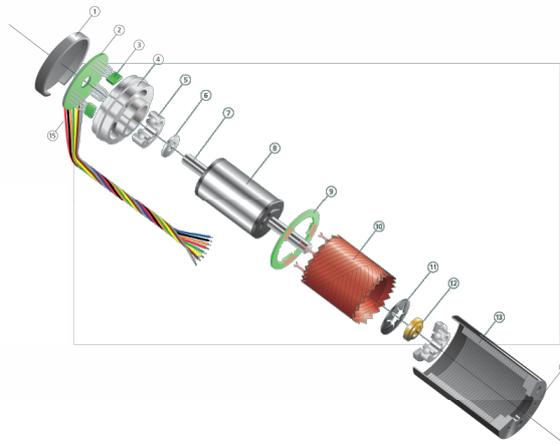


Systemes électromécaniques

Chapitre 06

MOTEURS SYNCRHONES A AIMANTS PERMANENTS Couplage et modélisation pour les moteurs triphasés



T A B L E D E S M A T I E R E S

PAGE

6. MOTEURS À COMMUTATION ÉLECTRONIQUE : MOTEURS SANS COLLECTEUR.....	1
6.1 INTRODUCTION.....	1
6.1.1 Couplage	1
6.2 COUPLAGE ÉTOILE	2
6.2.1 Mesure des résistances.....	2
6.2.2 Mesure des inductances	3
6.2.3 Modèle du moteur.....	4
6.2.4 Composante homopolaire des tension induites de mouvement.....	5
6.2.5 Relations entre tensions de commande u_{k0} et tensions de phases u_k	5
6.2.6 Commande sinusoïdale.....	7
6.2.6.1 Couple (force) produit pour une commande en courant.....	7
6.2.7 Commande rectangulaire pour des moteurs AC synchrones à aimants permanents	7
6.2.7.1 Commutation à 120°	7
6.2.7.2 Commutation à 180°	11
6.2.8 Modèle du moteur et du capteur pour un couplage étoile.....	14
6.3 COUPLAGE TRIANGLE.....	15
6.3.1 Mesure des résistances.....	15
6.3.2 Mesure des inductances	16
6.3.2.1 Modèle du moteur.....	17
6.3.3 Composante homopolaire des tensions induites de mouvement	18
6.3.4 Relations entre tensions de commande u_{k0} et tensions de phases u_k	18
6.3.5 Commande sinusoïdale.....	19
6.3.5.1 Couple (force) produit pour une commande en courant.....	19
6.3.6 Commande rectangulaire pour des moteurs AC synchrones à aimants permanents	20
6.3.6.1 Commutation à 120°	20
6.3.6.2 Commutation à 180°	24
6.3.7 Modèle du moteur et du capteur pour un couplage triangle	27
6.4 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS	28
6.4.1 Résistance et inductance	28
6.4.2 Amplitude des distributions des constantes de tensions induites	28
6.4.3 Amplitude des distributions des constantes de couple (force).....	28
6.4.4 Modèles de simulation	28
6.5 ANALYSE DES CARACTÉRISTIQUES D'UN MOTEUR À COMMUTATION ÉLECTRONIQUE.....	29
6.5.1 Introduction.....	29
6.6 VÉRIFICATIONS DES CARACTÉRISTIQUES POUR UN COUPLAGE ÉTOILE	30
6.6.1 Puissance conseillée $P_n=50W$	30
6.6.2 Vitesse à vide $\Omega_0=22'400$ t/min.....	30
6.6.3 Pente vitesse couple : 56 [t/min/mNm].....	30
6.6.4 Couple de démarrage $T_{dem}=400mNm$	30
6.6.5 Courant à vide.....	30
6.6.6 Résistance entre deux bornes.....	31
6.6.7 Couple permanent maximum $33mNm$	31
6.6.8 Constante de couple de phase.....	31
6.6.9 Constante de tension induite de phase.....	31
6.6.10 Constante de temps mécanique $T_m=2.5ms$	31
6.6.11 Inductance entre deux bornes	32
6.6.12 Température de fonctionnement du moteur.....	32
6.7 VÉRIFICATIONS DES CARACTÉRISTIQUES POUR UN COUPLAGE TRIANGLE.....	33
ANNEXE	35
A.1 EXTRAIT DU CATALOGUE MAXON 03/04.....	35

Bibliographie

6. MOTEURS À COMMUTATION ÉLECTRONIQUE : MOTEURS SANS COLLECTEUR

6.1 INTRODUCTION

Ce chapitre se limite à l'étude des moteurs synchrones à aimants permanents sans collecteur. La Figure 6-1 fournit une représentation schématique de la machine servant de base pour son étude. Cette machine, réduite à une paire de pôles, reprend les caractéristiques constructives essentielles de la plupart des moteurs synchrones à aimants permanents sans collecteur.

