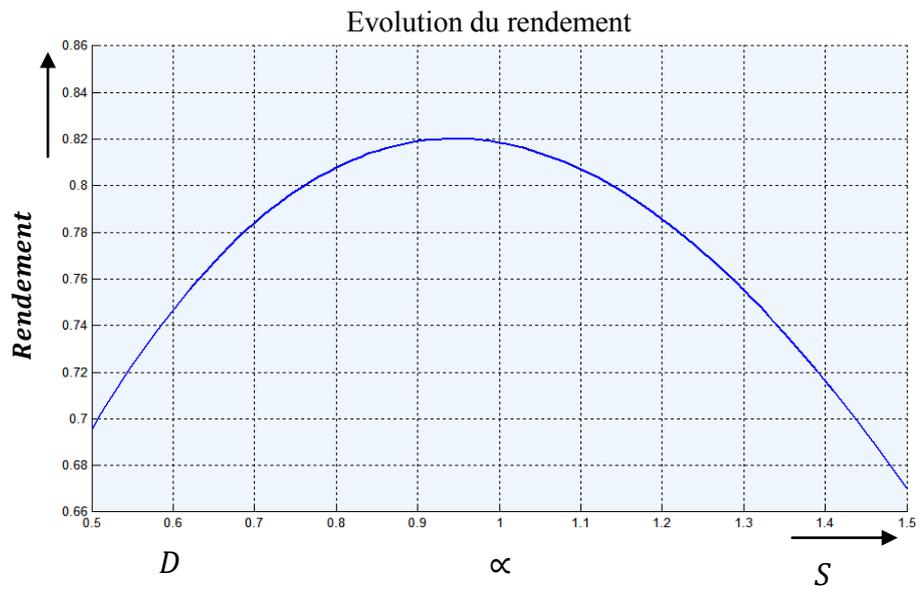
Toutes les charges appliquées aux bornes du stator varient de 0.50 à 1.50 fois de ses valeurs nominales. Le condensateur C_2 étant gardé à sa valeur nominale, c'est-à-dire :

$$\text{👉 } R_1 = \alpha * R_{1nom} ;$$

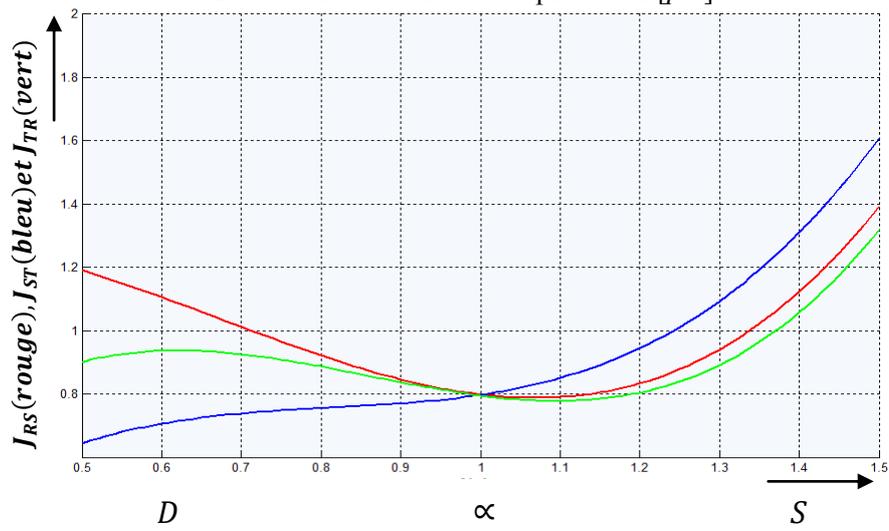
$$\text{👉 } R_2 = \alpha * R_{2nom} ;$$

$$\text{👉 } C_2 = C_{2nom} .$$

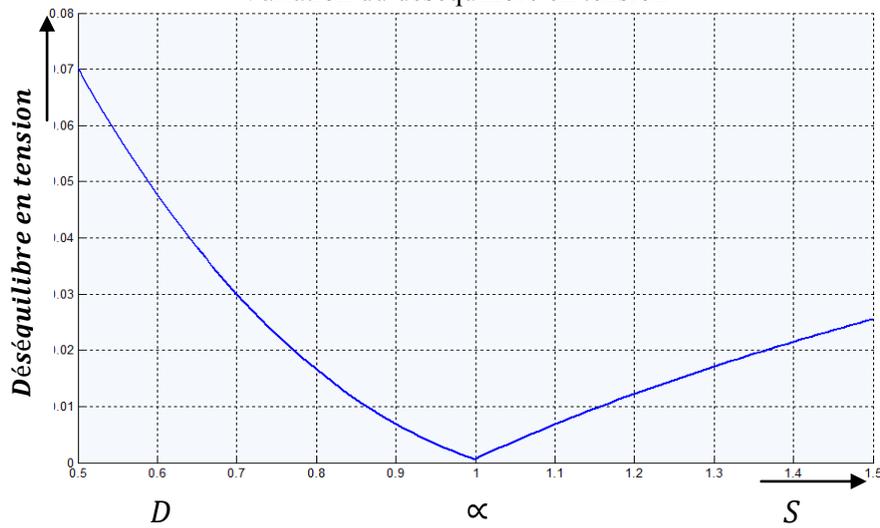
b. Résultats :



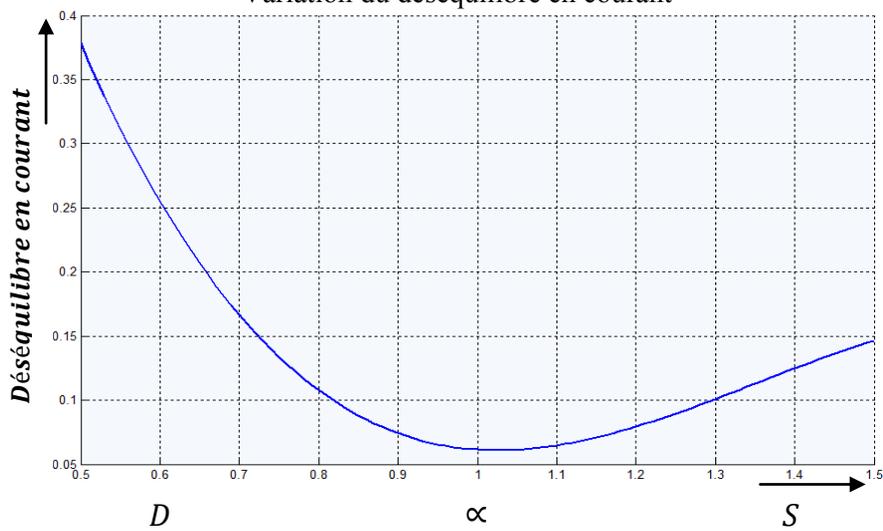
Evolution des courants des phases en [p.u]



Variation du déséquilibre en tension



Variation du déséquilibre en courant



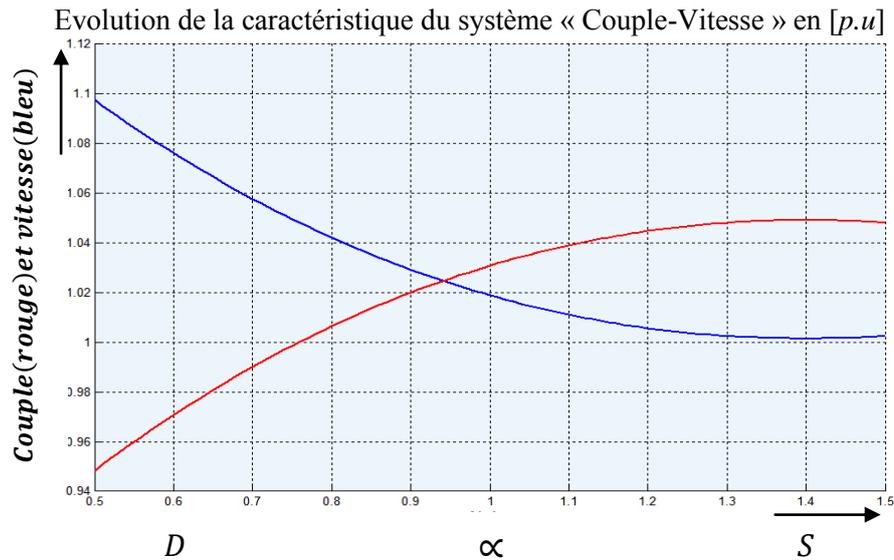


Figure 28 : Comportement de la génératrice si les deux charges varient simultanément

c. Bilan des résultats :

Le tableau suivant résume les états des grandeurs électriques et mécaniques lors qu'il y a une surcharge ou délestage des charges résistives.

Grandeurs	Délestage	Surcharge	PFN	$\alpha = 0.95$
Rendement	↑↓	↓	81.50 %	82.00 %
Fréquence	↑	↓	1.01 [p.u]	1.03 [p.u]
Tensions des phases	↓	↑	1.08 [p.u]	1.05 [p.u]
Courants des phases	JRS : ↑	JRS : ↑	0.80 [p.u]	0.85 [p.u]
	JST : ↓	JST : ↑	0.80 [p.u]	0.77 [p.u]
	JTR : ↑	JTR : ↑	0.80 [p.u]	0.84 [p.u]
Déséquilibre en tension	↑	↑	0.06 %	0.34 %
Déséquilibre en courant	↑	↑	6.14 %	6.55 %
Vitesse	↑	↓	1.02 [p.u]	1.03 [p.u]
Puissance mécanique	↓	↑	1.00 [p.u]	1.00 [p.u]
Couple mécanique	↓	↑	1.03 [p.u]	1.02 [p.u]
Pertes	↓↑	↑	239.53 [W]	237.31 [W]

Tableau 6 : Bilan des résultats si R_1 et R_2 croissent simultanément

d. Interprétations

On remarque que, pour une variation simultanée des charges résistives R_1 et R_2 , le rendement maximal (82.00 %) trouvé est caractérisé par le coefficient de surcharge $\alpha = 0.95$, c'est à dire $R_1 = 43.13 [\Omega]$ et $R_2 = 86.26 [\Omega]$. Ce nouveau point de fonctionnement est obtenu par la

minimisation de la fonction de transfert, i.e. l'optimisation du transfert d'énergie entre l'organe d'entraînement (turbine) et la machine.

En ce point, il n'y a pas de risque de torsion d'arbre et de vibration de la machine parce que le courant inverse créé est faible, c'est-à-dire que les déséquilibres en tension et en courant (de l'ordre de 0.34 % et 6.55 %) sont encore tolérables. Ainsi, on voit bien que toutes les grandeurs électriques ne présentent aucuns dangers pour les charges, alors, l'exploitation de la génératrice en ce nouveau point de fonctionnement est souhaitée.

Mais, l'exploitation du système {TURB-GAS-CH} pour un délestage inférieur à 0.82 ou d'une surcharge supérieure à 1.30 est fortement déconseillée parce que les risques causés par le courant inverse sont trop importants (torsion d'arbre, échauffement,...). Ainsi, le rendement de l'exploitation doit varier entre 75.52 à 82.00 %.

VIII.3.4 Variation simultanée des charges avec des différents coefficients

a. Hypothèses :

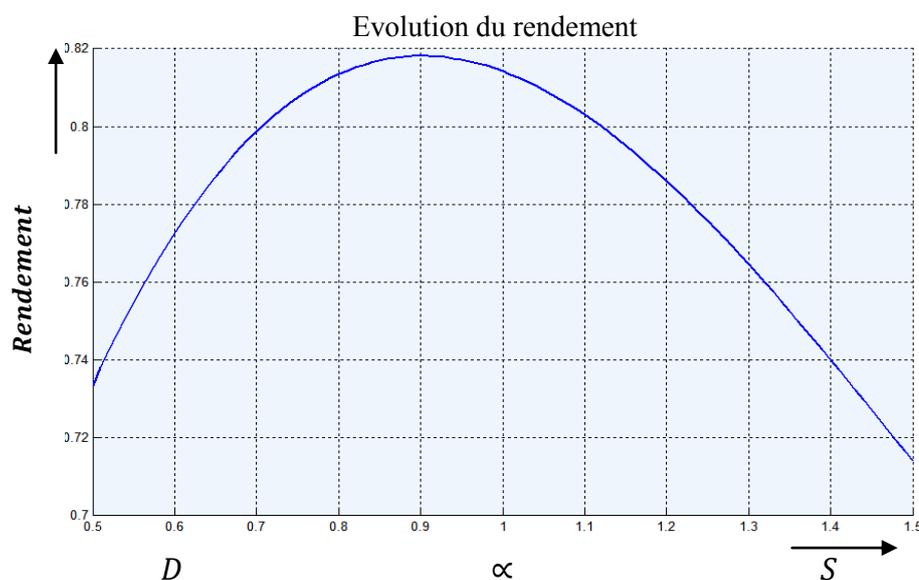
La charge R_1 croit de 0.50 à 1.50 R_{1nom} tandis que R_2 décroît de 1.50 à 0.50 R_{2nom} . Le condensateur C_2 étant gardé à sa valeur nominale, c'est-à-dire :

