



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université d'EL-Oued
Faculté des Sciences et de Technologies

Mémoire de Fin d'Etude
En vue de l'obtention du diplôme de

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et de Technologies
Filière: Génie Électrique
Spécialité: Contrôle et Diagnostic des Systèmes Électriques

Thème

***MODELISATION ET SIMULATION DES
ACTIONNEURS ELECTRIQUES***

Dirigé par:
TIR Zoheir

Réalisé par:
NEZLI Fares
DIFALLAH Lakhdar

Soutenu 04 Juin 2013

Remerciements

Exprimons notre profonde gratitude et l'appréciation et le respect du professeur Tir Zoheir qui ne nous a pas épargné ses recommandations de valeur et d'encouragement, également nous adressons nos remerciements à tous les gens qui ont fourni une assistance pour la préparation de cette discussion, de près ou de loin.

Conclusion générale

En résumant tous ces études, en général les moteurs électriques se composent d'un stator et d'un rotor.

Le principe de fonctionnement est la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique en passant par le champ magnétique.

Après la modélisation de ce système à des équations mathématiques et simulation on pouvait aménager et améliorer tous les systèmes des moteurs électriques et surtout ceux que nous avons étudiés le SESE et SEDE .

LISTE DES FIGURES

- Figure. I.1** : Le schéma de la roue de Barlow, [You tub]
Figure. I.2 : Classification des machines électriques.
Figure. I.3 : Ancien moteur à courant alternatif bobiné en anneau au stator.
Figure. I.4 : Le haut parleur. (b) circuit magnétique [cours Ped]
Figure. I.5 : Actuateur linéaire (b) circuit magnétique symétrique.
Figure. I.6 : Actuateurs à bobine mobile. (b) circuit magnétique asymétrique

Figure.I.7 : disque dur d'ordinateur (b) circuit magnétique.

Figure. I.8 : Actuateur secteur

Figure. I.9 : Actuateur à aimants mobiles
Figure. I.10 : Actuateur rotatif à plage angulaire limitée
Figure .II.1 : Bilan de la conversion d'énergie électromécanique
Figure .II.2 : Système électromagnétiques à Simple excitation SESE
Figure. II. 3: Définition de l'énergie magnétique du SESE

Figure II. 4 : Système électromagnétiques à double excitation SEDE
Figure II.5 : Système électromagnétiques à double excitation
Figure II.6 : Schéma block du Système à Simple Excitation.
Figure II. 7 : simulation du SESE en alimentation sinusoïdale
Figure II.8 : simulation du SESE en alimentation non sinusoïdale
Figure II.9 : schéma block du Système à Double Excitation
Figure II.10 : Courant d'excitation
Figure II.11: Inductances L11, L22 et L12

Figure II.12: Energie emmagasinée
Figure II.13: Couples électromagnétique
Figure II.14: courants d'excitation
Figure II.15: Inductances L22.
Figure II.16: Energie emmagasinée

Figure II.17: Couple électromagnétique
Figure II.18: courants d'excitation
Figure II.19: Inductances L11

Figure II.20: Energie emmagasinée
Figure II.21: Couple électromagnétique

Sommaire

Chapitre I

Généralité Sur Les Actionneurs Electriques

1..... Généralité Sur Les Actionneurs Electriques

1..... Généralité Sur Les Actionneurs Electriques

INTRODUCTION GENERALE :

Les machines électriques tournantes, qui assurent une conversion d'énergie électromécanique, sont le cœur d'une discipline scientifique appelée jadis « électrotechnique » et, aujourd'hui, « génie électrique » en raison de l'importante évolution technologique engendrée par l'apport de disciplines adjacentes (électronique de puissance, électronique de commande analogique et numérique, automatique, etc.).

Cette révolution a entraîné la généralisation de l'actionnement électrique dans tous les domaines industriels mais aussi dans la vie courante ; elle a aussi profondément modifié la manière dont les machines sont mises en œuvre tout en leur permettant également de s'adapter à l'utilisation de nouvelles sources d'énergie. En conséquence, leur enseignement doit en tenir compte.

Le présent travail est structuré en deux chapitres : dans le premier chapitre, en présence d'un système d'électromagnétique, en fin de ce chapitre sera clôturé par une conclusion.

Dans le second chapitre nous allons détailler et numéroter de façon détaillée les deux systèmes électromagnétiques (Système à Simple Excitation et Système à Double Excitation).

Chapitre I

Généralité Sur Les Actionneurs Electriques

I. 1 Introduction

Un actionneur électrique est un dispositif électromécanique permettant la conversion d'énergie électrique en travail ou énergie mécanique. Ce processus est réversible et peut servir à produire de l'électricité :

Les machines électriques produisant de l'énergie électrique à partir d'une énergie mécanique sont appelées des génératrices, dynamos ou alternateurs suivant la technologie utilisée.

Les machines électriques produisant une énergie mécanique à partir d'une énergie électrique sont appelées des moteurs.

Toutes les machines électriques étant réversibles, la distinction moteur/générateur ne se fait que par rapport à l'usage final de la machine. Les actionneurs rotatifs produisent une énergie correspondant au produit d'un couple par un déplacement angulaire tandis que les actionneur linéaires produisent une énergie correspondant au produit d'une force par un déplacement linéaire.

La plupart des actionneurs électriques fonctionnent grâce au magnétisme, mais il existe aussi des actionneurs électrostatiques et d'autres utilisant l'effet piézoélectrique.

Dans ce chapitre, on présente des différentes machines et actionneurs utilisés dans les domaines de l'électrotechnique, ce chapitre sera clôturé par une conclusion.

I.2 Historique

En 1821, après la découverte du phénomène du lien entre électricité et magnétisme, l'électromagnétisme, par le chimiste Danois Oersted, le physicien anglais Michael Faraday construit deux appareils pour produire ce qu'il appela une « rotation électromagnétique » : le mouvement circulaire continu d'une force magnétique autour d'un fil, en fait la démonstration du premier moteur électrique, [1].



Fig. I 1 Le schéma de la roue de Barlow, [You tub]

En 1822, Peter Barlow construit ce qui peut être considéré comme le premier moteur électrique de l'histoire : la « Roue de Barlow » qui est un simple disque métallique découpé en étoile et dont les extrémités plongent dans un godet contenant du mercure qui assure le passage du courant. Elle ne produit qu'une force juste capable de la faire tourner, ne lui permettant pas d'application pratique, [1].

Le premier commutateur utilisable expérimentalement a été inventé en 1832 par William Sturgeon. Le premier moteur à courant continu fabriqué avec l'intention d'être commercialisé a été inventé par Thomas Davenport en 1834 puis breveté en 1837. Ces moteurs n'ont pas connu de développement industriel à cause du coût des batteries à l'époque, [1].

On doit la vérification pratique de la réversibilité des machines électriques au physicien italien Antonio Pacinotti en 1864, [2].

En 1869, l'inventeur Belge Zénobe Gramme rend possible la réalisation des génératrices à courant continu en imaginant le collecteur. Il améliore les premières versions archaïques d'alternateurs (1867) et devient célèbre en retrouvant le principe de l'induit en anneau de Pacinotti. En 1871, il présentera à l'académie des sciences de Paris la première génératrice industrielle de courant continu, que l'on appela machine de Gramme, [3].

En 1873, Hippolyte Fontaine, partenaire de Zénobe Gramme réalise la première application industrielle de la transmission électrique des forces. Tout en démontrant à l'occasion de l'exposition de Vienne, la réversibilité de la machine de Gramme, il présente une expérience associant dynamo et moteur à courant continu, séparés par 2 km de fils électriques. Avant cette expérience décisive, l'énergie mécanique des cours d'eau devait être utilisée sur place, car intransportable sur de longues distancesn [1].

Le premier brevet n 391968 du moteur électrique actuel, à courant alternatif, est déposé par le physicien d'origine serbe Nikola Tesla en 1887, [4].

La paternité de la machine asynchrone est controversée entre trois inventeurs : en 1887, le physicien Nikola Tesla dépose un brevet sur la machine asynchrone, puis en mai de l'année suivante cinq autres brevets. Pendant la même période Galileo Ferraris publie des traités sur les machines tournantes, avec une expérimentation en 1885, puis une théorie sur le moteur asynchrone en avril 1888. En 1889, Michail Ossipowitsch Doliwo-Dobrowolski, électricien allemand d'origine Russe, invente le premier moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écureuil qui sera construit industriellement à partir de 1891, [Wiki].

I.3 Classification des machines électriques

Les machines électriques peuvent être classées en deux familles :