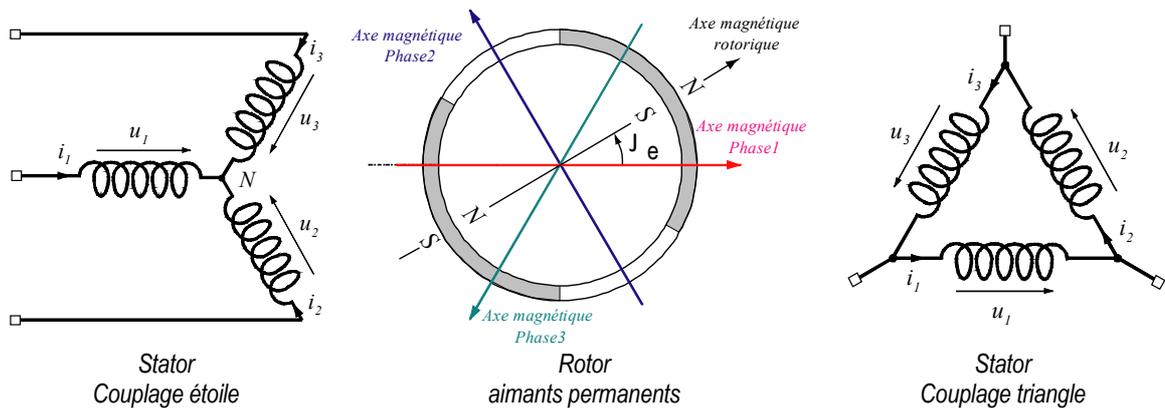


Figure 6-1 : Structure de base du moteur synchrone à aimants permanents

Au stator, on trouve trois enroulements notés 1, 2, 3 faisant entre eux un angle de $2\pi/3$. Ces bobinages peuvent être connectés en étoile (avec neutre isolé) ou en triangle. Le rotor est constitué d'aimants montés en périphérie. Sous chaque pôle (deux dans le cas présent), un aimant occupe un arc polaire égal à $2\pi/3$.

6.1.1 Couplage

On suppose que chaque phase du moteur est constituée d'une résistance (fils de l'enroulement) d'une inductance propre par phase, d'inductances mutuelles entre phases et d'une source de tension représentant la tension induite de mouvement propre à la phase considérée. La Figure 6-2 illustre la forme générale de la modélisation électrique d'un moteur triphasé.

Les phases du moteur peuvent être :

- le couplage étoile,
- le couplage triangle.

En principe, le couplage étoile est le plus utilisé. Cependant, pour des raisons de technique de fabrication, le montage triangle est encore souvent rencontré. Les paragraphes suivants donnent les caractéristiques de chacun de ces couplages.

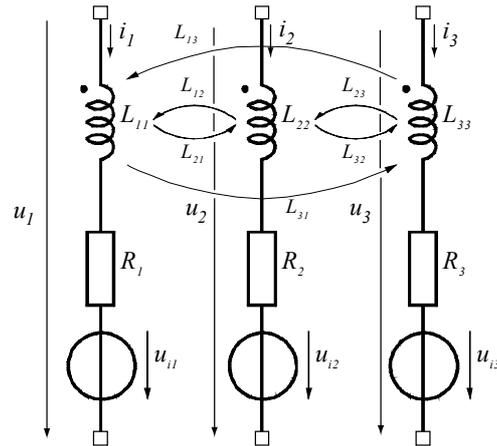


Figure 6-2 : Modélisation d'un moteur triphasé

6.2 COUPLAGE ÉTOILE

La Figure 6-3 montre le couplage des différentes phases. On voit qu'il s'agit bien d'un couplage étoile. Les inductances de champ principal, les inductances mutuelles et les résistances peuvent être déterminées par de simples mesures RL entre deux bornes.