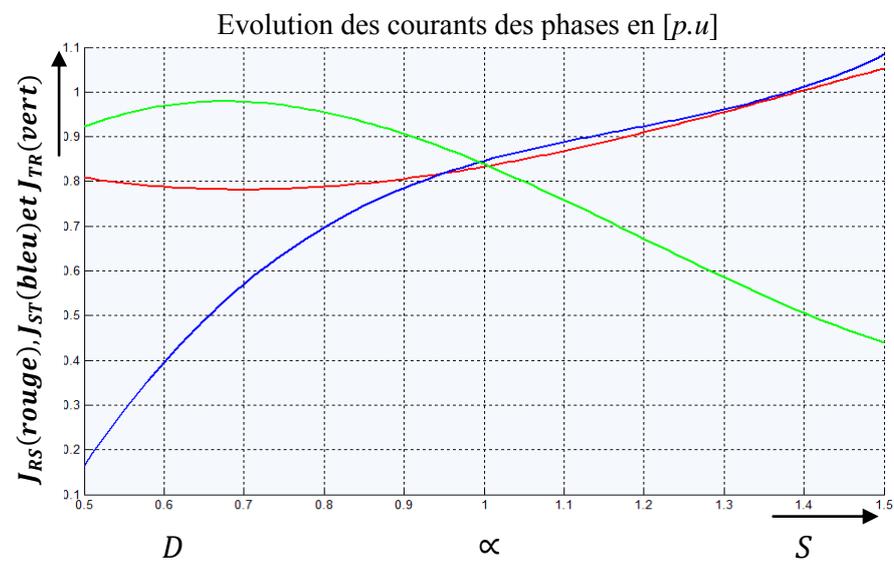
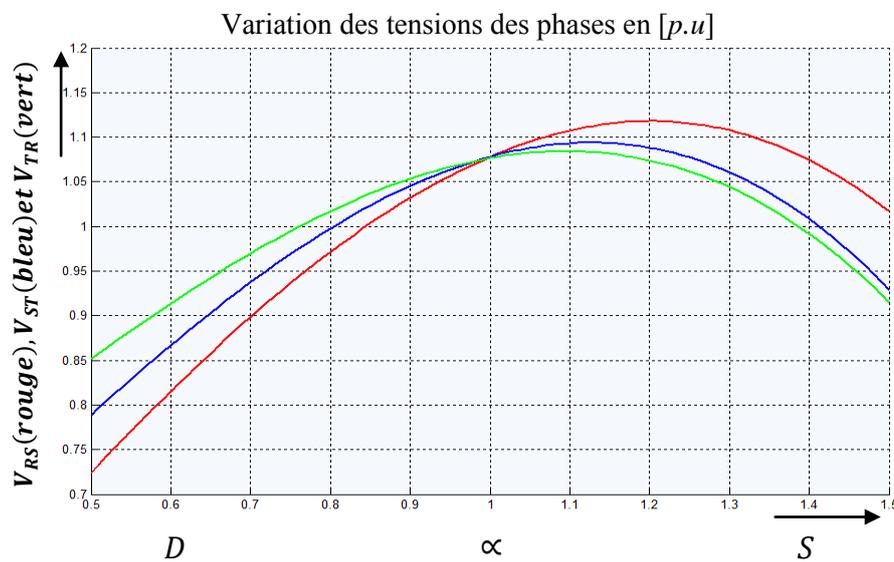
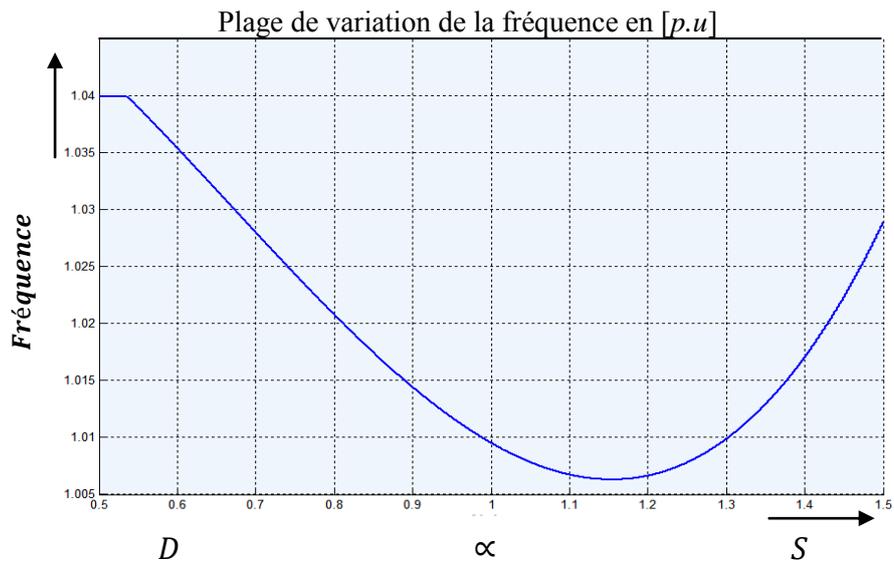
$$R_1 = \alpha * R_{1nom} ;$$

$$R_2 = \beta * R_{2nom} ;$$

$$C_2 = C_{2nom} .$$

b. Résultats :





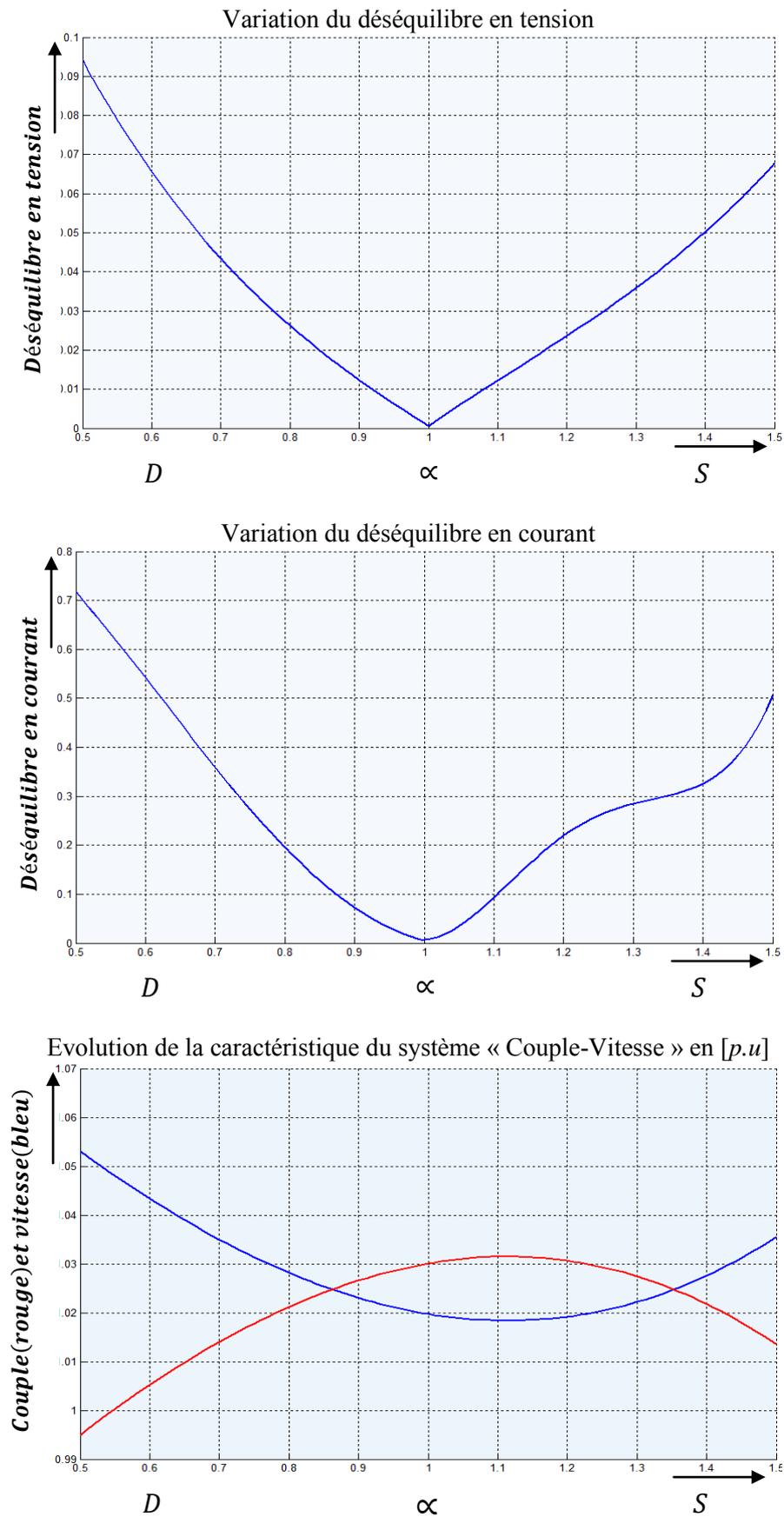


Figure 29 : Comportement de la GAS si les charges varient avec de différents coefficients

c. Bilan des résultats :

Grandeurs	Délestage	Surcharge	PFN	$\alpha = 0.90$
Rendement	↑↓	↓	81.50%	81.82%
Fréquence	↑	↓	1.01 [p.u]	1.01 [p.u]
Tensions des phases	↓	↓↑	1.08 [p.u]	1.05 [p.u]
Courants des phases	JRS : ↓	JRS : ↑	0.84 [p.u]	0.80 [p.u]
	JST : ↓	JST : ↑	0.84 [p.u]	0.78 [p.u]
	JTR : ↑↓	JTR : ↓	0.84 [p.u]	0.9 [p.u]
Déséquilibre en tension	↑	↑	0.05 %	1.23 %
Déséquilibre en courant	↑	↑	0.50 %	7.29 %
Vitesse	↑	↓↑	1.02 [p.u]	1.02 [p.u]
Puissance mécanique	↓	↓	1.00 [p.u]	1.00 [p.u]
Couple mécanique	↑	↑↓	1.03 [p.u]	1.02 [p.u]
Pertes	↓↑	↑	243.16 [kW]	239.85 [W]

Tableau 7 : Bilan des résultats si R_1 croît et R_2 décroît

d. Interprétations

D'après ces résultats, on remarque toujours que, en quittant du point de fonctionnement nominal, toutes les grandeurs caractéristiques de la GAS subissent des variations. La raison de ces changements est toujours la recherche d'un nouveau point de fonctionnement pour chaque valeur des charges données. Cette recherche est obtenue par la minimisation de la fonction de transfert \underline{F} , c'est-à-dire, l'optimisation du transfert d'énergie entre la turbine et la machine, et les pertes.

Pour cet essai, on remarque que, le rendement est maximal pour un coefficient de surcharge $\alpha = 0.90$, i.e. $R_1 = 40.86 [\Omega]$ et $R_2 = 99.88 [\Omega]$, il est de l'ordre de 81.80 %.

Pour un déséquilibre en tension de 1.23 % et en courant de 7.29 %, les problèmes pouvant être causés par le courant inverse (échauffement, torsion d'arbre,...) sont minimales. Ainsi, comme toutes les grandeurs électriques (fréquence, tension et courant) ne présentent aucuns dangers pour les charges, alors, l'exploitation du système {TURB-GAS-CH} est conseillée en ce point.

Or, pour un délestage inférieur à 0.88 ou d'une surcharge supérieure à 1.10, l'exploitation de la génératrice est fortement déconseillée parce que les problèmes que peuvent être causés par

les déséquilibres en courant et en tension sont très importants. A cet effet, le rendement de l'exploitation varie de 80.30 à 81.82 %.

VIII.3.5 Interprétations générales :

En confrontant les hypothèses aux résultats obtenus, ici, on va décrire et analyser toutes les phénomènes physiques qui s'y présentent, et d'en déduire le point de fonctionnement le plus rentable possible. Après cela, pour mettre en évidence la valeur du projet, on va comparer les résultats obtenus avec un travail déjà établi auparavant. En effet, ce travail de référence fait l'étude du comportement en régime déséquilibré d'une génératrice asynchrone triphasée ilotée en marche biphasée, mais l'excitation va être assurée par deux (02) condensateurs.

Dans tous les cas, on constate que la vitesse varie linéairement avec le couple mécanique, cela confirme l'hypothèse de départ. En plus, les valeurs des grandeurs au point de fonctionnement nominal sont retrouvées par toutes les différentes conditions de la simulation. Alors, l'hypothèse de départ est confirmée.

En quittant du point de fonctionnement nominal, c'est-à-dire qu'il y a variation des charges, la machine risque toujours de s'exposer à des problèmes plus ou moins dangereux.

Pour bien comprendre toutes les phénomènes, on va voir un à un le cas d'une surcharge et celui d'un délestage.

a. Surcharge :

Pour une surcharge, qui se traduit par l'accroissement des charges, les récepteurs demandent beaucoup plus d'énergie électrique d'où l'augmentation de la puissance et du couple mécanique, et donc une décélération de la vitesse de la turbine. Comme le rotor est accouplé avec l'arbre de cette dernière, donc, cette décélération signifie qu'il y a une force résistante de la part du rotor. Ceci est très dangereux parce que l'opposition de deux mouvements de rotation de sens différent provoque un problème de torsion. Ainsi, pour la génératrice, le rendement devient de plus en plus faible car elle ne délivre plus assez d'énergie électrique pour satisfaire aux demandes des utilisateurs (charges). De plus, une vitesse très faible (voisine de N_s) signifie que le glissement est très voisin de zéro ($g \approx 0$), c'est-à-dire que l'impédance rotorique devient très grande, le flux devient très faible. Dans ce cas, il se peut que le condensateur n'arrive plus à assurer ses rôles donc la désaimantation de la génératrice est ici très probable. Le démarrage en charge de la génératrice peut donc rencontrer un grand

problème d'excitation. Dans ce cas, une autre batterie de condensateur (condensateur de démarrage) s'avère très nécessaire si l'on veut produire encore de l'énergie électrique.

b. Délestage :

Comme tout système électromécanique, la puissance électrique délivrée par la génératrice est fonction de la puissance mécanique que cette dernière reçoit (figure 2). S'il y a diminution des charges (délestage), la puissance ainsi que le couple mécanique fournis par l'organe d'entraînement (turbine) diminuent. Cela implique l'accélération de la vitesse et, par conséquent, l'augmentation de la fréquence. Comme le rotor est accouplé avec l'arbre de la turbine, donc ils tournent à la même vitesse, cela implique l'augmentation du flux dans l'entrefer, donc augmentation de la puissance électrique à délivrer aux charges. Tout cela implique que, pour un problème de délestage, le démarrage en pleine charge du système {TURB-GAS} ne présente aucun problème. Cela signifie que le condensateur permanent branché aux bornes du stator suffit pour assurer la magnétisation de l'entrefer lorsque le rotor est entraîné à l'hypersynchronisme.

c. Synthèses :

En quittant du point de fonctionnement nominal, pour une exploitation hors de la zone de variation des charges admissible, la machine est exposée à des problèmes dangereux. Le facteur de sélectivité de ce domaine de fonctionnement est principalement le taux de déséquilibre en courant.