- 1) Machines a courant continu
- 2) Machines a courant alternatif

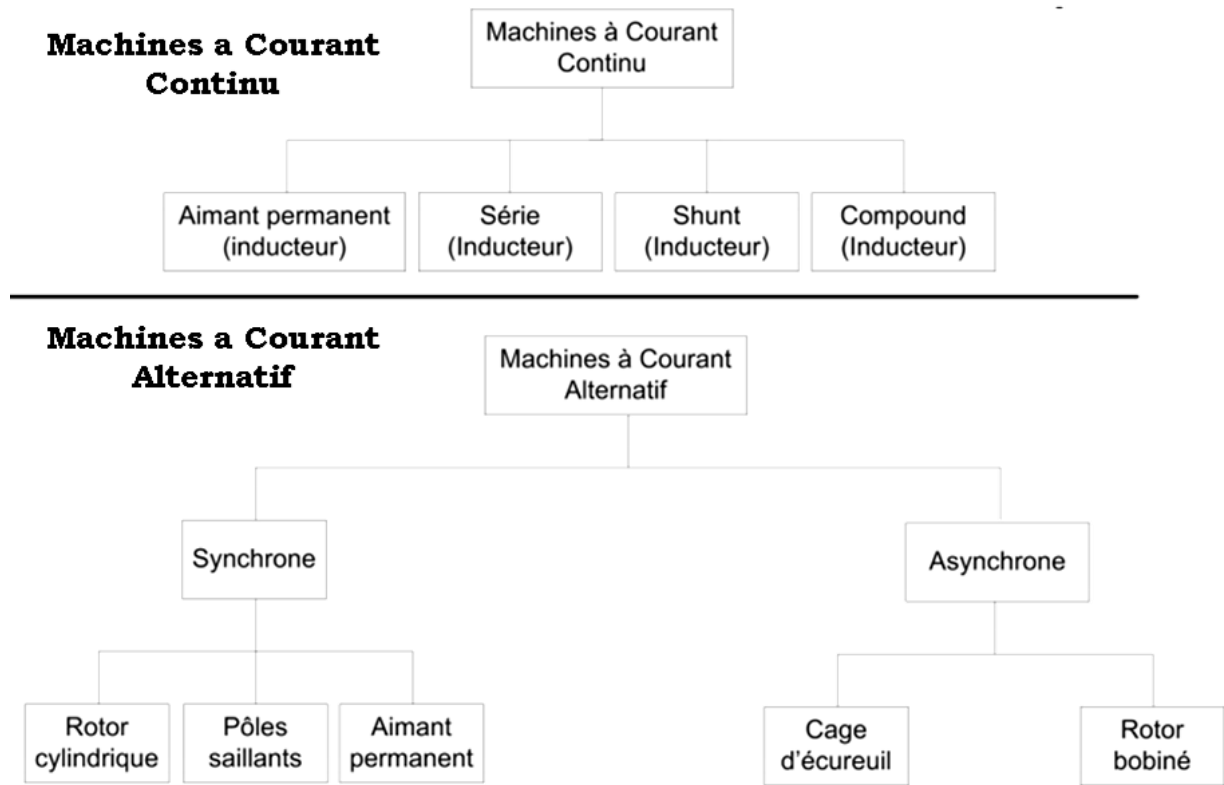


Fig. I 2 Classification des machines électriques, [3]

I-3.1. Constitution d'une machine électrique

a) **Mécaniquement**, une machine électrique est constituée par une partie fixe appelée stator et une partie mobile appelée rotor qui tourne à l'intérieur du stator ou vis versa. Entre ces deux parties est aménagé un petit intervalle d'air appelé entrefer [5]. .

b) **Du point de vue électromagnétique** : une machine électrique comporte un circuit magnétique et souvent à deux enroulements. Entre le flux (dans le circuit magnétique) et les courants (dans les circuits électriques) s'exerce une action réciproque des principes de l'électromagnétisme déjà connus, [chap_1].



Fig. I 3 Ancien moteur à courant alternatif bobiné en anneau au stator, [1]

I.4 types d'actuateur

I.4.1 Actuateur à bobine mobile

L'actuateur c'est un moteur électrique utilisé pour actionner différentes fonctions (réguler la pression d'huile, d'essence, orienter les phares, élever la parole (haut parleur...etc).

Les actuateurs sont constitués d'un circuit ferromagnétique dans lequel se trouvent un ou plusieurs d'aimants permanents et une ou plusieurs bobines. Selon l'application ce sont soit les aimants qui sont mobiles et les bobines fixes ou vice versa.

I.4.1.1 Le haut parleur

Un haut-parleur (voir Fig. I.4a), est un actuateur à bobine mobile destiné à produire des sons à partir d'un signal électrique. A la Figure I.4b on voit que, Le circuit magnétique de la haut parleur, est de présenter un moyen de faire varier le flux mutuel entre deux sources de forces magnétomotrices constituées l'une par un aimant et l'autre par une bobine [2].

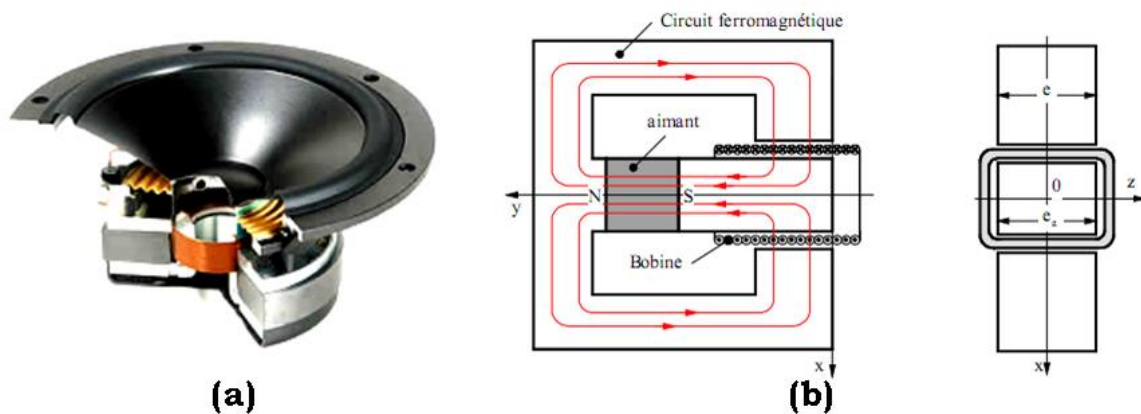


Fig. I.4 (a) Le haut parleur. (b) circuit magnétique [cours Ped]

I.4.2 Actuateur linéaire de type Voice coil

Il existe un grand nombre d'actuateurs linéaires à bobine mobile de géométries différentes. Néanmoins, à l'aide de deux géométries il est possible de mettre en évidence la production de force électrodynamique (force principale) et force réluctante (effet indésirable).

I.4.2.1 Circuit magnétique symétrique[6].

A partir de la géométrie du circuit de la Figure I.5a on peut dessiner le schéma magnétique de la Figure I.5b. On voit que le flux dans le circuit magnétique est nul en $x=0$ et maximum aux deux extrémités.. Ce type d'actuateur est donc limité en course si l'on veut un encombrement raisonnable. La partie active de la bobine se trouve dans le circuit magnétique. La partie externe de la bobine n'est donc pas productrice de force. Par contre l'ouverture de la bobine de chaque côté du

Les disques durs d'ordinateur possèdent de tels actionneurs. En pratique la culasse du stator est saturée, les flux de fuite sont donc assez importants. Il faut relever au passage que l'information sur le disque est mémorisée par orientation de dipôles magnétiques, malgré les flux de fuites, la fiabilité de ce type de stockage de données n'est pas remise en cause.

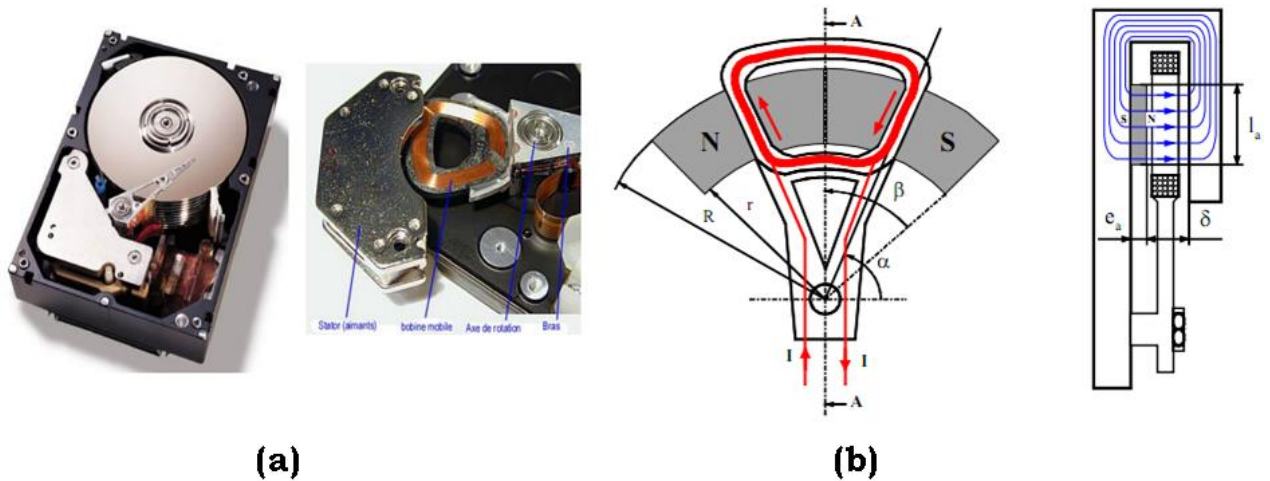


Fig. I 7 (a) disque dur d'ordinateur (b) circuit magnétique.

I.4.3.2 Application industrielle

a) Actuateur secteur à bobine mobile

Les actionneurs secteurs sont également utilisés dans des applications industrielles. La Figure I.8 illustre un tel actionneur.



Fig. I 8 Actuateur secteur

Cet actionneur a une structure identique à l'actionneur linéaire à circuit magnétique symétrique vu au §1.4.2.1.

I.4.4 Actuateur à aimants mobiles

Les actionneurs à bobine mobile présentent quelques inconvénients au niveau de la bobine. On citera les points suivants :

- mauvaise dissipation thermique car la bobine n'est en contact qu'avec de l'air.

- La bobine est auto portante, elle est donc plus difficile à fabriquer.
- Les fils d'alimentation de la bobine doivent se déplacer avec cette dernière.

Pour de petits actionneurs, il est possible de réaliser des constructions où la bobine est fixée dans le circuit magnétique (contact thermique) qui est immobile. Les aimants sont maintenus ensemble par un matériau amagnétique et non conducteur électrique (en générale de l'époxy).

I.4.4.1 Actuateur linéaire

La Figure I.9 illustre le cas d'un actionneur à aimants mobiles classique. Le flux créé par la circulation d'un courant dans les bobines (même sens pour les deux) traverse l'entrefer dans lequel se trouvent des aimants de polarités inversées.

Il se trouve donc en présence d'un actionneur présentant une caractéristique linéaire de la force en fonction du courant dans la bobine. Ce type actionneur n'est utilisable que pour des courses limitées.

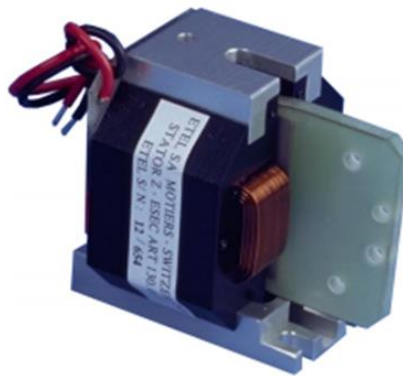


Fig. I 9 Actuateur à aimants mobiles.