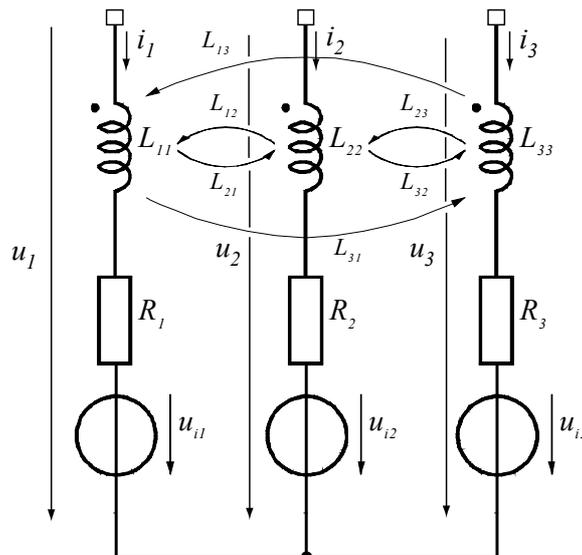


Figure 6-3 : Couplage étoile

La suite des calculs est conduite en faisant l'hypothèse que l'on est en présence d'un système triphasé symétrique, c'est-à-dire que les éléments de chaque phase sont identiques.

6.2.1 Mesure des résistances

La mesure de la résistance entre deux bornes peut se faire à l'aide d'un ohmmètre classique. Le schéma de mesure est illustré à la Figure 6-4.

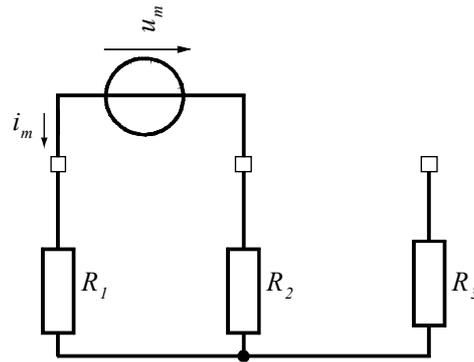


Figure 6-4 : Mesure DC de la résistance entre deux bornes

On voit immédiatement que :

$$R_m = \frac{u_m}{i_m} = R_1 + R_2 \quad 6.1$$

$$R = R_1 = R_2 = R_3$$

Et finalement

$$R_m = 2R \quad 6.2$$

6.2.2 Mesure des inductances

La mesure de l'inductance se fait à l'aide d'un RLC-mètre. Le schéma de la Figure 6-4 peut donc être modifié comme illustré à la Figure 6-5

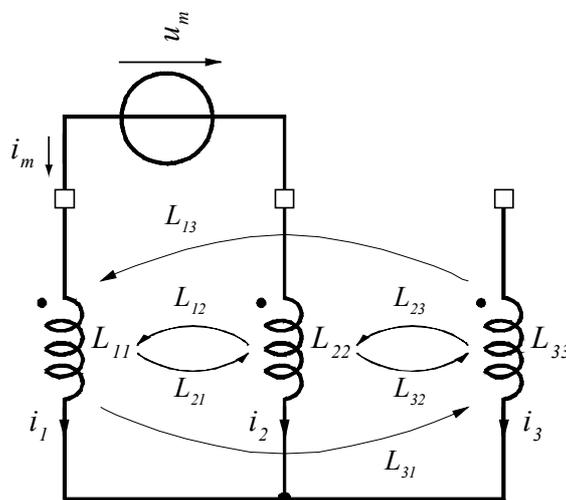


Figure 6-5 : Mesure AC de l'inductance équivalente entre deux bornes (RLC-mètre)

La connaissance de la structure géométrique du moteur permet de déterminer la relation existant entre les inductances de champ principal (L_{xx}) et les inductances mutuelles (L_{xy}).

A l'aide de la Figure 6-5, on peut écrire les relations suivantes

$$(1) \rightarrow u_m = L_{11} \frac{\partial i_1}{\partial t} - L_{22} \frac{\partial i_2}{\partial t} - L_{21} \frac{\partial i_1}{\partial t} + L_{12} \frac{\partial i_2}{\partial t}$$

$$(2) \rightarrow L = L_{11} = L_{22} = L_{33}$$

$$(3) \rightarrow M = L_{12} = L_{21} = L_{13} = L_{31} = L_{23} = L_{32}$$

$$(4) \rightarrow i_m = i_1 = -i_2$$

6.3

après quelques calculs, on obtient

$$L_m = \frac{u_m}{\frac{\partial i_m}{\partial t}} = 2(L - M)$$

6.4

6.2.3 Modèle du moteur

En vue de l'asservissement de ce moteur, il est primordial de pouvoir en créer un modèle aussi simple que possible.