En tenant compte de tous les problèmes pouvant se présenter, il est conseillé d'exploiter la machine avec les paramètres suivants : $R_1 = 43.13 [\Omega]$ et $R_2 = 86.26 [\Omega]$.

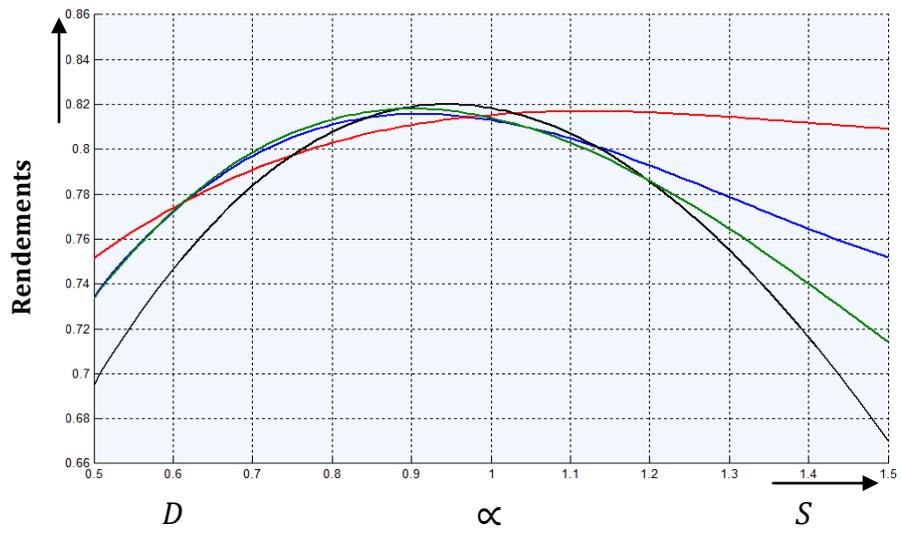
Tout cela est explicité par les figures ci-après.

Avec :

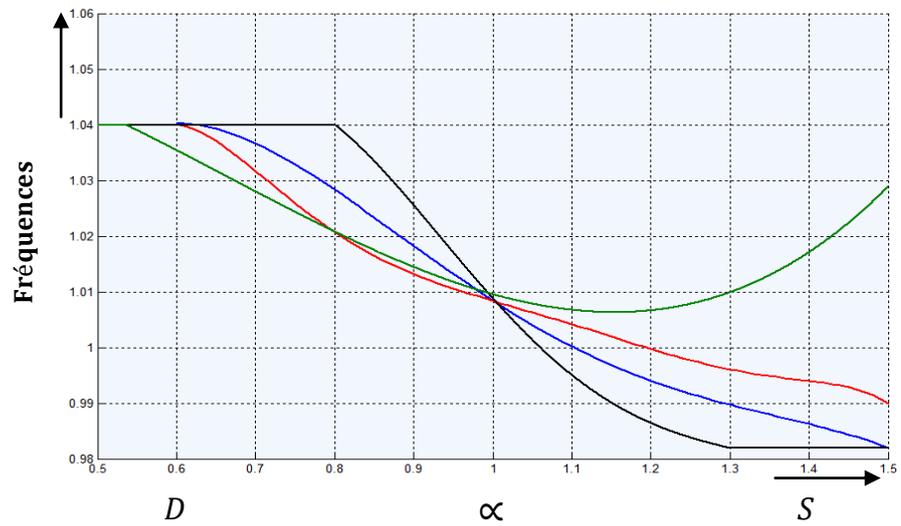
-  R_1 varie seule
-  R_2 varie seule
-  R_1 croît et R_2 croît
-  R_1 croît et R_2 décroît

On a :

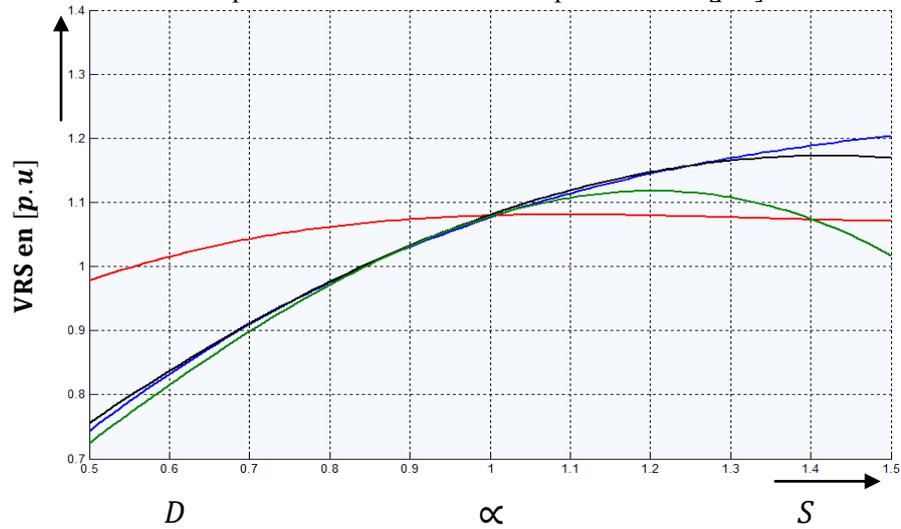
Confrontation des rendements

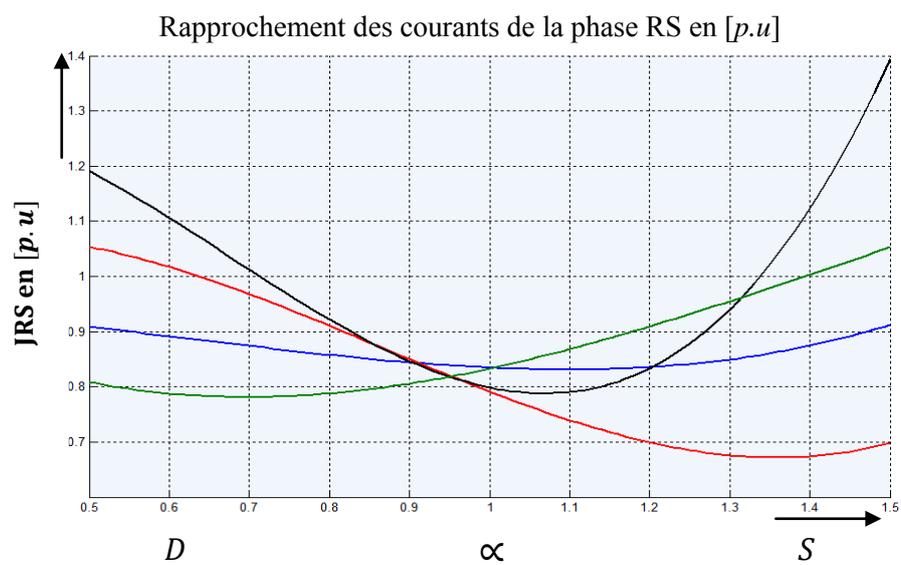
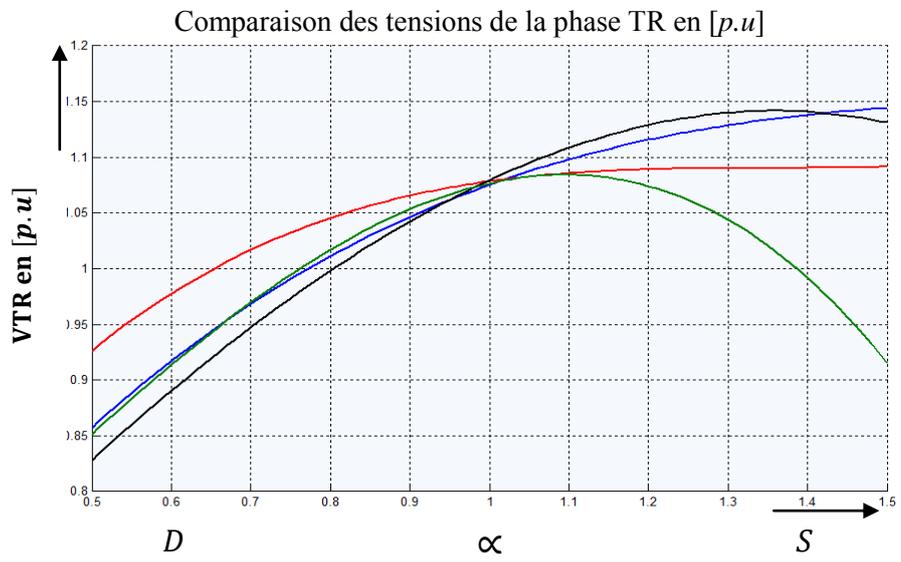
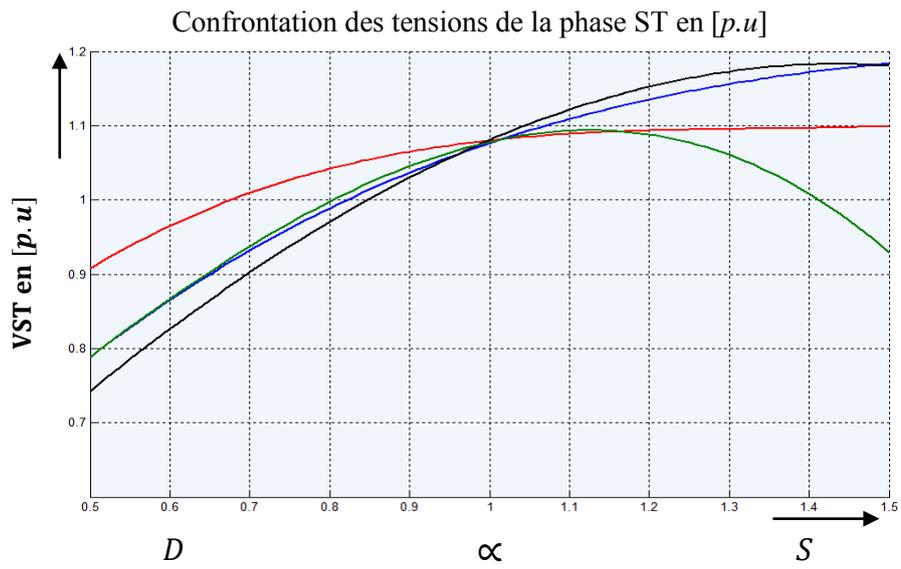