I.4.4.2 Actuateur secteur[7].

Il existe également des actionneurs rotatifs donc le stator est un tore ferromagnétique comportant un enroulement (une seule phase). Ce type d'actionneur peut être unipolaire (une paire d'aimants au rotor) ou multipolaire (plusieurs paires d'aimants au rotor). L'enroulement toroïdal statorique est composé d'un bobinage segmenté, dont le nombre de segments est égal au nombre d'aimants au rotor. Le sens de l'enroulement change pour chaque segment successif. La variation du flux mutuel aimant – enroulement doit être la plus linéaire en fonction de la position angulaire relative rotor – stator (angle entre axes magnétiques statorique et rotorique). Dans ces conditions, le couple est constant sur un angle donné.

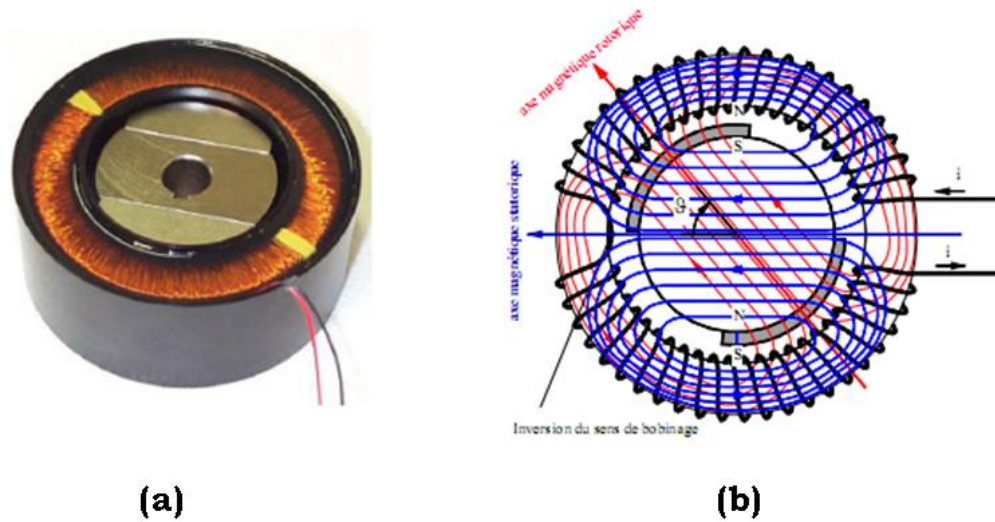


Fig. I 10 Actuateur rotatif à plage angulaire limitée

La Figure I.10 illustre le cas d'un actuateur rotatif à plage angulaire limitée comportant une paire d'aimants au rotor. Dans cette configuration, la plage angulaire est limitée à 180° (cas théorique).

Ci-dessous quelques exemples d'actuateurs à plage angulaire limitée.

I.7 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de donner de différents types de machines et actuateurs et leurs constitutions ont été décrits, adaptés à un système électromagnétique ont été présentés, deux familles le système électromagnétique sont présentées: machines électriques (MAS, MS et MCC) et actuateur.

De ce chapitre qui suit, on va étudier deux structures; Allongées à simple excitation, et à double excitation.

Chapitre II

Modélisation et Simulation des Actionneurs Electriques

II. 1 Introduction

Le but de ce chapitre est de donner les justifications essentielles pour comprendre le principe de la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique. En effet l'énergie électrique est une forme secondaire d'énergie qui ne présente que fort peu d'utilisation directe. En revanche, elle est une forme intermédiaire très intéressante par sa facilité de transport, sa souplesse et ses possibilités de conversion. Parmi toutes les possibilités de transformation, la forme électromécanique joue un rôle particulièrement important. Il faut savoir que 95% de la production d'énergie électrique résulte d'une conversion mécanique – électrique.

La conversion électromécanique joue un rôle important dans les domaines aussi variés que la traction électrique (transports publics, voitures électriques et hybrides), les machines outils utilisés aussi bien pour les machines d'emballages, la production alimentaire, la microélectronique, ...,ou encore la domotique.

Ce chapitre est composé de deux parties :

Une première partie est consacrée à la modélisation de la partie mécanique de deux système électromécanique (Système à Simple Excitation et Système à Double Excitation) la deuxième partie est consacrée à la simulation de cesystème ce chapitre seraterminé par un conclusion.

II. 1 Modélisation des Actionneurs Electriques

II.1.1 Propriétés générales de la conversion électromécanique :

La conversion électromécanique telle qu'elle sera vue dans ce chapitre, présente des systèmes réversibles, c'est-à-dire capables de convertir aussi bien l'énergie électrique en énergie mécanique que le contraire.

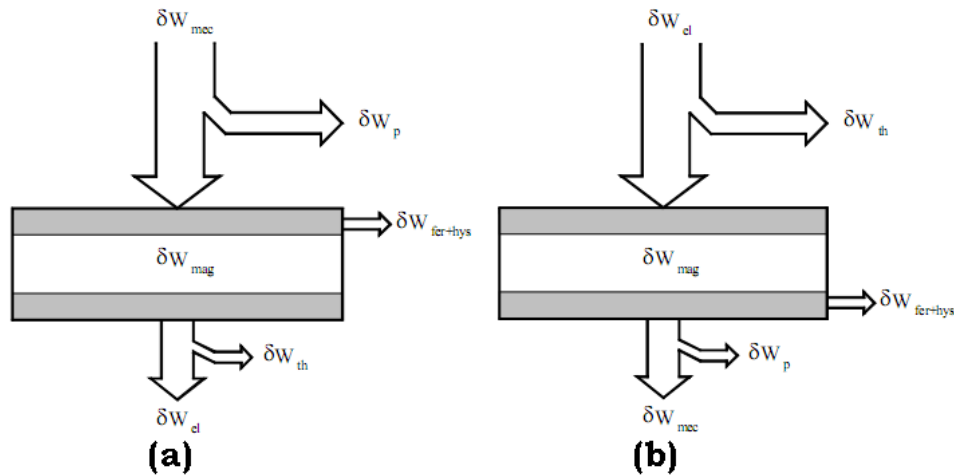


Fig. II 1. Bilan de la conversion d'énergie électromécanique

(b) Conversion Energie électrique- mécanique (a) Conversion Energie mécanique-électrique

II.1.1.1 Caractéristiques de la conversion électromécanique :

L'étude de la conversion électromécanique est basée sur le principe de conservation de l'énergie. Celui-ci fait appel à une forme intermédiaire d'énergie, il s'agit de l'énergie électromagnétique ou de sa forme homologue, la co-énergie magnétique. La force ou le couple électromécanique résulte de trois formes possibles d'interactions :

- l'interaction entre deux courants,
- l'interaction entre un courant et un circuit ferromagnétique,
- l'interaction entre un aimant et un courant ou un circuit ferromagnétique.

II. 1. 2 Système électromagnétiques à simple excitation SESE

II. 1.2. 1 Définition

La figure ci dessous présente un relais à piston mobile en translation, d'épaisseur de l'entrefer vaut $g = 2 \text{ mm}$, de nombre de tours vaut $N = 1000$, et $d = 0.15 \text{ m}$, $l = 0.1 \text{ m}$,

L'énergie stockée est variée en fonction de la position du piston ($0 < x < d$) pour un courant de $i = 10$ A.

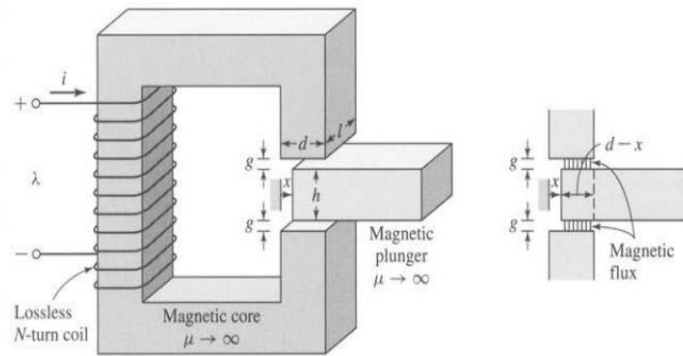


Fig. II 2 .Système électromagnétiques à Simple excitation SESE.

Le relais est considéré comme un système linéaire est caractérisé par de saturation ; la caractéristique $\Phi(i)$, pour une position donnée de la partie mobile, est une droite passant par l'origine (figure II.3).

Supposer linéaire un système électromagnétique dont le flux a une grande partie de sont trajet dans le fer revient a supposer infinie la perméabilité du fer ou a négliger les autres réluctances celle des entrefers.

II. 1.2. 2 Expression de la conservation d'énergie du SESE

II. 1.2. 2.1 Inductance – Energie –Co-énergie

Puis $\Phi(i)$ est linéaire, on peut écrire :

$$\Phi = Li \quad (\text{II-1})$$

Où, L inductance propre de la bobine, qui peut dépendre de x ou de i , est indépendante du courant i . De par leurs définition mêmes l'énergie et la co-énergie sont égales.

La Figure II.2 illustre le cas d'un système à une seule source électromagnétique (un seul enroulement $k=1$).