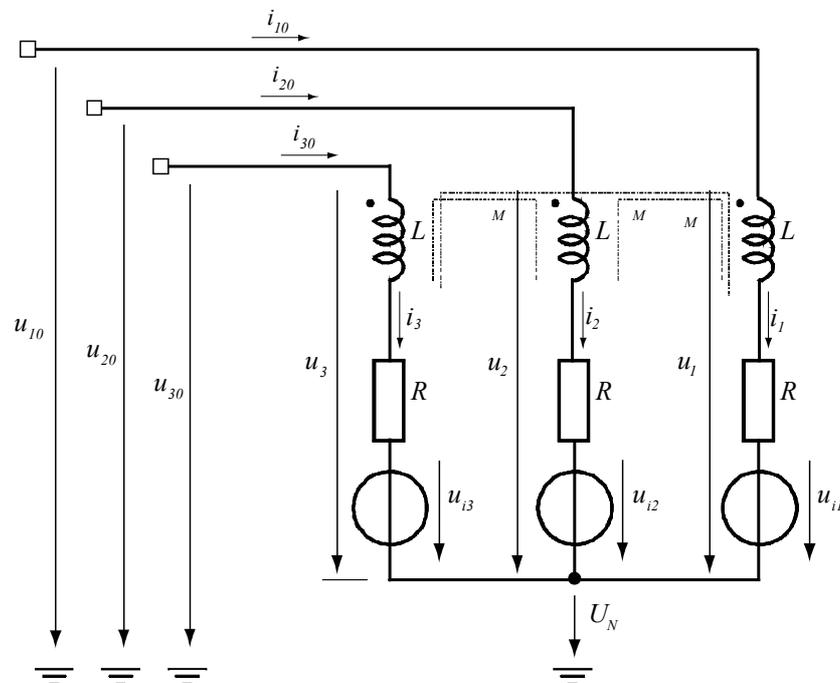


Figure 6-6 : Schéma électrique du moteur (couplage étoile)

A partir de la Figure 6-6, on peut écrire

$$u_1 = Ri_1 + L \frac{\partial i_1}{\partial t} + M \frac{\partial i_2}{\partial t} + M \frac{\partial i_3}{\partial t} + u_{i1}$$

$$u_2 = Ri_2 + L \frac{\partial i_2}{\partial t} + M \frac{\partial i_3}{\partial t} + M \frac{\partial i_1}{\partial t} + u_{i2}$$

$$u_3 = Ri_3 + L \frac{\partial i_3}{\partial t} + M \frac{\partial i_1}{\partial t} + M \frac{\partial i_2}{\partial t} + u_{i3}$$

6.5

Sachant que :

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0 \quad 6.6$$

on obtient pour les tensions de phases

$$\begin{aligned} u_1 &= Ri_1 + (L - M) \frac{\partial i_1}{\partial t} + u_{i1} = \frac{1}{2} R_m i_1 + \frac{1}{2} L_m \frac{\partial i_1}{\partial t} + u_{i1} \\ u_2 &= Ri_2 + (L - M) \frac{\partial i_2}{\partial t} + u_{i2} = \frac{1}{2} R_m i_2 + \frac{1}{2} L_m \frac{\partial i_2}{\partial t} + u_{i2} \\ u_3 &= Ri_3 + (L - M) \frac{\partial i_3}{\partial t} + u_{i3} = \frac{1}{2} R_m i_3 + \frac{1}{2} L_m \frac{\partial i_3}{\partial t} + u_{i3} \end{aligned} \quad 6.7$$

6.2.4 Composante homopolaire des tension induites de mouvement

Et en utilisant les relations 6.5 et 6.6, on peut déterminer la composante homopolaire des tensions induites de phases

$$u_1 + u_2 + u_3 = u_{i1} + u_{i2} + u_{i3} = 3u_{i0} = 3u_0 \quad 6.8$$

Les distributions angulaires des tensions induites de mouvement sont de formes sinusoïdales pour les moteurs AC, rectangulaires ou trapézoïdales pour les moteurs DC. Dans la majorité des cas, il n'y a pas de composante homopolaire