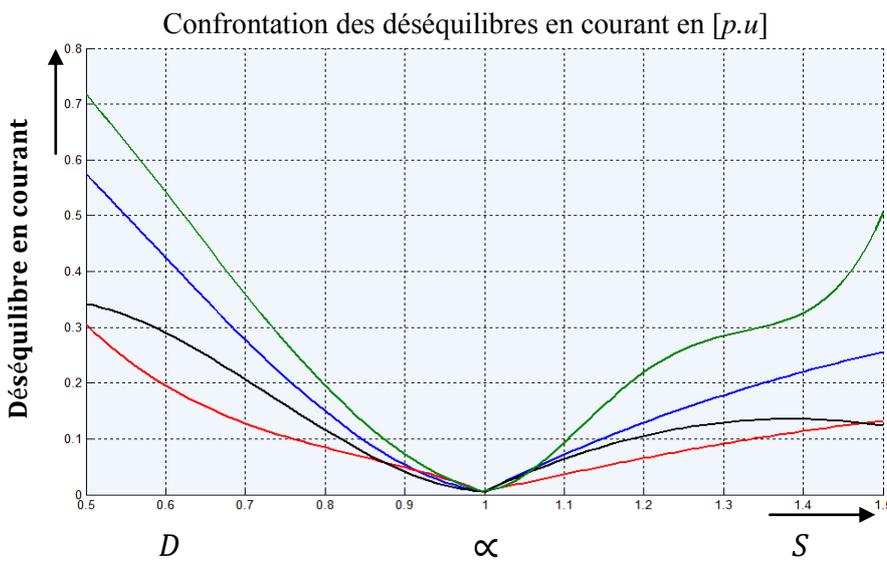
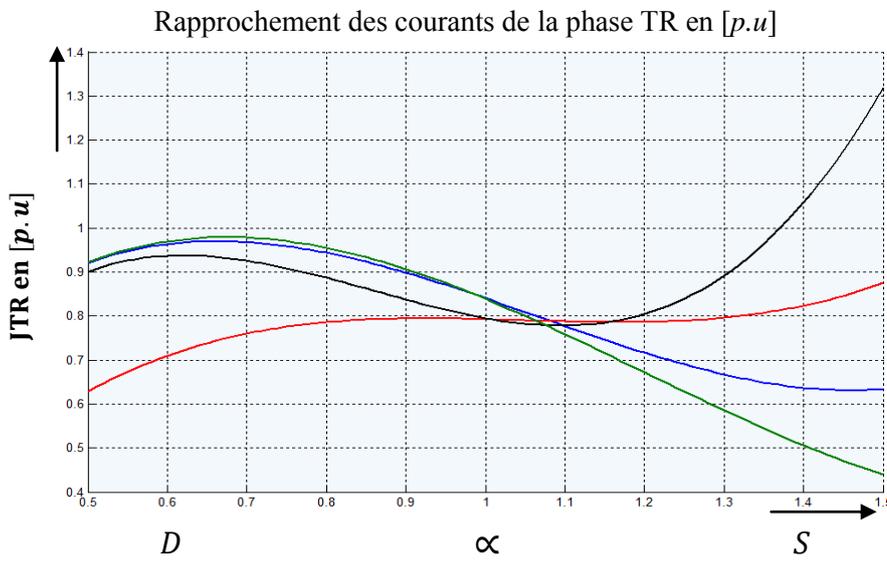
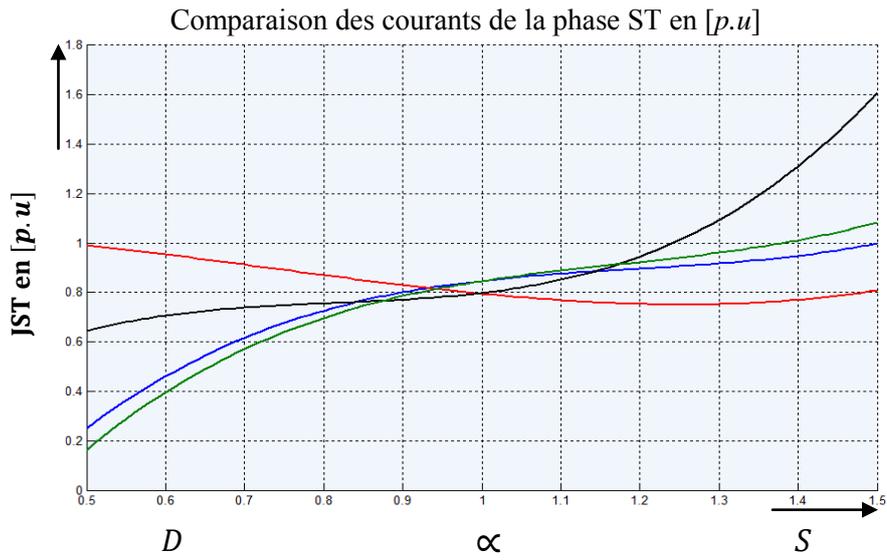
Rapprochement des fréquences en [p.u]



Comparaison des tensions de la phase RS en [p.u]







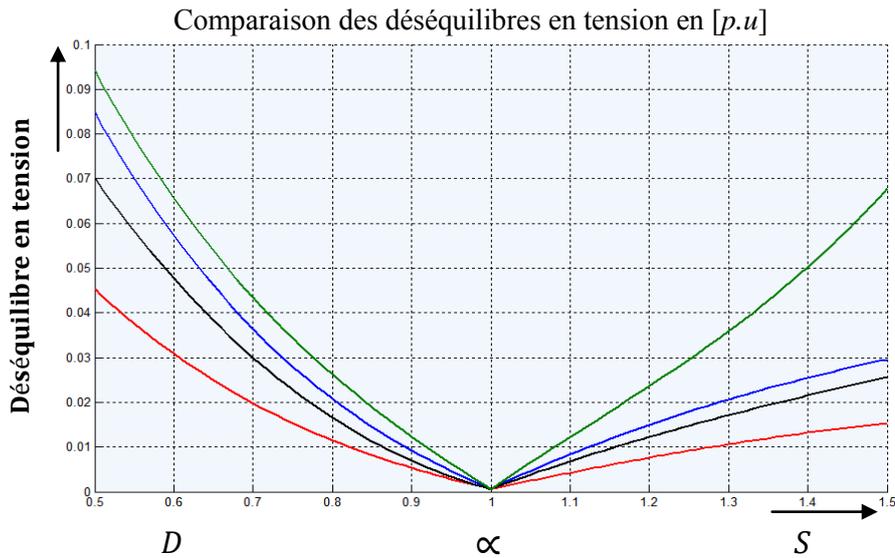


Figure 30 : Confrontation des résultats

On remarque que toutes les courbes ne se coïncident pas pour $\alpha = 1.00$. Ceci est à cause de la précision pris pour le calcul de la fonction de transfert \underline{F} , et du lissage des courbes par la méthode des moindres carrés.

Pour pouvoir mettre en relief les avantages du présent travail, on va comparer tous les résultats obtenus (là où le rendement est maximal) avec le projet déjà établi auparavant. On rappelle que ce projet prédétermine le comportement en régime déséquilibré d'une génératrice asynchrone triphasée ilotée en marche biphasée, mais l'excitation se fait à l'aide de deux (02) condensateurs.

d. Analyse des résultats

Le tableau suivant résume et compare les deux projets :

Caractéristiques	Littérature [8]	Projet
Rendement	85.00%	82.00%
Fréquence	0.99 [p.u]	1.03 [p.u]
Tensions des phases	0.97 [p.u]	1.05 [p.u]
Courants des phases	1.00 [p.u]	0.85 [p.u]
		0.77 [p.u]
		0.84 [p.u]
Charges	$R_1 = 57.00 [\Omega]$	$R_1 = 43.13 [\Omega]$
	$R_2 = 179.50 [\Omega]$	$R_2 = 86.26 [\Omega]$

Condensateurs	$C_1 = 42.48 [\mu\text{F}]$ $C_2 = 54.24 [\mu\text{F}]$	$C_2 = 60.72 [\mu\text{F}]$
Vitesse	1572.60 [tr/min]	1525.80 [tr/min]
Puissance mécanique	1316.38 [W]	1319.10 [W]
Couple mécanique	8.00 [N.m]	8.26 [N.m]

Pour convertir l'énergie mécanique en énergie électrique, les deux projets utilisent des machines asynchrones triphasées. Pour alimenter des charges biphasées et en partant des mêmes données, on remarque que le rendement du présent travail est inférieur à celui du projet établi dans la littérature [8]. On remarque aussi que le projet antérieur demande plus de vitesse et moins de couple que le travail établi. La figure suivante explicite cette observation :

Source : Auteur

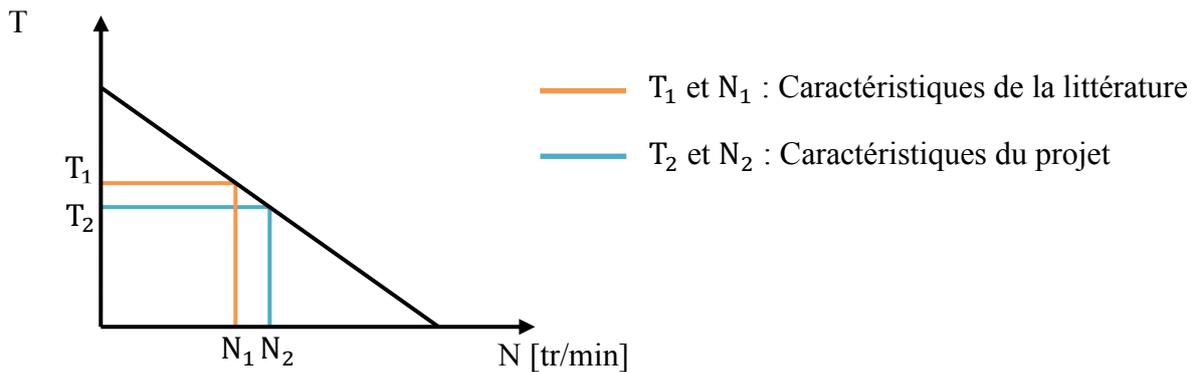


Figure 31 : Comparaison des deux caractéristiques

Cela signifie et affirme que les deux projets sont partis des mêmes hypothèses (caractéristique linéaire du système « couple-vitesse »). C'est pour cela que les puissances mécaniques demandées par les deux projets sont les mêmes (presque).

Ainsi, on remarque que tous les grandeurs électriques ne présentent aucuns dangers pour les charges. Alors, ces travaux peuvent être exploités sans installer des systèmes de régulation ou/et d'asservissement.

La différence entre les deux projets est le nombre de condensateurs à brancher aux bornes du stator : deux pour la littérature mais un seul pour cet ouvrage.

En effet, ces condensateurs ont pour rôle d'assurer la magnétisation de l'entrefer. Alors, plus on branche des condensateurs aux bornes du stator, plus cette magnétisation est meilleure. Par conséquent, si on n'utilise qu'un seul condensateur, cette magnétisation s'affaiblit. Cela se traduit par la diminution de la puissance électromagnétique, c'est-à-dire que le transfert de la puissance mécanique reçue en puissance électrique subit une petite diminution. Mais, si on utilise deux condensateurs, cette magnétisation s'améliore, donc la puissance électromagnétique augmente. C'est la raison pour laquelle le rendement ainsi que les charges à alimenter de cet ouvrage sont faibles par rapport à celui de la littérature.

L'avantage du présent travail est alors d'ordre économique. Ainsi, au point de vue technique, l'emploi d'un seul condensateur diminue le risque de claquage des condensateurs. En effet, ces claquages conduisent le système à subir un autre type de régime de fonctionnement : le régime transitoire. Même si la durée de ce régime est très rapide (de l'ordre de 0.10 [s]), les problèmes qu'il peut provoquer peuvent être très dangereux pour la machine et/ou pour les charges.

CHAPITRE IX PROPOSITION DE PROTECTION ET SECURISATION DE L'INSTALLATION

IX.1 PROTECTION DE L'INSTALLATION

IX.1.1 Conditions générales

Toutes les parties de l'installation doivent être construites de façon à résister aux sollicitations mécaniques et thermiques pouvant les frapper en régime de service ou en cas de régimes dynamiques néfastes comme les courts-circuits.

Il faut minimiser au maximum les perturbations et les détériorations dues aux arcs électriques prévisibles (pouvant s'y produire et risquant ainsi de mettre le feu à l'entourage).

Il faut limiter autant que possible les détériorations résultant des surintensités, des surtensions et de manque de tension.

IX.1.2 Solutions proposées

👉 Le critère de sélection de tous les composants à installer doit être fait avec maximum d'attention.

👉 Protection contre les surintensités :

On dit qu'il y a surintensité s'il existe un échauffement anormal dû à l'effet Joule. Ceci est très dangereux pour les matériels et surtout les isolants. Les causes principales de ces surintensités sont la surcharge et le court-circuit.

Il existe un grand nombre d'appareil pour la protection contre les intensités, tels que :

👉 Le coupe-circuit à fusible :

Le principe consiste à introduire dans le circuit à protéger un conducteur calibré qui, en cas de surcharge, s'échauffera par effet Joule jusqu'à atteindre sa température de fusion. Les coupe-circuits à fusible se placent aussi près que possible de l'origine de l'installation qu'ils ont à protéger. Le conducteur neutre ne doit jamais comporter de coupe-circuit à fusible.

🌿 Le disjoncteur à maximum de courant :

C'est un interrupteur dont l'ouverture se produit automatiquement lorsque le courant atteint une valeur trop élevée. L'action de déclenchement est instantanée lorsque le dispositif qui provoque l'ouverture est magnétique. L'action de déclenchement peut être différée (temporisée) lorsque le dispositif qui provoque l'ouverture est thermique.

🌿 Les relais de protection :

Ils diffèrent par l'organe de détection, soit magnétique (relais magnétique), soit thermique (relais thermique), ou bien magnétique et thermique à la fois (relais magnétothermique). Les organes de détection agissent, par l'intermédiaire de liaisons mécaniques simples, sur un contact à ouverture ou à fermeture qui est inséré dans le circuit de commande de l'appareil ou de la machine à protéger.

🍌 Protection contre les surtensions :

Lorsqu'il y a surintensités ou contraintes diélectriques (claquage des isolants), il y a présence de surtension.

La protection contre les surtensions faible est très difficile à réaliser, on utilise le plus souvent des appareils de régulateurs de tension.

La protection contre les surtensions consécutives à un contact accidentel avec une ligne à tension élevée est l'emploi des relais de tension. Ces derniers doivent répondre aux critères suivants :

- 🌿 Grande solidité : appareil fonctionnel après un mauvais fonctionnement ;
- 🌿 Rapidité d'action ;
- 🌿 N'intervenir que si la surtension est dangereuse.

IX.2 PROTECTION DE LA GENERATRICE

IX.2.1 Conditions générales

- 🍌 Réduire (à éliminer si c'est possible) toute forme de vibration du système ;
- 🍌 La durée de surcharge ne doit pas provoquer un échauffement dangereux, surtout pour les isolants ;
- 🍌 Les dispositifs de sécurité entre la génératrice et les charges doit être mis au point avant le l'exploitation du système.