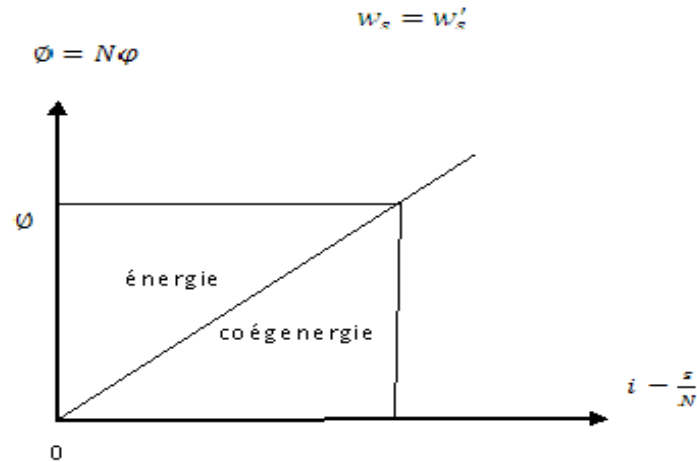


Fig. II 3. Définition de l'énergie magnétique du SESE

Elles ont pour valeur:

$$w_s = w'_s = \int_0^\phi i d\phi = \int_0^\phi \frac{\phi}{L} d\phi = \frac{1}{2} \frac{\phi^2}{L} = \frac{1}{2} \phi i = \frac{1}{2} L i^2 \quad (\text{II-2})$$

$$w_s = w'_s = \frac{1}{2} L (x \text{ ou } \theta) i^2 \quad (\text{II-3})$$

II. 1. 2. 2.2 Force ou couple

Pour un système en translation, la force est donnée par

$$f_e = \frac{\partial w'_s}{\partial x} = \frac{\delta}{\delta x} \left(\frac{1}{2} L i^2 \right) \text{ à } i \text{ cst} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\delta L}{\delta x} \quad (\text{II-4})$$

Puisque L n'est fonction que de x, la dérivée partielle se réduit à la dérivée ordinaire

$$f_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dx} \quad (\text{II-5})$$

De même pour le couple d'un système en rotation

$$T_e = \frac{\partial w'_s}{\partial \theta} = \frac{\delta}{\delta \theta} \left(\frac{1}{2} L i^2 \right) \text{ à } i \text{ cst} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\delta L}{\delta \theta} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (\text{II-6})$$

$$f_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dx} ; T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (\text{II-7})$$

. Remarques

- Si τ est la perméance, constante à x ou θ donné, du trajet du flux ϕ traversant chacune des N spires du bobinage.

$$\phi = \tau \xi = \tau N i$$

$$\phi = N \phi = N^2 \tau i \quad (\text{II-8})$$

$$L = N^2 \tau$$

D'où:

$$\tau = \frac{1}{\mathfrak{R}} : \text{Reluctance}$$

- La perméance du trajet total du flux ϕ se réduit a celle des ses entrefers puisqu'on suppose infinie la perméance des portions dans le fer de ce ce trajet .

S'il ya un entrefer de longueur l , de section S , donc de volume Sl , l'énergie emmagasinée peut s'écrire

$$w_s = \frac{1}{2} \phi i = \frac{1}{2} \phi \xi = \frac{1}{2} \frac{\phi^2}{\tau} = \frac{1}{2} \frac{B^2 S l}{\mu_0} = \frac{1}{2} \frac{B^2 S l}{\mu_0} \quad (\text{II-9})$$

En désignant par B l'induction et par μ_0 la perméabilité du vide.

La densité d'énergie dans l'entrefer est

$$\frac{w_s}{Sl} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} \quad (\text{II-10})$$

II. 1. 3 Système électromagnétiques à double excitation SEDE

La figure II.3 schématise un convertisseur électromagnétique a double excitation, a une seule partie mobile, c'est a dire a deux entrées (ou sorties) électriques, a une sortie (ou entrée) mécanique.

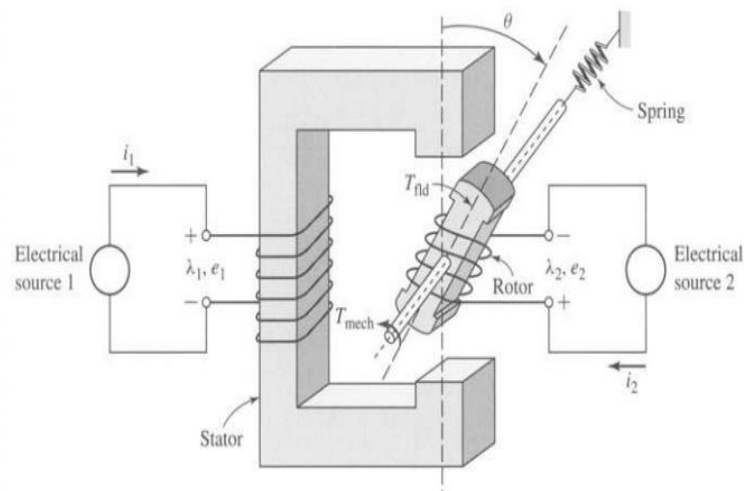


Fig. II 4. Système électromagnétiques à double excitation SEDE

Le circuit électrique 1 parcouru par le courant i_1 est traversé par un flux total ϕ_1 correspondant à la tension e_1 . on a rapporté ses pertes dans la source à laquelle il est réuni.

On a procédé de même pour le circuit électrique 2.

Les pertes mécaniques du convertisseur et la variation de son énergie cinétique sont groupées avec l'énergie mécanique utile fournie au récepteur.

De sorte que le convertisseur électromagnétique conservatif emmagasine ou transforme en énergie mécanique toute l'énergie électrique qu'il reçoit.

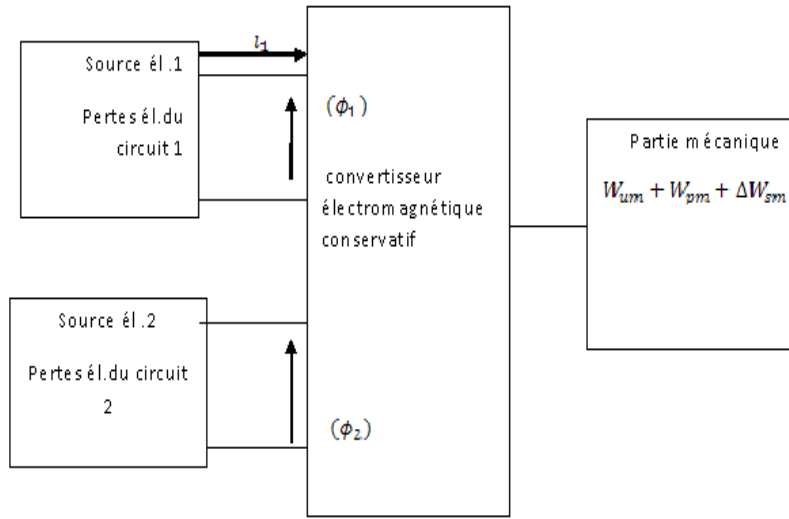


Fig. II 5. Système électromagnétiques à double excitation

II. 1.3.1 Cas général

La conservation de l'énergie pendant l'intervalle de temps dt s'écrit

$$dW_e = dW_s + dW_m \quad (\text{II-11})$$

Ou,

$$dW_e = e_1 i_1 dt + e_2 i_2 dt = \frac{d\phi_1}{dt} i_1 dt + \frac{d\phi_2}{dt} i_2 dt = i_1 d\phi_1 + i_2 d\phi_2 \quad (\text{II-12})$$

Energie, courants et flux sont donc liés par

$$dW_e = i_1 d\phi_1 + i_2 d\phi_2 = dW_s + dW_m \quad (\text{II-13})$$

II. 1. 3.2 Energie et co-énergie emmagasinées

- Pour calculer l'énergie emmagasinée on suppose la partie mobile l'immobilisée ($d\theta = 0$) ; il n'y a pas de travail mécanique effectué, la sorte que l'équation (II.11) se réduit à

$$dW_s = i_1 d\phi_1 + i_2 d\phi_2 \quad (\text{II-14})$$

L'énergie emmagasinée dans champ magnétique pour amener les flux de zéro à leurs valeurs est

$$W_s = \int_{(0,0)}^{(\phi_1, \phi_2)} (i_1 d\phi_1 + i_2 d\phi_2) \quad (\text{II-15})$$

- La co-énergie W'_s étant définie par

$$W_s + W'_s = i_1 \phi_1 + i_2 \phi_2 \quad (\text{II-16})$$

L'obtiennent différentiant

$$dW'_s = d(i_1 \phi_1 + i_2 \phi_2) - dW_s \quad (\text{II-17})$$

$$= (i_1 d\phi_1 + \phi_1 di_1 + i_2 d\phi_2 + \phi_2 di_2) - (i_1 d\phi_1 + i_2 d\phi_2) \\ = \phi_1 di_1 + \phi_2 di_2 \quad (\text{II-18})$$

D'où la co-énergie emmagasinée pour passer de l'état caractérisé par (0,0) à celui caractérisé par (i_1, i_2) :

$$W'_s = \int_{(0,0)}^{(i_1, i_2)} (\phi_1 di_1 + \phi_2 di_2) \quad (\text{II-19})$$

- On peut généraliser au cas des systèmes à n excitations. Les excitations de l'énergie et de la coénergie deviennent

$$\int_{(0;0;\dots;0)}^{(\phi_1;\phi_2;\dots;\phi_n)} \sum_{k=1}^n i_k d\phi_k ; \quad W'_s = \int_{(0;0;\dots;0)}^{(i_1;i_2;\dots;i_n)} \sum_{k=1}^n \phi_k di_k \quad (\text{II-20})$$

II. 1. 3.3 Détermination de la force (ou du couple) électromagnétique

Considérons par exemple, un convertisseur électromagnétique à double excitation en rotation.

La travail du couple électromagnétique pour une rotation $d\theta$ est:

$$dW_m = \tau_e d\theta \quad (\text{II-21})$$

la rotation (II.19) permet d'écrire:

$$dW_s = i_1 d\theta_1 + i_2 d\theta_2 - \tau_e d\theta \quad (\text{II-22})$$

L'énergie W_s étant une fonction des variables θ_1 , θ_2 et θ , dW_s peut également s'écrire:

$$dW_s = \frac{\delta W_s}{\delta \theta_1} d\theta_1 + \frac{\delta W_s}{\delta \theta_2} d\theta_2 + \frac{\delta W_s}{\delta \theta} d\theta \quad (\text{II-23})$$

l'égalité des deux formes différentielles donne

$$\tau_e = - \frac{\delta w_s(\theta_1, \theta_2, \theta)}{\delta \theta} \quad (\text{II- 24})$$

$$e_{i_1} = - \frac{\delta w_s(\theta_1, \theta_2, \theta)}{\delta \theta_1}, i_2 = - \frac{\delta w_s(\theta_1, \theta_2, \theta)}{\delta \theta_2} \quad (\text{II.25})$$

- On peut également déterminer le couple à partir de la coénergier.

