

### **III.1 Introduction**

Dans le contexte de la traction électrique, le rendement énergétique de la machine électrique est primordial. En effet, la source d'énergie étant limitée, la consommation énergétique doit être réduite autant que possible. Ainsi pour une machine donnée, l'obtention du couple désiré par l'utilisateur peut être obtenu pour différents états magnétiques du stator et du rotor ou par l'utilisation de nouveaux matériaux de construction des moteurs standard.

La recherche des meilleures référence. à appliquer à la machine électrique réduisant les pertes. Afin d'élaborer des stratégie de commande optimisant le rendement, diverses démarche sont possibles [1].

- L'optimisation en ligne
- L'utilisation de cartographique
- Calculs algébriques directs

On peut aussi selon. [7]. Classe les approches permettant l'optimisation énergétique comme suit:

- L'approche heuristique
- L'approche numérique
- L'approche analytique

### III.2 Optimisation du rendement des machines alternatives

L'optimisation du rendement des machines électriques a fait l'objet de nombreuses études et nous allons tenter d'en dégager les grandes lignes.

- **L'optimisation en ligne** : les pertes de la machine électrique sont minimisées par une méthode numérique en temps réel.

Cette approche s'effectue en minimisant la puissance absorbée. plusieurs méthodes peuvent s'appliquer à la machine.

La méthodologie pour les algorithmes de recherche de la puissance d'entrée minimale est de décroître le flux du moteur comme une fonction de la puissance absorbée jusqu'à ce que le flux optimal minimise les pertes soit atteint titre d'exemple, on cite l'algorithme de rosenbrock, la méthode proportionnelle, l'algorithme de gradient, l'algorithme de fibonacci ou bien l'application de la logique floue. [7].

Certains auteurs proposent un algorithme de recherche adaptatif toujours basé sur la minimisation de la puissance d'entrée. Cette approche permet de réduire les consignes optimales.

En conclusion, cette approche permet de déduire les consignes optimal sans la nécessité de connaître les paramètres de la machine.

- **L'utilisation de catographie**: les triplets de courants minimisant les pertes du groupe sont calculés hors ligne ou bien ils sont déduits de l'expérience. En suite les valeurs optimales des courants sont insérés dans des catographies de mémoire.

Les catographies sont des zones mémoire où les triplets permettant d'optimiser le rendement. Les triplets optimaux peuvent être déduits de plusieurs manières:

- Les triplets sont déduits de l'expérience.
- les triplets sont préalablement calculés par une méthode d'optimisation déterministe
- les triplets sont déduits d'une approche algébrique directe

- **Calculs algébrique directs**: les triplets de courants permettant d'optimiser le rendement de la machine sont calculés, soit en ligne ou hors lignes.

L'approche algébrique est sans doute la plus difficile. Le maximum de rendement s'effectue en minimisant une fonction représentant les pertes de la machine électrique tout en satisfaisant le couple demandé.

En régime permanent, la solution apparaît le plus souvent sous une forme de flux optimal ou de courants optimaux.

Bien que les pertes fer de la machine soient prise en compte dans la modélisation, la saturation de circuit magnétique est souvent écartée de l'analyse.

- **L'approche heuristique** : Elle est basée sur l'expérience personnelle des ingénieurs ou sur des règles intuitives, cette approche de pouvoir atteindre l'optimum globale en régime stationnaire mais elle ne peut pas garantir la convergence pour n'importe quelle condition de travail.

- **L'approche numérique** : cette approche utilise le modèle stationnaire de la machine, elle exige un temps de calcul assez long et la connaissance à priori de la trajectoire du couple.

- **L'approche analytique** : C'est une approche basée sur le modèle de la machine utilisant des hypothèses simplificatrices ce qui a tendance à la rendre peut robuste, mais elle présente l'avantage d'être directement utilisée en temps réel s'adaptant facilement à des applications à couple inconnu.

A la lumière de ce qui précède, on commencera dans ce chapitre par présenter différentes méthodes existantes qui permettent l'optimisation du rendement des machines alternatives.[7].