IX.2.2 Vibrations

Comme la génératrice asynchrone est connue pour sa faible inertie (par rapport aux autres machines électriques tournantes), il est parfois nécessaire d'accoupler un volant d'inertie pour amortir les oscillations de vitesse et pour limiter l'accélération du rotor et par là éviter le coup de bélier. Le principe du volant d'inertie est la restitution de l'énergie mécanique. Il est constitué d'une masse mouvante, souvent circulaire, entraînée par la force motrice dans le mouvement du rotor et continue son mouvement par inertie après arrêt de son système d'entraînement. Le volant s'oppose ainsi au lancement ou à l'arrêt brutal du mouvement rotorique et régularise le mouvement mû par impulsions.

Néanmoins, l'adoption de ce système de protection nécessite une protection particulière contre les courts-circuits pour éviter les torsions d'arbre. Ce système n'est donc applicable que pour les machines de faible puissance ; sinon, il serait nécessaire d'avoir recours au système de régulation et d'asservissement.

IX.2.3 Surcharges

Pour protéger la génératrice aux surcharges, le moyen le plus simple mais efficace est l'emploi d'un relais thermique. La courbe de déclenchement doit correspondre à celle donnée par le fabricant de la machine.

En effet, un relais thermique est constitué d'un bilame métallique composé de deux lames à coefficients de température différent (chaud et froid). Le passage du courant (supérieur à la valeur de réglage) provoque l'échauffement et la déformation du bilame. Un courant électrique associé à ce bilame déclenche le circuit de commande.

La figure suivant illustre ces explications :

Source : Guide du technicien en électrotechnique [7]

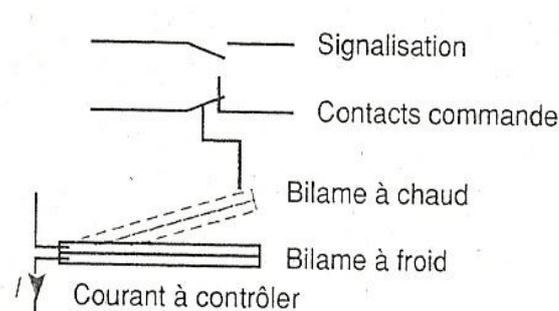


Figure 32 : Protection thermique

IX.2.4 Courts-circuits

La protection contre un court-circuit revient à trouver des dispositifs pouvant limiter (ou éliminer même si c'est possible) les surintensités. Elle peut se faire au moyen des cartouches fusibles ou de relais magnétiques avec un seuil de réglage en valeur de courant et en temps de déclenchement.

Il est toujours efficace d'employer des fusibles contenant plusieurs liaisons sélectionnables par commutateur. Si le fusible subit une poussée de tension, une autre liaison peut se mettre en place sans qu'il soit nécessaire de remplacer le fusible.

Par ailleurs, les relais magnétiques permettent le réglage de la sélectivité par rapport aux protections de lignes des consommateurs.

Vu ces deux types de protection contre les courts-circuits et les surcharges, on pourrait utiliser immédiatement des relais magnétothermiques qui jouent ces doubles rôles.

IX.2.5 Liaisons équipotentiell

Toutes les parties métalliques conductrices doivent être reliées au conducteur principal d'équipotentialité du milieu d'installation. Pour éviter des brûlures par arc sur les paliers, une liaison équipotentielle doit être établie entre la conduite forcée avant la vanne d'entrée, la turbine et l'alternateur. Ces liaisons doivent être posées de manière telle que, lors des révisions de la vanne et de la turbine, elles restent en place et elles assurent leur fonction de protection pour les personnes.

VOLET ENVIRONNEMENTAL

CHAPITRE X ETUDE DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Ce chapitre a pour but d'évaluer les impacts environnementaux de toute l'installation. Ainsi, le travail va mettre en relief les impacts négatifs et positifs du projet. A la fin, on essayera de proposer des solutions pour la suppression ou l'élimination même de ces impacts négatifs.

X.1 MOTIVATIONS

Actuellement, vu les changements climatiques et les réchauffements de la planète, tout projet, national ou international, doit faire l'objet d'une étude d'impacts environnementaux. L'intérêt de cette étude est la recherche du bien être de chaque individu et des composants de l'environnement lui-même.

Beaucoup d'évènements récents ont mis en évidence les crises écologiques affectant la planète. On peut citer ceux qui nécessitent une action d'urgence :

- Le réchauffement climatique lié à l'effet de serre ;
- Le trou de la couche d'ozone ;
- La déforestation ;
- La régression accélérée de la biodiversité ;
- La gestion des déchets ;
- La gestion de l'eau ;
- Le problème des ressources en eau ;
- La régression et dégradation des sols ;
- La pollution atmosphérique ;
- Les sècheresses ;
- Les marées noires ;
- Les catastrophes industrielles ;
- Les accidents nucléaires.

A cet effet, chaque pays et chaque individu a le devoir de contribuer à la protection de l'environnement pour qu'il y ait un équilibre durable et harmonieux entre les besoins du développement de l'homme et les soucis écologiques.

Ainsi, dans le but de mieux protéger l'environnement, il est nécessaire de faire l'objet d'une analyse scientifique en vue de dégager les aspects positifs et négatifs de l'exploitation de la génératrice asynchrone triphasée.

X.2 IMPACTS NEGATIFS

Comme toute machine électrique, la génératrice asynchrone peut causer des conséquences sérieuses pouvant être néfastes aux êtres environnants. Généralement, ce sont les fuites de courants et les effets sonores.

X.2.1 Danger d'électrocution

Le grand danger de l'électrocution est la mort. En effet, un courant de 75 à 100 [mA] traversant la partie du cœur peut tuer l'homme (risque de fibrillation cardiaque). Ainsi, l'homme peut être exposé à une paralysie respiratoire pour un courant de 30 à 75 [mA]. On note que la gravité de ces situations est fonction de la tension à laquelle la personne est soumise et sa résistance électrique (qui dépend de la nature des contacts : peau humide, bottes ou gants de caoutchouc, nature du sol ...); elle varie de 200 à 2000 [Ω]. Un courant inférieur à 30[mA] est presque sans effet (sauf possibilité de téτανisation des muscles si supérieur à 10[mA]). Le tableau suivant résume ces explications [11]:

Courants		Effets
0 – 0.5	[mA]	Pas de sensation
0.5 – 10	[mA]	Faible sensation
10 – 30	[mA]	Tétanisation des muscles
30 – 75	[mA]	Seuil de paralysie respiratoire (pouvant être irréversible)
75 – 100	[mA]	Seuil de fibrillation cardiaque (pouvant être irréversible)

Tableau 8 : Effets physiologiques du courant sur le corps humain

Sans entrer dans les détails, on admet que la tension de contact à laquelle on peut être soumis sans danger, ne doit pas dépasser une valeur limite, qui vaut en alternatif : 12 [V] (efficaces) dans des locaux immergés, 25 [V] dans un lieu humide et 50 [V] dans un endroit sec (la tolérance est le double en continu).

Ainsi, on peut s'électrocuter en touchant directement un conducteur (un fil de ligne d'une phase) de la distribution électrique, cela peut arriver si on travaille sur un appareil sous tension. La majorité des accidents arrive par contact avec la carcasse d'un appareil qui est

soumise à une tension supérieure aux limites cités ci-dessus. La cause de ce dernier est principalement le contact entre un fil de phase avec la carcasse métallique.

X.2.2 Nuisances sonores

Le bruit, selon son intensité exprimé en décibels « dB », sa fréquence en Hertz « Hz » et sa durée exprimée en heures (temps « T ») peut diminuer ou détruire définitivement la sensibilité de l'oreille jusqu'à la surdité complète lorsque son intensité est supérieure ou égale à 85 [dB].

Ainsi, la nuisance sonore évoque aussi des stress au moyen du sens de l'ouïe, et les études socio-physio-psychologiques ont montrées que certaines nuisances pouvaient causer de réels problèmes physiologiques (nausées, vomissements, céphalées, troubles cardiovasculaires ou respiratoires ainsi que des troubles du sommeil et de l'appétit) pouvant conduire à des troubles chroniques et graves de la santé, dont des dépressions et même des décès [9].

Le tableau suivant [11] illustre l'échelle du bruit dans la vie courante :

<i>Intensité sonore en (dB)</i>	<i>Milieu ou source</i>
0 - 10	Désert
10 - 20	Cabine de prise de son
20 - 30	Conversation à voix basse
30 - 40	Forêt
40 - 50	Bibliothèque
50 - 60	Lave-vaisselle
60 - 70	Poste téléviseur
70 - 80	Aspirateur
80 - 90	Tondeuse à gazon
90 - 100	Route à circulation dense
100 - 110	Marteau-piqueur
110 - 120	Discothèque
120 - 130	Avion au décollage (à 300 mètres)

Tableau 9 : Echelle du bruit selon le milieu

A partir de ces données, on peut dire que l'intensité sonore en régime de fonctionnement nominale de la génératrice asynchrone peut varier de 70 à 100 [dB]. Pour notre cas, les

sources de bruits sont essentiellement les mouvements mécaniques qui s'y présentent. Par exemple, le mouvement de rotation reçue par le rotor qui vient de l'organe d'entraînement (turbine), les paliers (roulements), etc.

X.3 IMPACTS POSITIFS :

X.3.1 Accès à l'électricité

Connaissant les problèmes énergétiques de nos jours, surtout à Madagascar (problème de la JIRAMA), ce projet participe au recouvrement des demandes par rapport aux offres. Ainsi, il répond efficacement aux demandes du monde rural en matière d'électrification parce que :

- 👉 La dispersion pour la distribution de l'électricité n'est plus un problème car la microcentrale (turbine hydroélectrique + génératrice asynchrone) est localisée, c'est-à-dire que l'installation est multiple pour chaque village.
- 👉 L'apport en énergie électrique répond également à la faible consommation des gens ruraux. En effet, l'installation délivre une basse et moyenne tension, c'est-à-dire que la production est de petite et moyenne puissance.
- 👉 Concernant le pouvoir d'achat, le prix d'un kilowattheure est à la portée de la majorité des ménages ruraux s'ils utilisent l'électricité seulement pour l'éclairage et pour l'audiovisuel.

Bref, le projet répond aux attentes des gens qui vivent dans les milieux ruraux. Ceci contribue à atteindre également les objectifs du gouvernement actuel en ce qui concerne le développement rapide et durable des paysans.

X.3.2 Développement économique et énergétique

Non seulement le projet peut créer des emplois, mais il permet aussi d'améliorer l'éducation et la formation des paysans.

Ainsi, l'accès à l'électricité offre de grands horizons pour le développement économique du monde rural, notamment :

- 👉 Construction des grandes infrastructures (route, hôpital, école, petites et moyennes industrie, ...);
- 👉 Possibilité de mise en place des appareils technologiques modernisés de communication et d'informations, ou autres ;
- 👉 Echange économique entre le monde rural et le monde urbain.

Bref, le projet est l'un des facteurs essentiels pour le développement du monde rural.

X.3.3 Avantage de l'utilisation d'une génératrice asynchrone

Le choix d'un alternateur (synchrone ou asynchrone ou autre) dépend de la puissance mécanique disponible et des besoins en énergies électriques des consommateurs. Ainsi, les critères suivants favorisent le choix et l'utilisation des génératrices asynchrones :

- 👉 Fonctionnement autonome : il n'a pas besoin d'une autre source d'énergie son excitation, une batterie de condensateur suffit pour l'apport en énergie réactive ;
- 👉 Facilité de maintenance : l'entretien des génératrices asynchrones est réduit au minimum parce que des pièces détachées sont toujours disponibles grâce à l'utilisation très répandue de ce type de machine électrique. Ainsi, il n'existe aucun matériel de réglage (asservissement de vitesse et de fréquence) ;
- 👉 Faible coût (investissement) : en effet, les machines asynchrones sont fabriquées en très grande série pour les petites et moyennes puissances. Les rotors à cage d'écureuil sont simples et robustes, il en résulte une grande fiabilité. C'est pour cela qu'elles présentent des prix très compétitifs sur le marché.

X.4 MESURES D'ATTENUATION DES IMPACTS NEGATIFS

En tenant compte de l'importance de l'environnement, il est nécessaire de supprimer si possible ou réduire au minimum les aspects négatifs de l'exploitation de la machine asynchrone. Dans le cas où il n'est pas possible de les supprimer ou de les minimiser, on doit procéder à la compensation.

X.4.1 Protection contre les fuites de courant

Les fuites de courant sont évitées en utilisant à bon escient le régime de mise à la terre. Ce dernier est identifié soit à partir de la situation du neutre par rapport à la terre, soit à partir de la situation des masses métalliques avec le neutre.

X.4.2 Protection contre les chocs électriques

La protection des personnes contre les chocs électriques dépend, selon le cas qui se présente, du fait que ce soit par un contact direct ou indirect.

- 👉 Pour le contact direct :
 - 🌿 Sans coupure d'alimentation : mettre hors de portée les parties actives sous tension (conducteurs), par exemple mettre une barrière entre le conducteur et la personne ;

- 🌿 Avec coupure d'alimentation : Utilisation des disjoncteurs à dispositifs différentiels résiduels (DDR) ou à dispositifs différentiels résiduels haute sensibilité (DDRHS).
- 👤 Pour le contact indirect :
 - 🌿 Sans coupure d'alimentation : utilisation des équipements avec double isolation.
 - 🌿 Avec coupure automatique de l'alimentation : utilisation des disjoncteurs.

X.4.3 Protection contre les bruits

Juridiquement [9], quand les valeurs d'exposition de l'opérateur atteignent 85 [dB], il doit mettre en place un programme technique ou organisationnel pour la réduction de l'exposition. Comme l'intensité sonore de la génératrice varie de 70 à 100 [dB], pour un fonctionnement qui dégage plus de 85 [dB] d'intensité sonore (d'une longue ou courte durée), il faut prévoir des systèmes ou des dispositifs qui atténueront ces bruits.