Puisque:

$$W_s + W'_s = i_1 \theta_1 + i_2 \theta_2 \quad (\text{II.26})$$

$$dW'_s = d(i_1 \theta_1 + i_2 \theta_2) - dW_s$$

$$= (i_1 d\theta_1 + \theta_1 di_1 + i_2 d\theta_2 + \theta_2 di_2) - (i_1 d\theta_1 + i_2 d\theta_2 - \tau_e d\theta)$$

$$= \theta_1 di_1 + \theta_2 di_2 + \tau_e d\theta \quad (\text{II.27})$$

la coénergier étant une fonction de θ_1 , θ_2 et θ ,

$$dW'_s = \frac{\delta W'_s}{\delta i_1} di_1 + \frac{\delta W'_s}{\delta i_2} di_2 + \frac{\delta W'_s}{\delta \theta} d\theta \quad (\text{II.28})$$

la comparaison des des deux expressions de dW'_s donne :

$$\tau_e = \frac{\delta w'_s(i_1, i_2, \theta)}{\delta \theta} \quad (\text{II.29})$$

$$\theta_1 = \frac{\delta w'_s(i_1, i_2, \theta)}{\delta i_1}, \theta_2 = \frac{\delta w'_s(i_1, i_2, \theta)}{\delta i_2} \quad (\text{II.30})$$

- Ces résultats peuvent se généraliser. Pour une système à n excitation :

$$i_k = \frac{\delta w_s(\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n, \theta)}{\delta \phi_k}, \quad \phi_k = \frac{\delta w'_s(i_1, i_2, \dots, i_n, \theta)}{\delta i_k} \quad (\text{II.31})$$

Avec $k = 1, 2, 3, \dots, n$

$$\tau_e = - \frac{\delta w_s(\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n, \theta)}{\delta \theta} = \frac{\delta w'_s(i_1, i_2, \dots, i_n, \theta)}{\delta \theta} \quad (\text{II.32})$$

Pour un système en translation, on remplace ϕ par x et la force électromagnétique est donnée le couple.

II. 1.3.2 Cas des systèmes linéaires

Pour les systèmes linéaires les flux totaux ϕ et les courants i sont liés par des coefficients de proportionnalité, les inductances. Les inductances ne sont fonction que de la position (ϕ ou x) de la partie mobile.

Ainsi pour un système à double excitation, on peut écrire

$$\begin{cases} \phi_1 = L_1 i_1 + M_{12} i_2 \\ \phi_2 = L_2 i_2 + M_{21} i_1 \end{cases}, \text{ avec } M_{12} = M_{21} = M \quad (\text{II.33})$$

II. 1.3.2.1 Expressions de l'énergie et de la co-énergie

- Pour l'énergie, $dW_s = i_1 d\phi_1 + i_2 d\phi_2$. En résolvant le système (II.33) par rapport aux courants, on obtient :

$$i_1 = \frac{L_1 \phi_1 - M \phi_2}{L_1 L_2 - M^2}; \quad i_2 = \frac{-M \phi_1 + L_2 \phi_2}{L_1 L_2 - M^2} \quad (\text{II.34})$$

$$\text{Ou } i_1 = p_{11} \phi_1 + p_{12} \phi_2; \quad i_2 = p_{21} \phi_1 + p_{22} \phi_2 \quad (\text{II.35})$$

Avec:

dW_S peut donc s' écrire:

$$dW_S = (p_{11}\phi_1 + p_{12}\phi_2) d\phi_1 + (p_{12}\phi_1 + p_{22}\phi_2) d\phi_2 \quad (II.36)$$

$$\begin{aligned} &= p_{11}\phi_1 d\phi_1 + p_{12} (\phi_2 d\phi_1 + \phi_1 d\phi_2) + p_{22}\phi_2 d\phi_2 \\ &= d\left(\frac{1}{2} p_{11}\phi_1^2 + p_{12}\phi_1\phi_2 + \frac{1}{2} p_{22}\phi_2^2\right) \end{aligned} \quad (II.37)$$

L'énergie emmagasinée dans le champ magnétique pour faire passer un système linéaire de l'état où les flux sont nuls à l'état caractérisé par (ϕ_1, ϕ_2) est donc :

$$W_s = \frac{1}{2} p_{11}\phi_1^2 + p_{12}\phi_1\phi_2 + \frac{1}{2} p_{22}\phi_2^2 \quad (II.38)$$

- La variation de co-énergie dW'_S , égale $\phi_1 di_1 + \phi_2 di_2$, s'écrit

$$\begin{aligned} dW'_S &= (L_{11}i_1 + M_{12}) di_1 + (L_{22}i_2 + M_{12}) di_2 \\ &= L_{11}i_1 di_1 + M_{12}(i_1 di_2 + i_2 di_1) + L_{22}i_2 di_2 \\ &= d\left(\frac{1}{2}L_{11}i_1^2 + M_{12}i_1i_2 + \frac{1}{2}L_{22}i_2^2\right) \end{aligned} \quad (II.39)$$

La coénergie emmagasinée pour passer de l'état caractérisé par (II.39) à celui caractérisé par (i_1, i_2) a pour valeur :

$$W'_S = \frac{1}{2} L_{11}i_1^2 + M_{12}i_1i_2 + \frac{1}{2} L_{22}i_2^2 \quad (II.40)$$

- Les expressions (II.37)et(II.38), qui sont des formes quadratiques, peuvent se mettre sous la forme matricielle suivante

$$W_s = \frac{1}{2} [\phi_1 \phi_2] \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix} \quad (II.41)$$

$$W'_s = \frac{1}{2} [i_1 i_2] \begin{bmatrix} L_{11} & M_{12} \\ M_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad (II.42)$$

Ces expressions peuvent être généralisées. Pour un système à n excitations, on obtiendrait d'une manière analogue

$$W_s = \frac{1}{2} [\phi]_t [p] [\phi] \quad (II.43)$$

$$W'_s = \frac{1}{2} [i]_t [L] [i] \quad (II.44)$$

Avec :

$$[\phi] = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \dots \\ \phi_n \end{bmatrix}, [i] = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \dots \\ i_n \end{bmatrix}, [p] = \begin{bmatrix} p_{11} p_{12} p_{1n} \\ p_{21} p_{22} p_{2n} \\ \dots \dots \dots \\ p_{n1} p_{n2} p_{nn} \end{bmatrix}; [L] = \begin{bmatrix} L_1 M_{12} \dots M_{1n} \\ M_{21} L_2 \dots M_{2n} \\ \dots \dots \dots \\ M_{n1} M_{n2} \dots L_{nn} \end{bmatrix} \quad (\text{II.45})$$

II. 1.3.2.2 Expression du couple

- Pour un système en rotation, (II.44) et (II.45), on déduit :

$$\tau_e = \frac{\delta W'_s}{\delta \theta} = \frac{1}{2} \left(i_1^2 \frac{\delta L_1}{\delta \theta} + 2 i_1 i_2 \frac{\delta M}{\delta \theta} + i_2^2 \frac{\delta L_2}{\delta \theta} \right) \quad (\text{II.46})$$

Pour un système en rotation, à n excitations, en partant de la forme matricielle de W'_s , on obtient de même.

$$\tau_e = \frac{1}{2} [i]_t \left\{ \frac{\delta}{\delta \theta} [L] \right\} [i] \quad (\text{II.47})$$

II.2. Simulation des Actionneurs Electrique

II.2.1 Simulation du SESE

La modélisation du SESE, que nous avons proposé a été implantée dans l'environnement MATLAB Simulink.

La figure II.6 présente le schémablock du SESE,

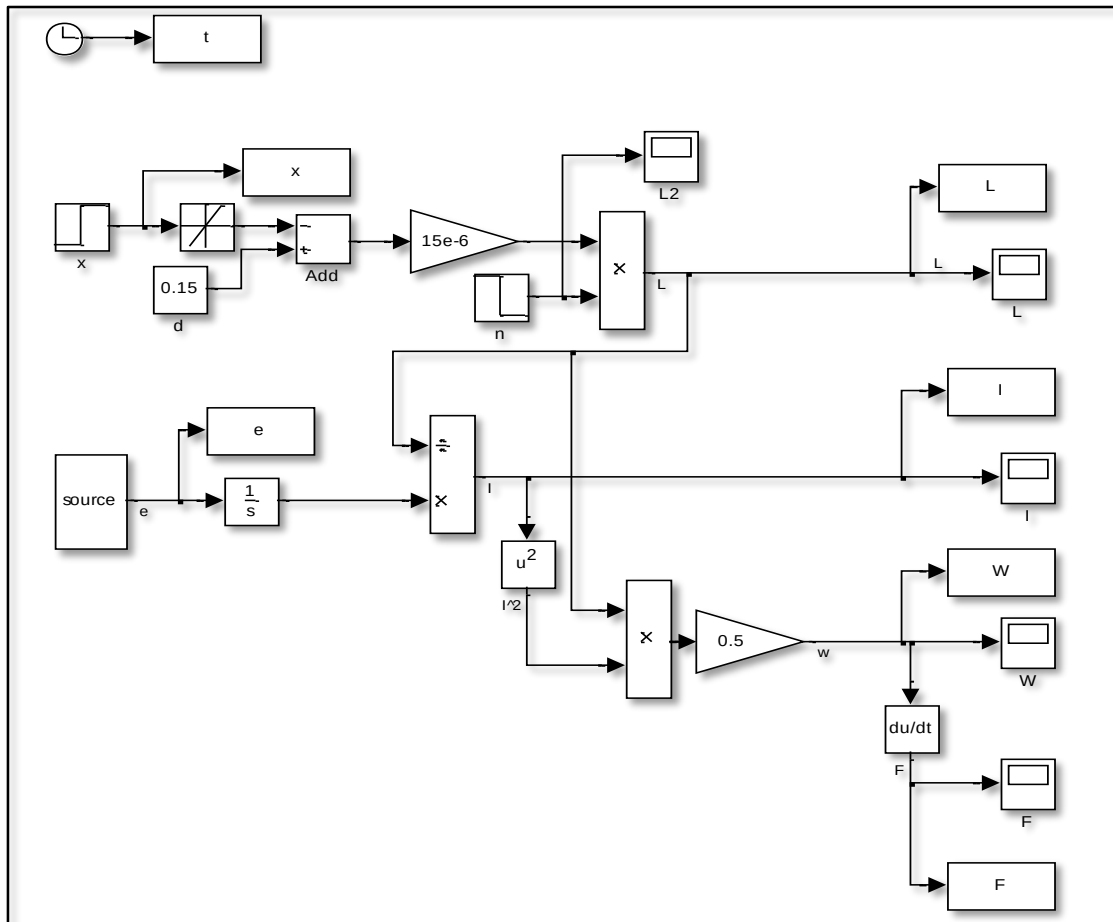


Fig. II 6.Schéma block du Système à Simple Excitation.