6.2.5 Relations entre tensions de commande u_{k0} et tensions de phases u_k

Il s'agit ici de trouver les relations liant les tensions de commande (u_{10} , u_{20} , u_{30}) de la commande aux tensions de phases. Grâce à la loi des mailles, on peut écrire

$$u_{10} - u_1 + u_3 - u_{30} = 0 \quad 6.9$$

$$u_{10} - u_1 + u_2 - u_{20} = 0 \quad 6.10$$

Des deux relations précédentes, on obtient par addition

$$2u_{10} - 2u_1 + u_2 + u_3 - u_{20} - u_{30} = 0 \quad 6.11$$

Pour un moteur triphasé symétrique sans composante homopolaire, on en déduit :

$$u_1 + u_2 + u_3 = 0 \quad 6.12$$

Par conséquent, les relations entre tensions de phases u_k et tensions de commande u_{k0} , pour un système triphasé symétrique, sont données par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{1}{3}(2u_{10} - u_{20} - u_{30}) \\ u_2 &= \frac{1}{3}(2u_{20} - u_{30} - u_{10}) \\ u_3 &= \frac{1}{3}(2u_{30} - u_{10} - u_{20}) \end{aligned} \quad 6.13$$

Lorsque le moteur est commandé comme un moteur AC ou DC synchrone à aimants permanents, les tensions de phases et par conséquent les courants de phases ont une valeur moyenne nulle. En commande en courants, se sont les courants de lignes i_{k0} (courants de commande) qui peuvent être mesurés. Dans le cas du couplage étoile les courants de lignes sont strictement égaux aux courants de phases. Les tensions de commande u_{k0} ont la forme suivante :

$$\begin{aligned} u_{10} &= \Delta u_{10} + U_N \\ u_{20} &= \Delta u_{20} + U_N \\ u_{30} &= \Delta u_{30} + U_N \end{aligned} \quad 6.14$$

Où Δu_{k0} représente la partie AC de la tension de commande (valeur moyenne nulle) et U_N la partie DC (composante continue) de la tension de commande. U_N représente aussi la valeur moyenne de la tension du point central (point neutre) du couplage étoile.

Les tensions de commande des moteurs AC et DC synchrones à aimants permanents doivent respecter les deux conditions suivantes :

$$\Delta u_{10} + \Delta u_{20} + \Delta u_{30} = 0 \quad 6.15$$

et

$$u_{10} + u_{20} + u_{30} = 3U_N \quad 6.16$$

U_N représente donc la composante homopolaire des tensions de commande.

On peut donc simplifier les relations liant les tensions de phases aux tensions de commande.

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{1}{3}(2u_{10} - u_{20} - u_{30}) = \Delta u_{10} \\ u_2 &= \frac{1}{3}(2u_{20} - u_{30} - u_{10}) = \Delta u_{20} \\ u_3 &= \frac{1}{3}(2u_{30} - u_{10} - u_{20}) = \Delta u_{30} \end{aligned} \quad 6.17$$

Pour les courants, on a

$$\begin{aligned} i_1 &= i_{10} \\ i_2 &= i_{20} \\ i_3 &= i_{30} \end{aligned} \quad 6.18$$

La commande en tension ou en courant de ce moteur devient très simple. En effet, malgré le couplage des phases par les inductances mutuelles, il est possible découpler le système en trois parties indépendantes au niveau électrique.

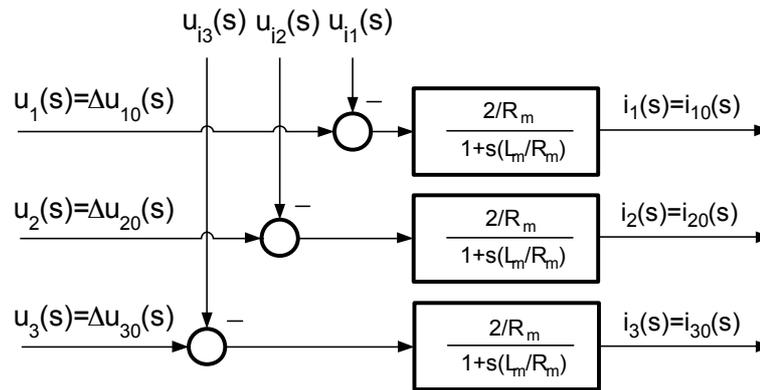


Figure 6-7 : Modèle du moteur couplé en étoile

6.2.6 Commande sinusoïdale

6.2.6.1 Couple (force) produit pour une commande en courant

En se référant au chapitre 4 « Moteurs synchrones à aimants permanents AC sans collecteur », le couple (force) produit par la circulation des courants de phases dans le moteur est donné la relation