Il est donc conseillé d'utiliser des casques antibruit pour atténuer ses effets néfastes. Ainsi, si l'exploitation se trouve dans un centre-ville ou dans une zone fréquentée par beaucoup de personne, il faut compenser, par des infrastructures ou autres, ces effets.

CONCLUSION

Afin de compléter les documents de recherche sur les génératrices asynchrones triphasées et de contribuer à la recherche de solution pour l'électrification des zones rurales, une étude a été faite pour prédéterminer le comportement de la génératrice pour des points de fonctionnement particuliers, notamment les cas de surcharge et de délestage. Les mises en équations du système ont permis de modéliser le système {TURB-GAS-CH} pour différents régimes de fonctionnement (permanents ou non). Les résultats ainsi obtenus, à partir de la résolution numérique avec le logiciel « ASYNCHRONOUS GENERATORS RZA » (conçu avec le logiciel MATLAB 7.8), ont entraîné de nouvelles perspectives en matière d'amélioration et de perfectionnement pour l'exploitation des machines électriques tournantes. En effet, les résultats des simulations, même si le domaine d'étude n'est resté qu'à ce niveau, présentent un léger écart par rapport aux attentes théoriques, surtout lorsqu'on quitte le point de fonctionnement nominal.

Au terme de l'étude, on peut dire que, pour une surintensité ou court-circuit, la génératrice risque de s'exposer à des risques plus ou moins dangereux. En effet, un court-circuit s'exprime par une augmentation brutale du couple électromécanique, qui présente un risque d'endommagement des enroulements de la génératrice et l'arbre rotorique. Par ailleurs, les vibrations mécaniques causées par les brusques délestages et surcharges provoquent des pertes en puissance non négligeables, ainsi que des usures sérieuses au niveau des éléments constitutifs de la machine.

Comme le système {GAS-CH} est déjà déséquilibré (charges biphasées), la variation d'une ou des charges oblige l'étude à trouver un autre point de fonctionnement qui présente un moindre danger possible. Pour se faire, on a considéré le cas où une seule charge varie et l'autre est maintenue à sa valeur nominale, puis la variation simultanée avec le même coefficient, et enfin la variation avec des différents coefficients.

Tous ces résultats concluent que l'énergie électrique délivrée par la génératrice peut être exploitée directement. Connaissant les effets du projet par rapport à l'environnement, on a proposé des mesures de protections pour l'atténuation, voire l'élimination même de tous les impacts négatifs en se conformant aux lois en vigueur.

Bref, la prédétermination du comportement en régime déséquilibré d'une génératrice asynchrone triphasée, excitée par un seul condensateur et ilotée en marche biphasée a mis en évidence les limites de fonctionnement de la machine avec un minimum de budget de démarrage. Toutefois, il serait toujours intéressant de perfectionner l'étude en élargissant les

moyens mis en œuvre pour confirmer les résultats précédents. La recherche dans les domaines de la stabilité et de la régulation du comportement d'une telle machine constituerait une ouverture du présent thème.

A part cela, on a remarqué que plus on est loin du point de fonctionnement nominal, plus les pertes joules de la génératrice sont importants. Sachant que ces pertes, qui se traduisent par un échauffement, viennent du stator et du rotor, alors, c'est l'entrefer qui reçoit ces deux sources d'échauffement. Sachant que les éléments constitutifs de la machine sont tous métalliques, donc, la température où ils sont exposés doit être inférieure à leur température de fusion. Par conséquent, la matrice de conversion de l'échauffement en température, tout en connaissant les sources et ses caractéristiques, constitue aussi un autre problème très importante à résoudre.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] : J. CHÂTELAIN - « Machines électriques – Volume X » - Presses Polytechniques Romandes - Editions Georgi – 1991
- [2] : M. KOSTENKO, L. PIOTROVSKI – « Machines électriques : tome 2 - Machines à courant alternatif » – Editions Mir Moscou – 1969 – page 510.
- [3] : G. SEGUIER et F. NOTELET – « ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE » - Edition Technique et documentation, Paris – 1990
- [4] : M. POLOUJADOFF - « MACHINE ASYNCHRONE EN REGIME PERMANENT » - Technique de l'ingénieur, traité génie électrique, édition 2010 - référence D3480
- [5] : B. GUIGUES « PROTECTIONS ELECTRIQUES DES ALTERNATEURS ET MOTEURS » - Technique de l'ingénieur, traité génie électrique, édition 2010 - référence D3775
- [6] : M. JUFER « CIRCUITS MAGNETIQUES » - Technique de l'ingénieur, traité génie électrique, édition 2010 - référence D1050
- [7] : J.C. MAULERC, Y.AUBERT, A. DOMENACH - « Guide du Technicien en électrotechnique »
- [8] : M. R. RAKOTOMAMONJY – « ELABORATION D'UN LOGICIEL DE PREDETERMINATION DU COMPORTEMENT EN CHARGE D'UNE GENERATRICE ASYNCHRONE TRIPHASEE ILOTEE EN MARCHE BIPHASEE » - Mémoire d'ingénieur, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo – 2005
- [9] : A. RAVONINJATOVO – « Prédétermination du comportement en régimes transitoires d'une génératrice asynchrone triphasée ilotée en marche diphasée – Modélisation et simulation » – Mémoire d'ingénieur, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo – 2007
- [10] : T. RAMANANTSOA - « ETUDE DU COMPORTEMENT D'UN MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASE LORS D'UN COURT-CIRCUIT BIPHASE ET D'UN DESEQUILIBRE DE TENSIONS » - Mémoire d'ingénieur, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo – 2010
- [11] : T. RAMANANTSOA - « ETUDE SYNTHETIQUE DU COMPORTEMENT D'UNE MACHINE ASYNCHRONE TRIPHASEE SOUS UNE ALIMENTATION DIPHASEE » - Mémoire en DEA Génie Electrique, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo – 2011
- [12] : N. RAZANAMPARANY - « PREDETERMINATION DU COMPORTEMENT D'UNE MACHINE ASYNCHRONE TRIPHASEE EN MARCHE INVERSE-

MODELISATION et REGIME TRANSITOIRE » - Mémoire d'ingénieur, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo – 2004

[13] : T.A. ANDRIAMANAMPISOA- « ANALYSE NUMERIQUE DU COMPORTEMENT EN CHARGE D'UNE GENERATRICE ASYNCHRONE MONOPHASEE » - Mémoire d'ingénieur, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo – 2002

[14] : H. RAKOTOZANANY et H.A. RATSIMBA – « ETUDE DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE TRIPHASEE ILOTEE SUR CHARGE MONOPHASEE » - Mémoire d'ingénieur, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo – 2000

WEBOGRAPHIE

http://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_asynchrone

http://fr.wikipedia.org/wiki/G%C3%A9n%C3%A9rateur_%C3%A9lectrique

<http://voltaweb.elec.free.fr/GA/ga.html>

<http://www.a3i.fr/note1.htm>

http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/fr/tour/wtrb/async.htm

<http://www.technologuepro.com/schema/Chapitre2.htm>

<http://www.siteduzero.com>

<http://www.jrsoftware.org/isinfo.php>

<http://matlab.developpez.com/tutoriels/>

ANNEXES

ANNEXE A

INSTALLATION DU LOGICIEL

La source de toutes les figures, qui vont suivre, dans cette partie est l'auteur du présent ouvrage.

L'installation du logiciel « Asynchronous Generators RZA » se fait en exécutant l'application « AGRZAsSetup » du fichier source.

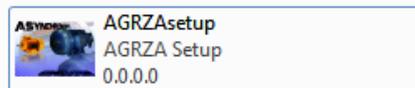


Figure 33 : Application

On demande ensuite le langage de l'installation. Normalement, la langue est automatiquement détectée en fonction de la langue utilisée sur l'ordinateur. Mais l'utilisateur peut choisir celle qui lui convienne.

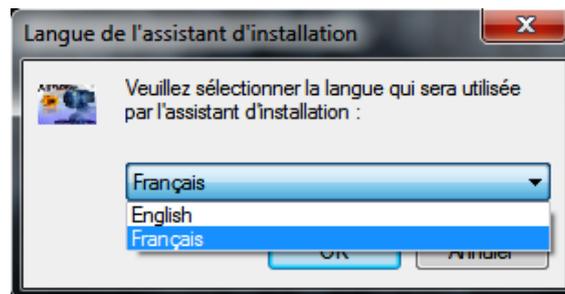


Figure 34 : Langage d'installation

Après avoir choisi le langage d'installation, une interface de bienvenue s'affiche pour guider les utilisateurs à l'installation.

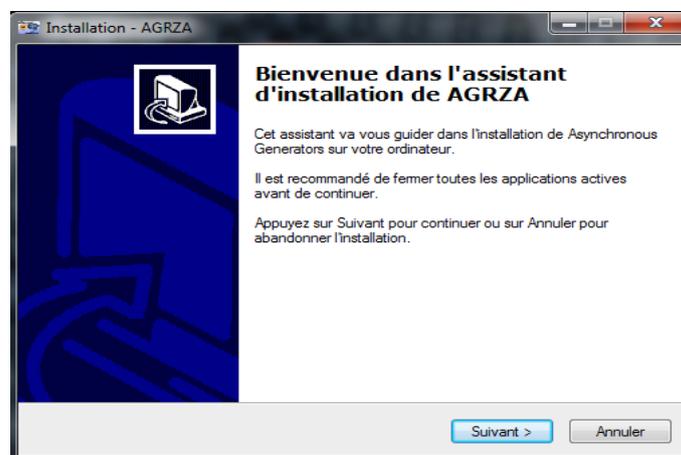


Figure 35 : Assistant de l'installation

En cliquant sur le bouton « Suivant > », on arrive à l'interface du contrat de licence.

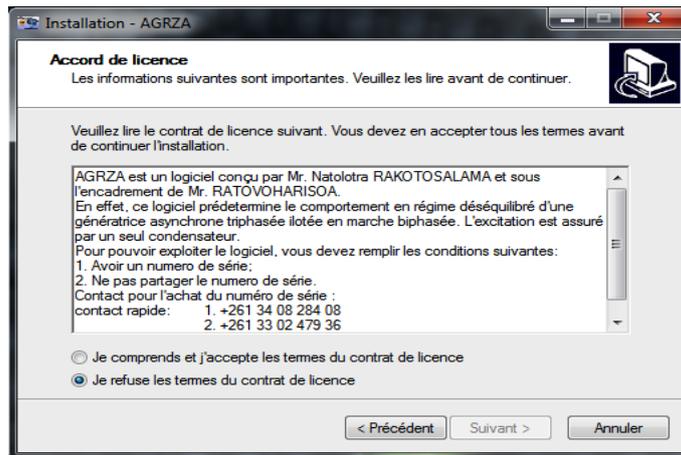


Figure 36 : Contrat de licence

Si l'utilisateur accepte le contrat, il pourra cliquer sur le bouton « Suivant » pour passer aux étapes suivantes.

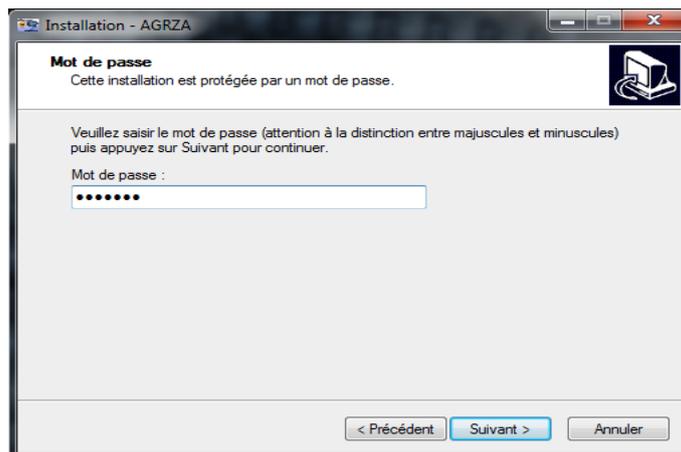


Figure 37 : Mot de passe

L'installation ne peut continuer que lorsque le vrai « clé produit » soit introduite dans sa case. L'interface suivante permet de modifier la destination du logiciel après installation.

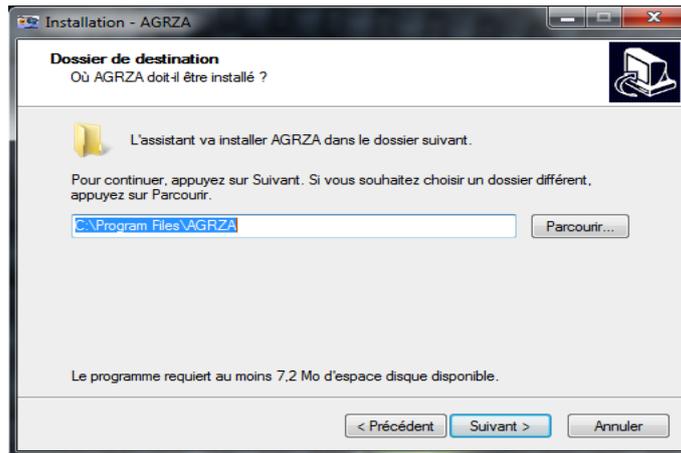


Figure 38 : Dossier de destination

Puis, on clique le bouton « Suivant > » et une nouvelle interface s'affiche.