On terminera par une étude comparative des différentes approches d'optimisation de la commande. ce qui nous permettra d'opter pour le choix le plus approprié

### III.3 Etude comparative

Le tableau (III.3), présente une comparaison entre les différentes approches exposées dans cette partie. ce tableau montre les avantages et les inconvénients de ces approches. Il ressort de cette analyse que l'approche analytique et algébrique peuvent répondre aux besoins d'une application nécessitant une optimisation énergétique avec de bonnes performances et ce malgré les désavantages que présente l'approche analytique qui peuvent être atténués, par l'adjonction de mécanismes d'adaptation de paramètres ou des algorithmes heuristiques [7].

Approche	avantage	inconvénient
Algebrique directe	Adaptée à un calcul en ligne. Loi générales des consignes des courants restent les même Ne nécessite pas la connaissance au préalable de la trajectoire du couple.	Connaissance exacte du modèle de la machine. Obtention difficile de la solution en régime de saturation et avec la présence de l'onduleur
Optimisation en ligne	Ne nécessite pas la connaissance des Paramètres de la machine pour déduire les consignes d courant optimale	Temps de convergence assez long pour l'implatation en temps réel
catographique	Convergence en temp réel	Augmentation de la cartographie lors de la prise en compte de facteurs supplémentaires tel la température, fréquence de découpage du convertisseur -Aucune modéfication n'est permise en temp réel.
numirique	Utilise le modèle stationnaire de la machine	Connaissance exacte du modèle Temps de calcul assez long connaissance de la trajectoire du couple Ineconvient pas pour la régulation de vitesse et pour le véhicule électrique.
analytique	Utilise en temps réel adapté à des applications à couple inconnu	Utilise des hypothèses simplifictrices la rendant peu robuste Dépendent des paramètres de la machine
heuristique	Convergence toujours vers l'optimun Global en régime permanent	Ne garantie pas la convergence pour toutes les condition, de travail Doivent être appliqués au cas par cas.

Tab. (III.1) comparaison des différentes approches d'optimisation

### III.4 Quelques Stratégies de commande

#### •Commande à couple maximale

Le stratégie couple maximal permet d'obtenir un fonctionnement à couple maximal l'objectif étant de trouver l'angle de déphasage interne  $\psi$  (représentant le déphasage entre la force magnétomotrice à vide et le courant statorique) qui maximise le couple pour un courant d'induit  $I_s$  donné.

l'équation du couple électromagnétique est la suivante:

$$C_{em} = p i_d i_q (L_d - L_q) + M p i_q i_f \quad (III.1)$$

En remplaçant respectivement les courant  $i_d$  et  $i_q$  par les relations suivantes  $(i_s \cos \psi)$  et, nous obtenons:  $(-i_s \sin \psi)$

$$C_{em} = -p i_s^2 \sin \psi \cos \psi (L_d - L_q) + M p i_s i_f \cos \psi \quad (III.2)$$

En utilisant la relation trinométrique suivante  $\sin \psi \cos \psi = \frac{1}{2} \sin 2\psi$ , nous obtenons une nouvelle équation du couple :

$$C_{em} = -\frac{p i_s^2 (L_d - L_q)}{2} \sin 2\psi + M p i_s i_f \cos \psi \quad (III.3)$$

il est nécessaire de dériver cette expression pour trouver l'angle de déphasage interne  $\psi$  permettant de maximiser le couple électromagnétique.

$$\frac{\delta C_{em}}{\delta \psi} = -p i_s^2 (L_d - L_q) \cos 2\psi - M p i_s \sin \psi \quad (III.4)$$

En utilisant la relation trigonométrique suivante  $\cos 2\psi = 1 - 2 \sin^2 \psi$ , nous obtenons l'expression suivante:

$$\frac{\delta C_{em}}{\delta \psi} = 2 p i_s^2 (L_d - L_q) \sin^2 \psi - M p i_s i_f \sin \psi - p i_s^2 (L_d - L_q)$$