II.2.2 Résultats de simulation du SESE

Ce paragraphe va permettre d'analyser les résultats obtenus par simulation, utilisé avec le modèle du SESE. Nous avons donc soumis ce système à de mouvement lent afin d'observer le comportement du système, et on a aussi fait un court circuit partiel en diminuant le nombre de spire [1000 → 750].

Les figures ci-dessous montrent les performances du SESE.

II.2.2.1 Simulation en alimentation sinusoïdal

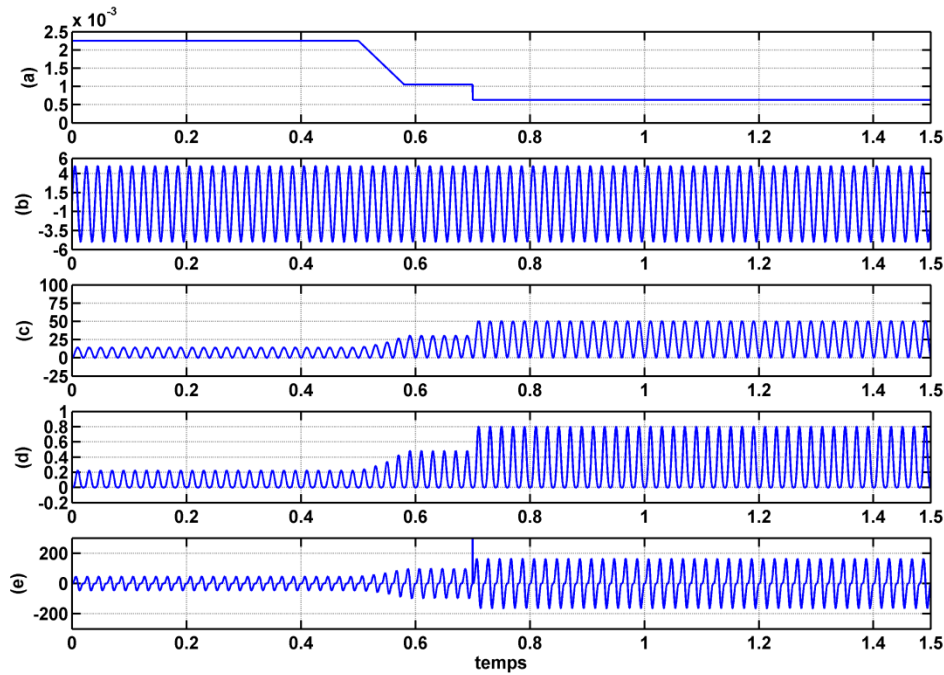


Fig. II.7 simulation du SESE en alimentation sinusoïdale.

(a) Inductance (H), (b) tension (V), (c) Courant (A), (d) Enrgie emmagasinée (W), (e) Force electromagnétique (Nm).

II.2.2.2 Simulation en alimentation non sinusoïdal

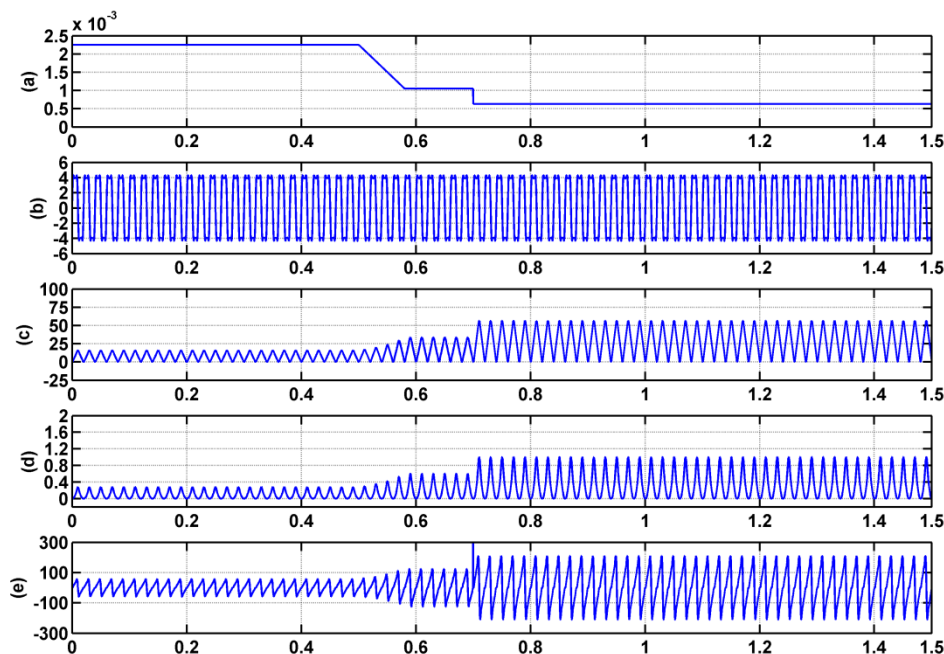


Fig. II.8 simulation du SESE en alimentation non sinusoïdale.

(a) Inductance (H), (b) tension (V), (c) Courant (A), (d) Enrgie emmagasinée (W), (e) Force electromagnétique (Nm).

II.2.2.3 Interprétation des résultats

Les résultats de simulation présentent les différentes courbes obtenues par la simulation du SESE en imposant un mouvement lent de l'instant 0.5s à l'instant 0.58s. Aussi, ee faisant un court circuit à l'instant 0.7s.

II.2.3 Simulation du SEDE

Ce paragraphe va permettre d'analyser les résultats obtenus par simulation, utilisé avec le modèle du SESE. Nous avons donc soumis ce système à de mouvement lent afin d'observer le comportement du système, et on a aussi fait un court circuit partial en diminuant le nombre de spire [1000 → 750].

Les figures ci-dessous montrent les performances du SEDE.

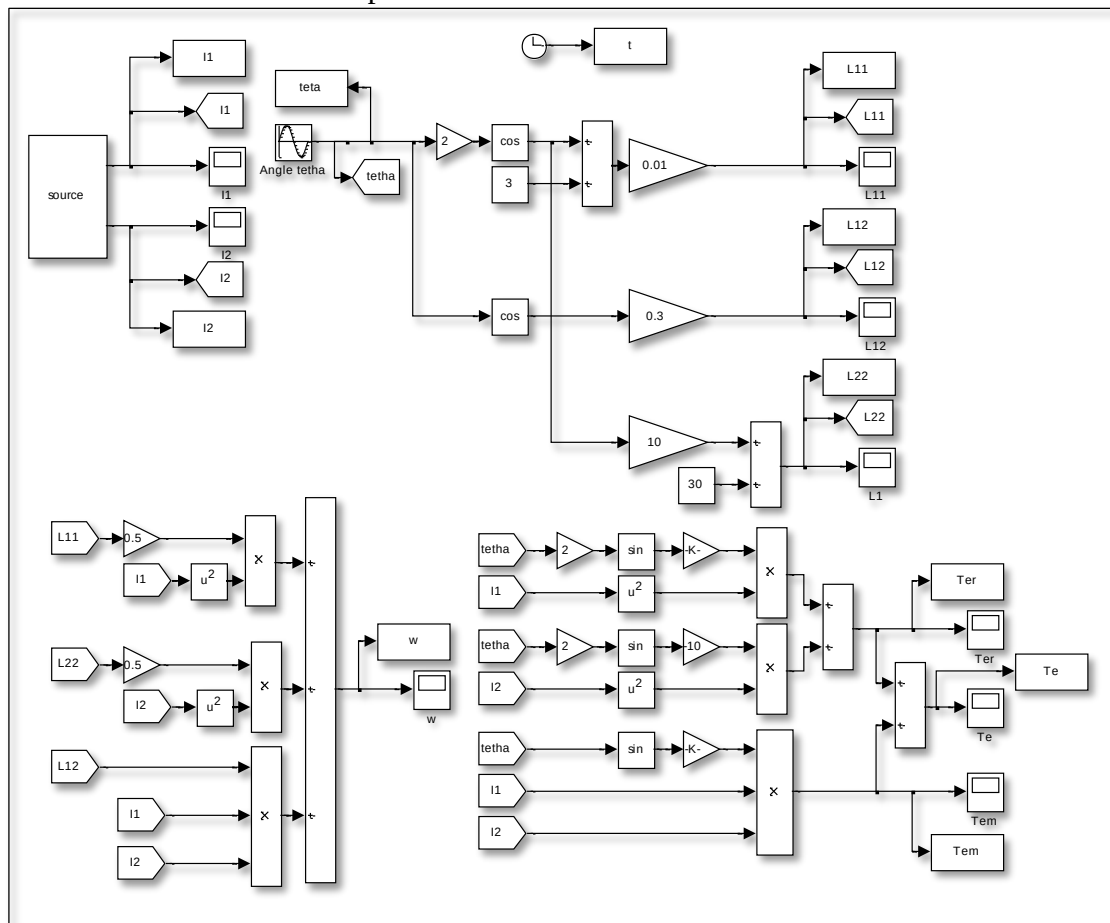


Fig. II.9 schéma block du Système à Double Excitation

II.2.3.1 Résultats de simulation du SESE

a) Deux enroulements alimentés ($I_1=0.8$ A, $I_2=0.01$ A)