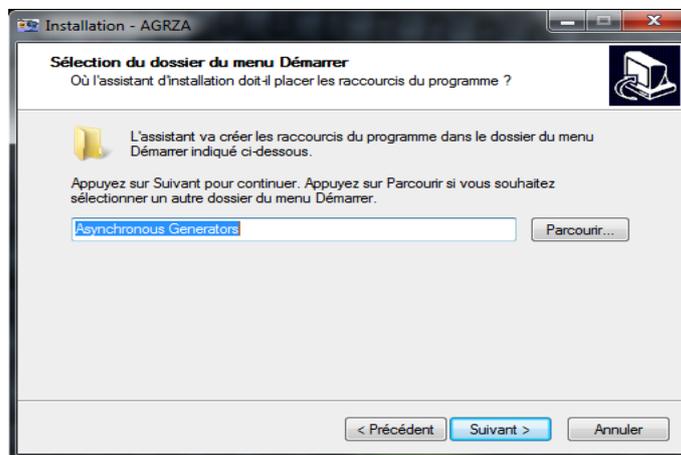


Figure 39 : Sélection du dossier du menu Démarrer

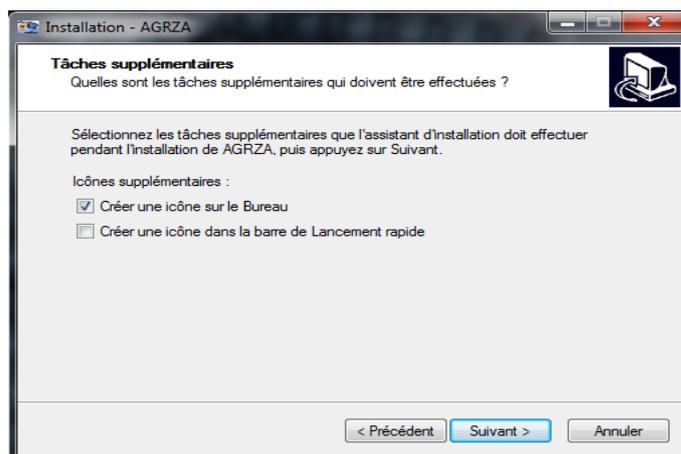


Figure 40 : Tâches supplémentaires

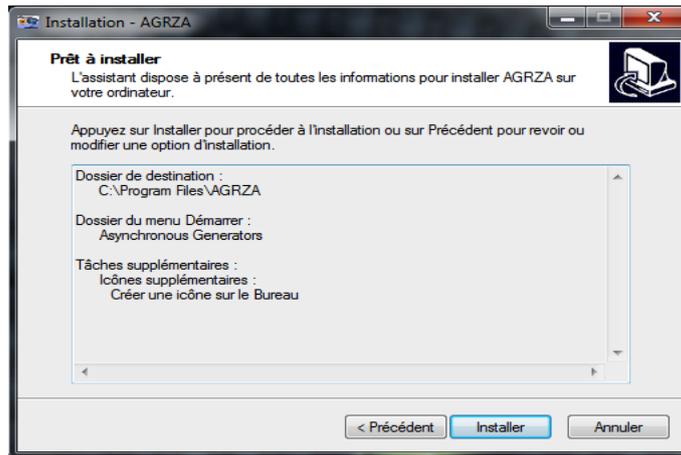


Figure 41 : Logiciel prête à installer

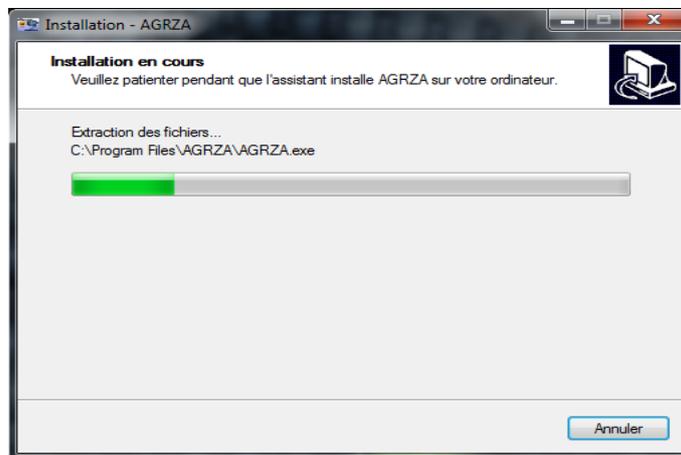


Figure 42 : Installation en cours

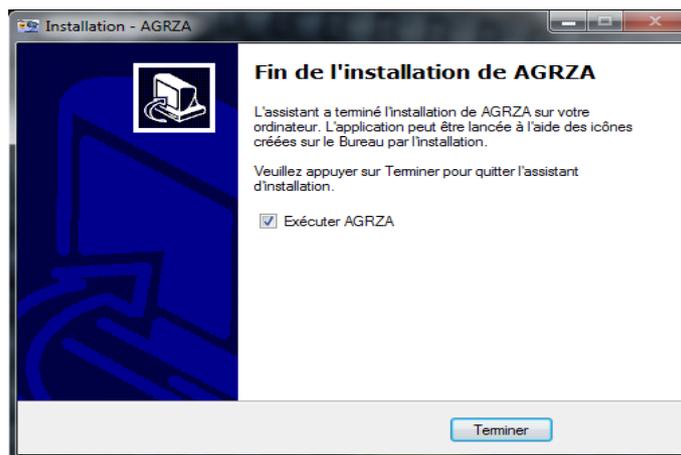


Figure 43 : Fin de l'installation

Pour désinstaller le logiciel, on passe au « menu Démarrer >> Tous les programmes >> Asynchronous Generators >> Désinstaller AGRZA ».

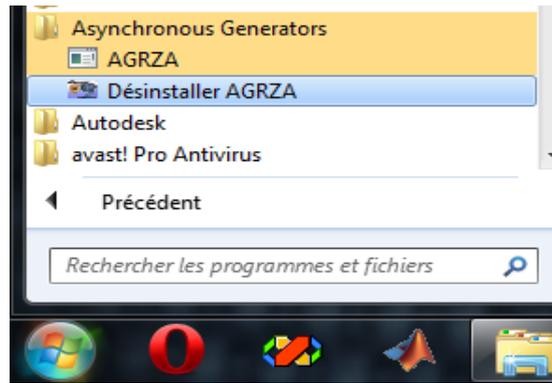


Figure 44 : Désinstallation

ANNEXE B

METHODE DES MOINDRES CARRES

Il arrive souvent en pratique qu'on obtienne une relation entre deux variables quelconques, soit x et y , à la suite d'une expérience ou d'une série de mesure. Généralement, cette relation forme une table, c'est-à-dire que pour une valeur de x donné, on a toujours une valeur de y correspondant. Ainsi, c'est cette table que va être traité avec la méthode des moindres carrés. Le problème se pose sur le choix des formules à appliquer.

En effet, l'action de choisir les formules susceptibles de décrire certaines donnée expérimentales est appelée « choix de formule empirique ». En réalité, une formule est d'autant plus parfaite qu'elle renferme plus de notions théoriques. Dans la pratique, on commence par se donner la forme de l'expression mathématique, et ensuite, en partant de la table, on détermine les valeurs des diverses constantes qui en font partie.

Avant de choisir la formule, il est utile de porter les données expérimentales sur le graphique et de tracer à main levé la courbe qui semble relier au mieux les points obtenus. Par la même, on met au jour les données les plus douteuses. En traçant la courbe, on se guidera, en plus de la table établie, par des considérations d'ordre général.

Une fois ce travail préliminaire achevé et la formule choisie, on doit trouver les constantes faisant partie de la formule. Soit l'exemple le plus le plus élémentaire $y = kx$ suivant.

Le problème consiste alors à trouver le coefficient k . Ainsi, chaque expérience donne une certaine valeur de k , à savoir :

$$k_n = \frac{y_n}{x_n}$$

Avec y_n et x_n sont les valeurs de x et y à la $n^{\text{ième}}$ expérience. En posant p le nombre total d'expérience, on trouve facilement la moyenne des coefficients \bar{k} :

$$\bar{k} = \frac{\sum_{n=1}^p k_n}{p}$$

Cette méthode est la plus simple mais sans être efficace pour la détermination de ce coefficient. En effet, soient x une quantité caractérisant les conditions de l'expérience et dont

la valeur est donnée exactement, et y le résultat de l'expérience entaché d'une certaine erreur de mesure. Supposons que l'erreur de mesure Δy reste sensiblement la même que y, soit petit ou grand. Alors l'erreur sur k_n , égale à $\Delta y_n/x_n$, est d'autant plus élevée que x_n est plus petite. Par conséquent, lorsqu'on calcule k, il est préférable de s'appuyer sur les expériences dans lesquelles x_n sont grands.

Le problème revient donc à déterminer le coefficient k pour laquelle la fonction correspond le mieux possible aux données expérimentales.

Comme mesure de l'écart entre la fonction et les données expérimentales dans la $n^{ième}$ expérience, on recherche la valeur de $(y_n - kx_n)^2$. Cette formule est adoptée pour faciliter le calcul et pour éviter l'annulation réciproque des termes. Ainsi, en qualité de mesure de l'erreur totale S dans la description des données expérimentales par la fonction $y=kx$, on prend la somme des mesures d'écart pour toutes les expériences, c'est-à-dire :

$$S = \sum_{n=1}^p (y_n - kx_n)^2$$

La méthode de recherche des constantes de la formule avec la condition que l'écart total S soit le plus petit possible s'appelle « *méthode des moindres carrés* ».

Cette méthode vise à diminuer les écarts les plus importants. Donc, pour trouver $k = \bar{k}$ tel que S soit minimal, on résolve l'équation $\frac{dS}{dk} = 0$. Après résolution analytique, on trouve :

$$\bar{k} = \frac{\sum_{n=1}^p x_n y_n}{\sum_{n=1}^p x_n^2} = \frac{x_1 y_1 + x_2 y_2 + \dots + x_n y_n}{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}$$

Si dans les diverses expériences la valeur de k_n est différente, alors on aura :

$$\bar{k} = \frac{k_1 x_1^2 + k_2 x_2^2 + \dots + k_n x_n^2}{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}$$

Par conséquent, pour un coefficient minimal et maximal, la valeur de \bar{k} doit vérifier les inégalités suivantes : $k_{min} < \bar{k} < k_{max}$

ANNEXE C

PROGRAMMES

RECHERCHE DU POINT DE FONCTIONNEMENT NOMINAL

```
=====
%
%                               RECHERCHE DU POINT DE FONCTION NOMINAL
%                               =====
%                               Méthode: variation de la charge R1
%                               =====
% Paramètres nominaux
Vnom = 220;
Inom = 2.8;
fnom = 50;
Ns= 1500;
w=2*pi*fnom;
Ep=0.02;

% Paramètres directes de la machine
Rsd=5.97;
Rrd=7.406;
Rfd=629.90;
Lhd =0.205;
Lsd =0.0179;
Lrd =0.0177;

% Paramètres inverses de la machine
Rsi=Rsd;
Rri=7.406;
Rfi=112.56;
Lhi =0.057;
Lsi =0.0178;
Lri =0.0176;

% Tension statorique
k=0;

% Variation de la charge résistive R1
for R1=1:0.1:100

    % Calcul des impédances directes et inverses
    N=1501 +0.1*k;
    g= (Ns-N)/Ns;
    Zs=Rsd+j*Lsd*w;
    Zrd=(Rrd/g)+j*Lrd*w;
    Zri=(Rri/(2-g))+j*Lri*w;
    Zud=(j*Rfd*Lhd*w)/(Rfd+j*Lhd*w);
    Zui=(j*Rfi*Lhi*w)/(Rfi+j*Lhi*w);
    Zmd=Zs+(Zud*Zrd)/(Zud+Zrd);
    Zmi=Zs+(Zui*Zri)/(Zui+Zri);
    Ymd=1/Zmd;
    Ymi=1/Zmi;

    % Opérateur mathématique
    a=cos((2*pi)/3)+(j*sin((2*pi)/3));
```

```

% Calcul des admittances
YRS= (1/(R1));
YST= (1/(2*R1))*(1+(j*sqrt(3)));
YRSd=(1/3)*(YRS+(a*YST));
YRSi=(1/3)*(YRS+(a*a*YST));
YRSo=(1/3)*(YRS+YST);

% Calcul de la fonction F
F=Ymd+YRSo-((YRSd*YRSi)/(Ymi+YRSo));

% Puissance mécanique de la turbine
Pmecturb=2*pi*16.8*(1-(N/3000))*(N/60) ;

% Couple nominale
Tnom=16.8*(1-(N/3000));

% Test sur la fonction F
if abs (real (F)) <Ep& abs (imag (F)) <Ep

    % Calcul de la tension Uh (correction des paramètres)
    I= (Vnom*YRSo);
    Uh=I*Zs-Vnom;
    Uf=abs (Uh);

    % Essai à vide en marche moteur
    Uho=[65.1289 77.9853 88.1917 93.3374 111.4373 129.6856 154.4481 156.4230
165.1531 174.0018 182.2809 187.9686 190.3397 198.2945 200.9123 204.7348
206.1565 209.0398 210.5892 215.6452 221.1453 228.7359 237.9460 274.2484
282.3242 289.7046 348.9880 386.1212 ];
    Rfer=[-1076.2 -2546.1 -78311 41570 5359.2 2964.2 2150.1 2100.8 1929.1
1828.8 1733.4 1701.4 1646.2 1548.7 1526.1 1472.8 1423.1 1375.6 1537.3
2681.8 1292.9 -9197.4 -4037.7 -2114.5 -2334.2 -2009.3 -5040.2 -4268.3 ];
    Lfer=[0.5424 .5385 0.5285 0.5305 0.5121 0.4903 0.4588 0.4537 0.4392 0.4272
0.4068 0.3921 0.3821 0.3577 0.3374 0.3142 0.3149 0.2873 0.2752 0.2401
0.2140 0.2049 0.1993 0.1945 0.1873 0.1757 0.2080 0.2101 ];

    % Interpolation
    Rfdnou=interp1 (Uho, Rfer, Uf,'spline');
    Lhdnou=interp1 (Uho, Lfer, Uf,'spline');

    if (Rfd-Rfdnou)<=0.002 & (Lhd-Lhdnou)<=0.002
        k=0;
        Rfd=Rfdnou;
        Lhd=Lhdnou;
    else
        kio= (Vnom/Inom);
        fio1=1/YRSo;
        fio=abs (fio1);
        ecart=abs (fio-kio);
        if ecart<0.01

            % Calcul des capacités
            C1=0;
            C2=(1000000.*sqrt (3))./(2.*w.*R1);
            C3=0;
            disp('R1 = ')
            disp(R1)
        end
    end
end