Pour déduire l'angle de déphasage interne  $\psi$  qui annule cette dérivée, il suffit de calculer la discrimination de cette équation de la deuxième équation du deuxième ordre en posant comme changement de variable:  $x = \sin \psi$

nous obtenons les solutions suivantes:

$$x_1, x_2 = \frac{\Phi_{fv} \pm \sqrt{\Phi_{fv}^2 + 8i_s^2(L_d - L_q)^2}}{4i_s(L_d - L_q)} \quad (III.5)$$

la solution retenue sera la suivante

$$\psi = a \sin \frac{\Phi_{fv} - \sqrt{\Phi_{fv}^2 + 8i_s^2(L_d - L_q)^2}}{4i_s(L_d - L_q)} \quad (III.6)$$

### • Commande à facteur de puissance unitaire

Une démarche similaire peut être utilisée pour déduire l'angle de déphasage permettant un fonctionnement suivant à facteur de puissance unitaire. il suffit de partir du raisonnement suivant:

le déphasage entre la tension et le courant stator est nul, par conséquent le rapport des composantes de la tension est égale au rapport des composantes du courants.

$$\frac{v_d}{v_q} = \frac{i_d}{i_q} = \frac{R_s i_d - \omega \Phi_q}{R_s i_q + \omega_r \Phi_d} \quad (III.7)$$

ceci nous conduit à la relation suivante:

$$\Phi_d i_d + \Phi_q i_q = 0 \quad (III.8)$$

soit

$$\frac{v_d}{v_q} = \frac{i_d}{i_q} = \frac{\Phi_q}{\Phi_d} \quad (III.9)$$

En remplaçons les courants par les relations suivantes:

(  $-i_s \sin \psi$  ) et (  $i_s \cos \psi$  ) nous obtenons

$$L_d i_s^2 \sin^2 \psi + L_d i_s^2 \cos^2 \psi - M i_s i_f \sin^2 \psi = 0 \quad (III.10)$$

La solution est la suivante:

$$\psi = a \sin \left[ \frac{\Phi_{fv} - \sqrt{\Phi_{fv}^2 - 4i_s^2(L_d - L_q)L_q}}{2i_s(L_d - L_q)} \right] \quad (III.11)$$

### • Commande des courants dans le repere de park

Parmi les méthodes de commande utilisées pour l'optimisation énergétique de la machine on peut citer la commande des courants dans le repère de park. cette méthode est basée sur le principe que le couple électromagnétique est fonction des trois courants de la machine quelque soit la vitesse de rotation et donc pour contrôler le couple on doit réguler les courants [7].

### **III.5 limites des stratégies**

Auparavant nous avons cité des stratégies de commande permettant de faire une optimisation énergétique au niveau de la machine sans tenir compte des contraintes de tension et en courants de la machine électrique.

Au même titre que les stratégies à facteur de puissance unitaire et couple maximale.

Les critères d'optimisation disposent d'une zone limitée dans le plan couple vitesse les faits des contraintes naturelles telles que les tensions et les courants

Concernant la machine synchrone les contraintes sont de nombre de quatre

- contraintes de tension statorique et rotorique, elle sont incontournables et leurs valeurs maximales dépendent des sources de tension disponibles.
- contraintes de courants statorique et rotorique, elle dépendent de la tenue thermique accepté par la machine électrique.

Concernant la machine asynchrone les contraintes sont de nombre de deux tension et courant statorique.

### **III.6 Conclusion**

Dans cette partie, on a essayé de mettre en relief les méthodes d'optimisations du rendement des machines alternatives ou l'on a beaucoup plus essayé de mettre l'accent sur les méthodes minimisant les pertes pour pouvoir en dégager une commande adéquate à notre cas.

il apparaît alors d'après ce qui précède que l'approche algébrique soit le mieux appropriée à différentes machine puisqu'elle donne lieu des consignes de courants indépendantes des stratégies choisies. de plus son principe est basé sur la minimisation de la somme des pertes dans la machine objectif du présent travail [7].

c'est pourquoi notre choix s'est porté sur cette approche ou on va adopter deux méthodes pour la minimisation des pertes du moteur à induction avec le modèle stationnaire de la machine .La première se limitera au régime permanent alors que la deuxième concerne le régime stationnaire et dynamique, ceci fera du chapitre suivant.