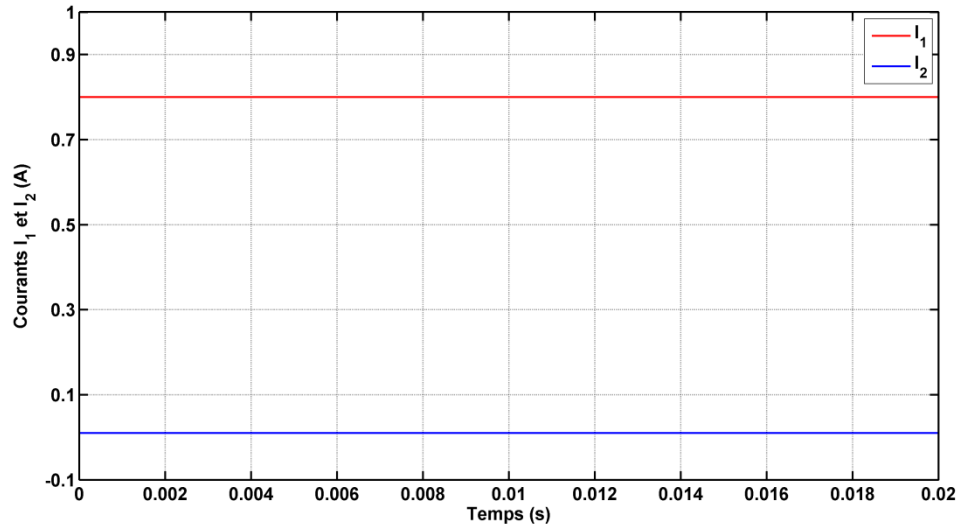


Fig. II.10 Courant d'excitation

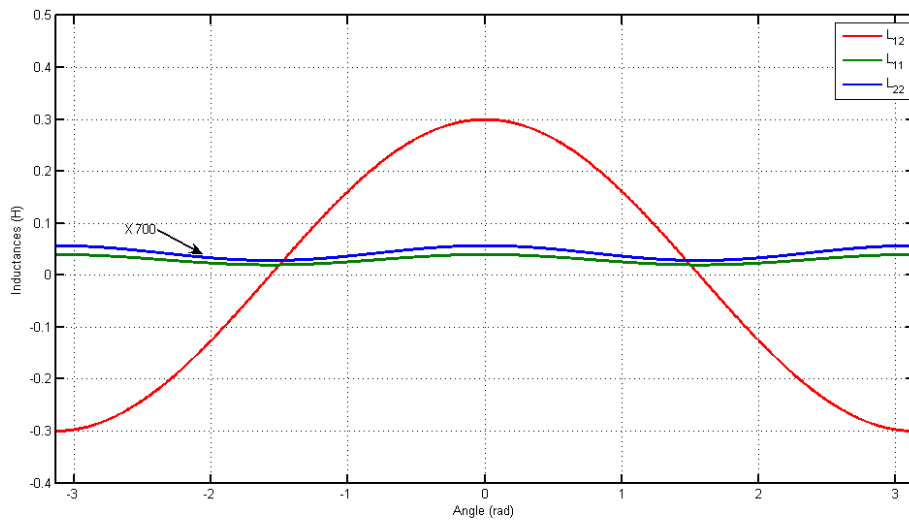


Fig. II.11 Inductances L_{11} , L_{22} et L_{12}

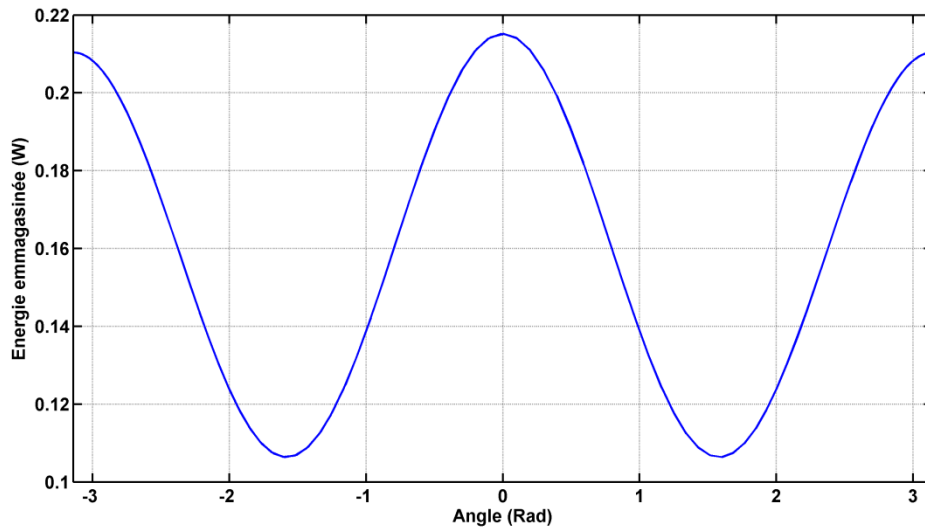


Fig. II.12 Energie emmagasinée.

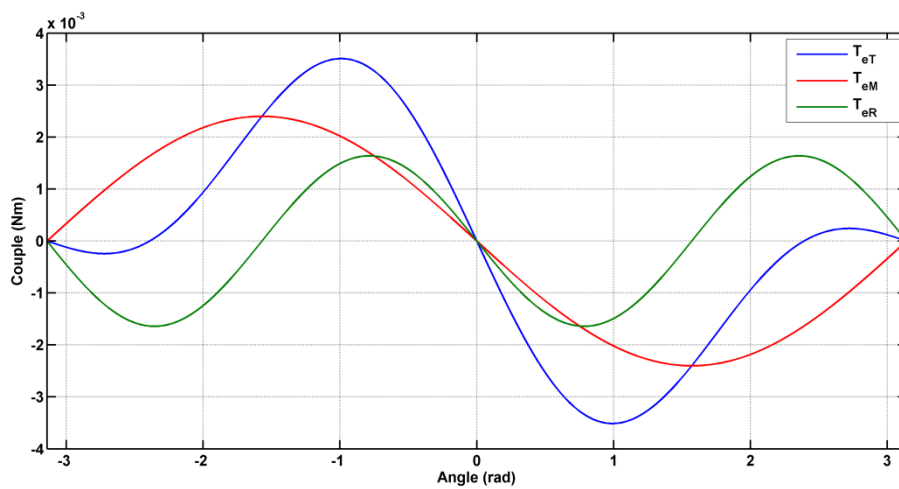


Fig. II.13 Couples électromagnétique.

b) Un seul enroulement alimenté ($I_1=0$, $I_2=0.01$ A)

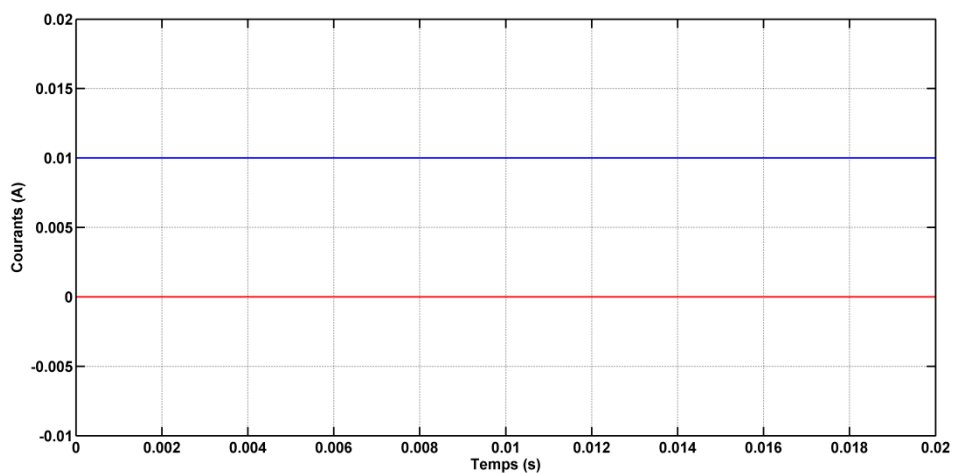
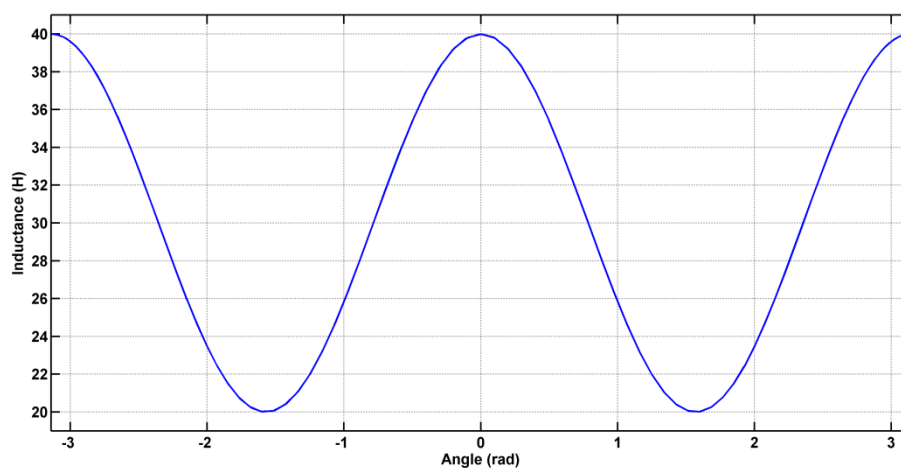
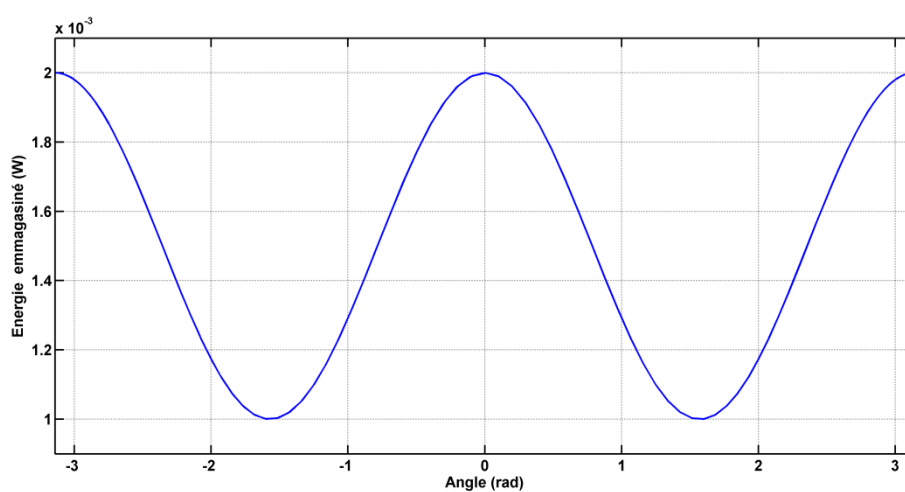
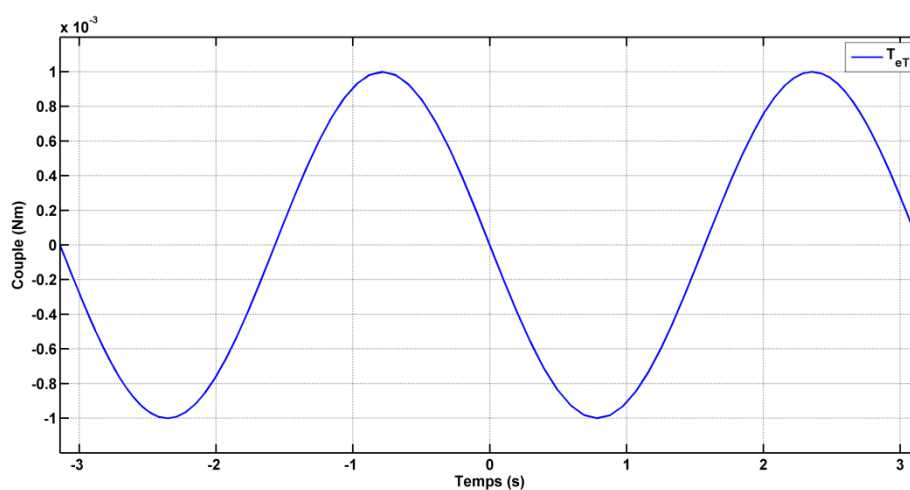