```

```

disp('C1 = ')
disp(C1)
disp('C2 = ')
disp(C2)
disp('C3 = ')
disp(C3)
disp('ecart=')
disp(ecart)
disp('N=')
disp(N)
disp('Rfd=')
disp(Rfd)
disp('Lhd=')
disp(Lhd)
disp('Abs (F)=')
disp(abs(F))
disp('F=')
disp(F)
disp('Pmecturb = ')
disp(Pmecturb)
disp('Tnom')
disp(Tnom)
break
end
end
else
if N<=1600
k=k+1;
else
k=0;
end
end
end
end
end

```

VARIATION LENTE DE LA CHARGE RESISTIVE R_1

```
=====
%
%                               VARIATION LENTES DES CHARGES RESISTIVES
%=====
%                               R1 varie seule
%-----
% Variation des charges nominaux
for alpha=50:10:150;

    % Paramètres directs de la machine
    Rsd=5.975;
    Rrd=7.406;
    Rfd=629.90;
    Lsd =0.0179;
    Lrd =0.0177;
    Lhd =0.3404;

    % Paramètres inverses de la machine
    Rsi=5.975;
    Rri=7.406;
    Rfi=112.56;
    Lsi =0.0179;
    Lri =0.0177;
    Lhi =0.057;

    % Valeurs nominales des résistances et condensateur
    R1nom=45.4;
    R2nom=90.8;
    C2nom=60.719;

    % Variation de la charge R1
    R1=alpha*R1nom;
    R2=R2nom;

    % Incrémentation de la vitesse et de la fréquence
    k=0;
    incf=0.1;
    for N=1500:2:1650;
        f=49+k*incf;

        % Calcul des impédances directe et inverse de machine
        Ns=1500;
        w=2*pi*f;
        g=(Ns-N)/Ns;

        Zsd=Rsd+j*Lsd*w;
        Zsi=Rsi+j*Lsi*w;

        Zrd=(Rrd/g)+j*Lrd*w;
        Zri=(Rri/(2-g))+j*Lri*w;

        Zud=(j*Rfd*Lhd*w)/(Rfd+j*Lhd*w);
        Zui=(j*Rfi*Lhi*w)/(Rfi+j*Lhi*w);

        Zmd=Zsd+((Zud*Zrd)/(Zud+Zrd));
        Zmi=Zsi+((Zui*Zri)/(Zui+Zri));
```

```

% Opérateur mathématique
a=cos(2*pi/3)+j*sin(2*pi/3);

% Calcul des admittances
YRS=1/R1;
YST=(1/R2)+j*C2nom*w;
YRSd=(1/3)*(YRS+(a*YST));
YRSi=(1/3)*(YRS+(a^2)*YST);
YRSo=(1/3)*(YRS+YST);

% Calcul de la fonction de transfert
F=(1/Zmd)+YRSo-((YRSi*YRSd)/((1/Zmi)+YRSo));

% Test sur la fonction de transfert F
if real(F)<0.01& imag(F)<0.01

    % Puissance mécanique délivré par la turbine
    Pmecturb=2*pi*16.8*(1-(N/3000))*(N/60);

    % Pertes par frottement et ventilation
    pfvl=11.6;

    % Calcul des grandeurs électriques
    % Calcul des fonctions de transfert complexe
    FursidC=-YRSd/((1/Zmi)+YRSo);
    FpelutlC=((1+FursidC^2)/R1)+(a^2*((a+FursidC)^2)/R2);
    FpjsdC=3*Rsd*(1/Zmd)^2;
    FpjsiC=3*Rsi*(1/Zmi)^2*(FursidC^2);
    FpfdC=(3/Rfd)*(1+(Zsd/Zmd))^2;
    FpfiC=(3/Rfi)*(1+(Zsi/Zmi))^2*(FursidC^2);
    FpjrdC=(3*Rrd/(Zrd^2))*(1+(Zsd/Zmd))^2;
    FpjriC=(3*Rri/(2*(Zri^2)))*(1+(Zsi/Zmi))^2*(FursidC^2);
    % Valeurs réels des fonctions de transfert
    Fpelutl=abs(FpelutlC);
    Fpjsd=abs(FpjsdC);
    Fpjsi=abs(FpjsiC);
    Fpfd=abs(FpfdC);
    Fpfi=abs(FpfiC);
    Fpjrd=abs(FpjrdC);
    Fpjri=abs(FpjriC);
    % Tension aux bornes de la génératrice
    NumVrsd=Pmecturb-Pfvl;
    DenVrsd=Fpelutl+Fpjsd+Fpjsi+Fpjrd+Fpjri+Fpfd+Fpfi;
    VRSd=sqrt(NumVrsd/DenVrsd);
    % Calcul de la valeur complexe de la tension inverse
    VRSi=FursidC*VRSd;
    % Calcul tension aux bornes de la branche magnétisante
    Vhd=(1-(Zsd/Zmd))*VRSd;
    Uf=abs(Vhd);

    % Essai à vide en marche moteur
    Uho=[65.1289 77.9853 88.1917 93.3374 111.4373 129.6856 154.4481 156.4230
165.1531 174.0018 182.2809 187.9686 190.3397 198.2945 200.9123 204.7348
206.1565 209.0398 210.5892 215.6452 221.1453 228.7359 237.9460 274.2484
282.3242 289.7046 348.9880 386.1212 ];
    Rfer=[-1076.2 -2546.1 -78311 41570 5359.2 2964.2 2150.1 2100.8 1929.1
1828.8 1733.4 1701.4 1646.2 1548.7 1526.1 1472.8 1423.1 1375.6 1537.3
2681.8 1292.9 -9197.4 -4037.7 -2114.5 -2334.2 -2009.3 -5040.2 -4268.3 ];

```

```
Lfer=[0.5424 .5385 0.5285 0.5305 0.5121 0.4903 0.4588 0.4537 0.4392 0.4272
0.4068 0.3921 0.3821 0.3577 0.3374 0.3142 0.3149 0.2873 0.2752 0.2401
0.2140 0.2049 0.1993 0.1945 0.1873 0.1757 0.2080 0.2101 ];
```

```
% Interpolation
Rfdnouv=interp1 (Uho, Rfer, Uf, 'spline');
Lhdnouv=interp1 (Uho, Lfer, Uf, 'spline');
```

```
% Test sur les paramètres corrigés
if (Rfdnouv-Rfd)<0.01&(Lhdnouv-Lhd)<0.01
```

```
    % Calcul des grandeurs électriques
    VRSc=VRSD+VRSi;
    VSTc=(a*a*VRSD)+(a*VRSi);
    VTRc=(a*VRSD)+(a*a*VRSi);
    VRS(alpha)=abs(VRSc)/220;
    VST(alpha)=abs(VSTc)/220;
    VTR(alpha)=abs(VTRc)/220;
    DeseqV(alpha)=abs(VRSi/VRSD);
    JRSd=VRSD/Zmd;
    JRSi=VRSi/Zmi;
    DeseqI(alpha)=abs(JRSi/JRSd);
    JRSc=JRSd+JRSi;
    JSTc=(a*a*JRSd)+(a*JRSi);
    JTRc=(a.*JRSd)+(a*a*JRSi);
    JRS(alpha)=abs(JRSc);
    JST(alpha)=abs(JSTc);
    JTR(alpha)=abs(JTRc);
    NUI(alpha)=N/1500;
    fUI(alpha)=f/50;
    P=((abs(VRSc))^2/R1)+((abs(VSTc))^2/R2);
    Pelutl(alpha)=P;
    PmecturbA(alpha)=Pmecturb;
    beta(alpha)=P/Pmecturb;
    K(alpha)=(16.8/7.994)*(1-(N/3000));
    Pfer=(Fpfd+Fpfi)*(VRSD^2);
    Pjs=(Fpjrd+Fpjri)*(VRSD^2);
    Pjr=(Fpjrd+Fpjri)*(VRSD^2);
    Perte(alpha)=Pfer+Pjs+Pjr+Pfv1;
    Cont(alpha)=Pelutl(alpha)+Perte(alpha);
```

```
    break
```

```
else
```

```
    % Prise des valeurs corrigés comme valeur initiale
```

```
    Rfd=Rfdnouv;
```

```
    Lhd=Lhdnouv;
```

```
    N=1500;
```

```
end
```

```
else
```

```
    if f<52
```

```
        k=k+1;
```

```
    end
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

```
% Traçage des courbes
```

```
alpha=50:10:150;
```

```
figure(01)
```

```

        h1=plot(alpha,fUI(alpha),'r');
        set(h1,'linewidth',2.5);
        title ('FREQUENCE');
        grid on;
        hold on;
figure(02)
        h2=plot(alpha,NUI(alpha),'r');
        set(h2,'linewidth',2.5);
        title ('VITESSE');
        grid on;
        hold on;
figure(03)
h3=plot(alpha,JRS(alpha),'r',alpha,JST(alpha),'g',alpha,JTR(alpha),'b');
        set(h3,'linewidth',2.5);
        title ('Courant des phases : JRS(rouge), JST(vert), JTR(bleu)');
        grid on;
        hold on;
figure(04)
h4=plot(alpha,VRS(alpha),'r',alpha,VST(alpha),'g',alpha,VTR(alpha),'b');
        set(h4,'linewidth',2.5);
        title ('Tension des phases : VRS(rouge), VST(vert), VTR(bleu)');
        grid on;
        hold on;
figure(05)
        h5=plot(alpha,Pelut1(alpha),'r',alpha,Perte(alpha),'k');
        set(h5,'linewidth',2.5);
        title ('Puissance utile(Rouge) et pertes(Noir)');
        grid on;
        hold on;
figure(06)
        h6=plot(alpha,PmecturbA(alpha),'b');
        set(h6,'linewidth',2.5);
        title ('Puissance mécanique du turbine');
        grid on;
        hold on;
figure(07)
        h7=plot(alpha,K(alpha),'b');
        set(h7,'linewidth',2.5);
        title ('Couple mécanique');
        grid on;
        hold on;
figure(08)
        h8=plot(alpha,DeseqV(alpha),'r');
        set(h8,'linewidth',2.5);
        title ('Déséquilibre en tension');
        grid on;
        hold on;
figure(09)
        h9=plot(alpha,DeseqI(alpha),'r');
        set(h9,'linewidth',2.5);
        title ('Déséquilibre en courant');
        grid on;
        hold on;
figure(10)
        h10=plot(alpha,beta(alpha),'r');
        set(h10,'linewidth',2.5);
        title ('Rendement');
        grid on;
        hold on;

```

Auteur : Monsieur Zolinirina Andrinatolotra RAKOTOSALAMA
Adresse : Lot 0514 L 936 Tomboarivo Antsirabe 1
Tél : (+261) 33 02 479 36
Courriel : rza_natolotra88@yahoo.fr

Titre : **PREDETERMINATION DU COMPORTEMENT EN REGIME
DESEQUILIBRE D'UNE GENERATRICE ASYNCHRONE
TRIPHASEE ILOTEE EN MARCHE BIPHASEE, EXCITEE PAR UN
SEUL CONDENSATEUR**

Résumé : Cette étude a présenté le comportement d'une génératrice asynchrone triphasée lorsque les charges connectées subissent des variations. La modélisation de la machine et l'exploitation de la théorie de FORTEESCUE ainsi que le logiciel « ASYNCHRONOUS GENERATORS RZA » établi sous MATLAB 7.8, ont permis l'analyse des différentes grandeurs caractérisant la machine lors d'une surcharge ou d'un délestage. Même si ce logiciel ne traite tous les cas possibles, les résultats obtenus répondent aux normes exigées par les consommateurs. Ceci prouve que toutes les démarches théoriques effectuées sont valides.

Mots-clés : Machine asynchrone – G.A.S – Charges biphasées – Régimes déséquilibrés – Transformation de FORTEESCUE

Abstract : This work presents the behavior of three-phases asynchronous generators when the connected charges take a various values. The modeling of machine, the exploitation of the theory of FORTEESCUE and the software “ASYNCHRONOUS GENERATORS RZA” set up with MATLAB 7.8, allowed us to analyze the different characteristic of the machine during an overload or unballasting. Even if this software does not treat all possibility, the results obtained are in accordance with the standards required by the customer. This prove that all theoretical used in this study are valid.

Keywords : Squirrel cage induction motor – Three-phases star connected induction – Delta-connected – Asymetric connection – two-phases - Condensator

Nombre de pages : 122
Nombre de figures : 044
Nombre de tableaux : 009