$$\begin{aligned} \text{moteur rotatif} : T_{em} &= \frac{3}{2} K_T I \cos(\varphi) = K_{TY} I \cos(\varphi) \\ \text{moteur linéaire} : F_{em} &= \frac{3}{2} K_F I \cos(\varphi) = K_{FY} I \cos(\varphi) \end{aligned} \quad 6.19$$

avec

- I : amplitude du courant de phase,
- K_F : amplitude de la distribution de la constante de force pour une phase,
- K_T : amplitude de la distribution de la constante de couple pour une phase,
- K_{FY} : amplitude de la distribution de la constante de force pour un couplage étoile,
- K_{TY} : amplitude de la distribution de la constante de couple pour un couplage étoile,
- φ : déphasage entre la tension induite et le courant d'une même phase ou déphasage entre phaseur des tensions induites et phaseur des courants de phases

Le couple est constant en fonction de l'angle électrique (pas d'ondulation de couple).

6.2.7 Commande rectangulaire pour des moteurs AC synchrones à aimants permanents

Dans le cas d'une commande rectangulaire, il existe deux types de commutation, soit la commutation à 120° et la commutation à 180° . Dans le premier cas les courants de commande sont présents durant 120° électrique pour une demi période soit 180° électrique alors que pour la commande à 180° les courants de commande sont non nuls sur toute la demi période.

6.2.7.1 Commutation à 120°

Pour la commutation à 120° , seules deux phases sont alimentées à la fois (mise en série), la troisième étant :

- non alimentée (flottante)

- le courant est imposé à zéro (asservissement)

6.2.7.1.1 Commande en tension

Lorsque le moteur est commandé en tension, deux phases sont placées en série aux bornes de la source d'alimentation. Les courants de phases sont donc identiques et de signes opposés. Au démarrage le courant n'est limité que par la résistance entre les deux phases soit deux fois la résistance de phase. A vide la vitesse est limitée par la tension de la source d'alimentation.

6.2.7.1.2 Couple (force) produit pour une commande en courant

Les tensions induites de phases sont sinusoïdales ou autrement dit les distributions des constantes de couple respectivement de force sont sinusoïdales. Les allures des courants, des couples (force) produits par chaque phase et du couple (force) total sont illustrées aux figures suivantes. Les sondes de Hall peuvent être identifiées par rapport aux tensions induites composées. En effet les tensions induites mesurables aux bornes du moteur sont des combinaisons des tensions induites de phases

$$u_{12} = u_1 - u_2 = u_{10} - u_{20}$$

$$u_{23} = u_2 - u_3 = u_{20} - u_{30}$$

$$u_{31} = u_3 - u_1 = u_{30} - u_{10}$$

6.20

Les signaux issus des sondes de Hall sont déphasés (en retard) de $\pi/3$ sur les tensions induites composées (retard de $\pi/6$ sur les tensions induites de phases).