Fig. II. 14 courants d'excitation.

**Fig. II.15 Inductances L22.****Fig. II. 16 Energie emmagasinée.****Fig. II. 17 Couple électromagnétique.**

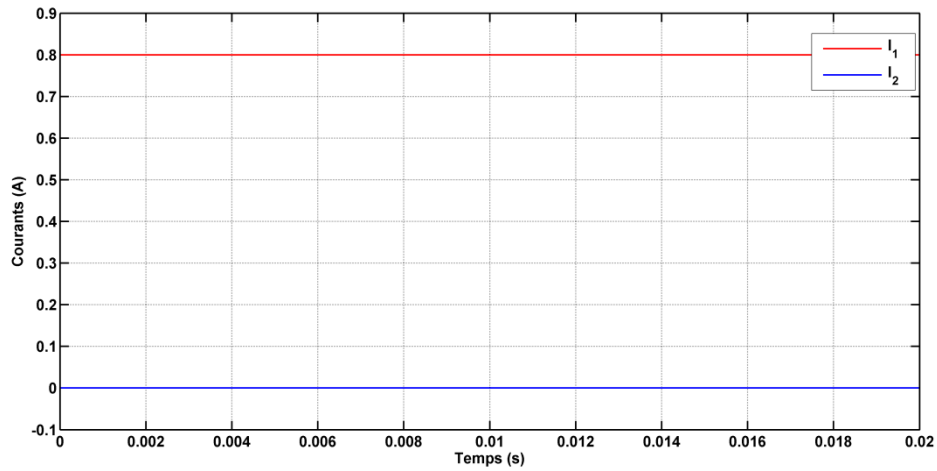
c) Un seul enroulement alimenté ($I_1=0.8$, $I_2=0$)

Fig. II.18 courants d'excitation.

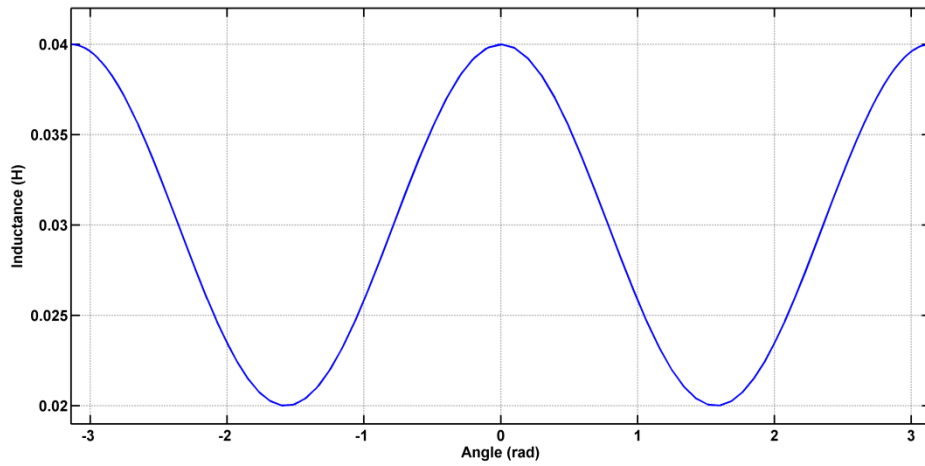
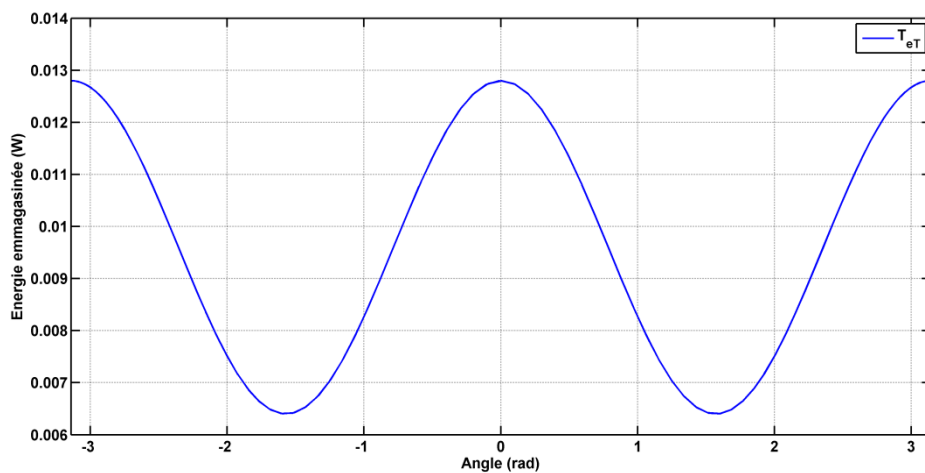
Fig. II.19 Inductances L_{11} 

Fig. II.20 Energie emmagasinée.

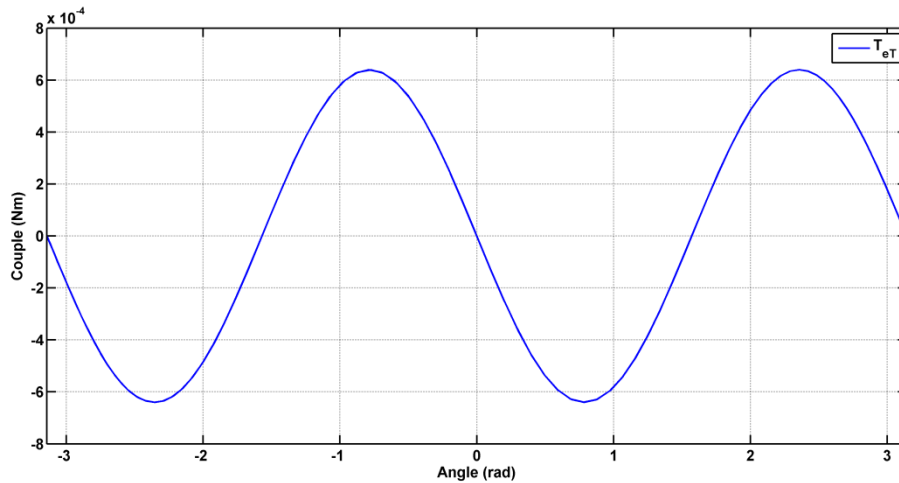


Fig. II. 21 Couple électromagnétique.

II.2.3.1 Interprétation des résultats

II.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit deux systèmes électromagnétiques, l'un à simple excitation et l'autre à double excitation, deux parties essentielles se constituent ce chapitre, la première représente la modélisation détaillée de chacun des deux systèmes, Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons fait la simulation de deux systèmes. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi, dont la complexité a été réduite.

Bibliographie

1 - https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_%C3%A9lectrique

2.Ch Harel, Machines électriques et essais de Machines, Société française des électriciens – École supérieure d'électricité, Paris, 1960.

3.Okoro, Ph.D.1*, M.U. Agu, Ph.D.1, and E. Chinkuni, Ph.D. Basic Principles and Functions of Electrical Machines . The Pacific Journal of Science and Technology Volume 7, Number 1, mai 2006

4.A. Fouillé, Électrotechnique à l'usage des ingénieurs. T.2, Machines électriques, Dunod, 1969.

5.Mikhail Kostenko et Ludvik Piotrovski, Machines électriques, tomes I et II, Éditions de Moscou (Mir), 1969 (réédité en 1979), 1348 p.

6.M. Poloujadoff, Conversions électromécaniques : maîtrise d'EEA et C3 - Électrotechnique, Dunod, Paris, 1969.

7.B. Saint-Jean, Électrotechnique et Machines électriques, Lidec - Eyrolles, 1976, 373 p. (ISBN 0-7762-5651-3).