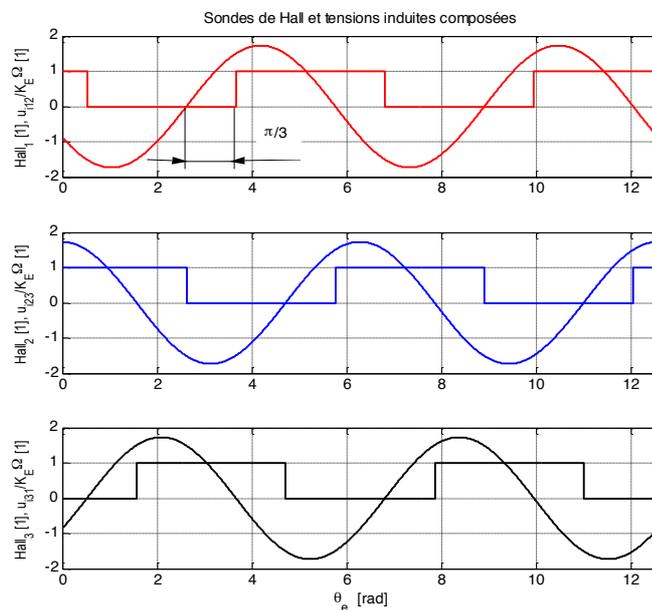


Figure 6-8 : Position des sondes de Hall en fonction des tensions composées

La Figure 6-9 montre les tensions induites aux bornes du moteur (tensions composées) et les courants de phases (i_1, i_2, i_3) ou de commande (i_{10}, i_{20}, i_{30}). On voit que les courants de phase sont non nuls pendant 120° électrique puis nuls sur 60° électrique.

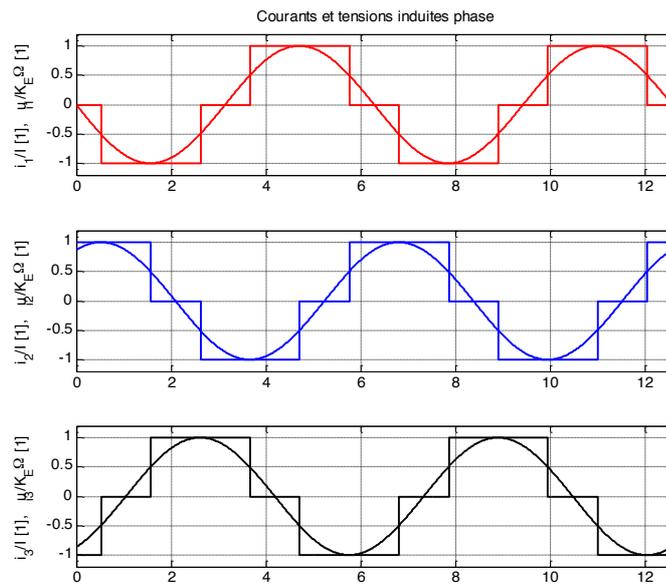


Figure 6-9 : Courants et tensions induites de phases

Les couples (forces) produits par chaque phase et le couple (force) total montrent une ondulation importante de ce dernier.

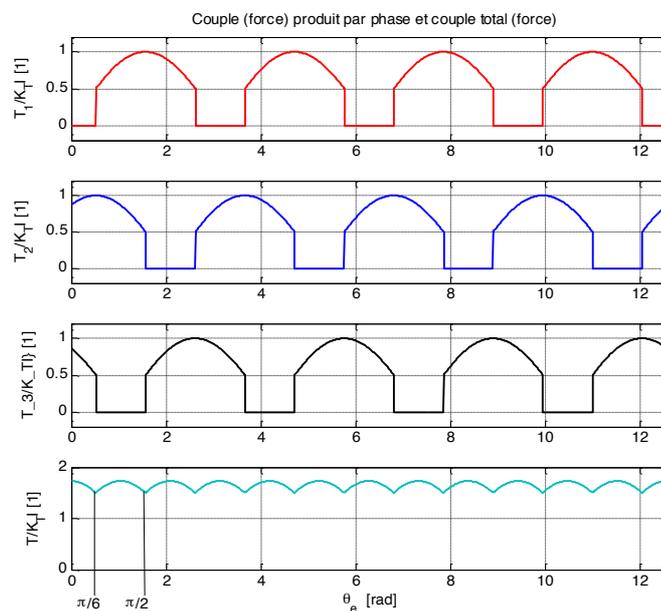


Figure 6-10 : Couples (forces) produits par chaque phase et couple (force) totale

Le couple (force) moyen se détermine dans l'intervalle $[\pi/6 \dots \pi/2]$ pour lequel seules deux mêmes phases sont actives.

Moteur rotatif

$$\begin{aligned}
 T_{em} &= \frac{3}{\pi} \int_{\pi/6}^{\pi/2} (-K_T \sin(\vartheta_e)(-I) - K_T \sin(\vartheta_e - 2\pi/3)(I) - K_T \sin(\vartheta_e - 4\pi/3)(0)) d\vartheta_e \\
 &= \frac{3\sqrt{3}}{\pi} K_T I = K_{TY120^\circ} I
 \end{aligned}
 \tag{6.21}$$

Moteur linéaire

$$F_{em} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} K_F I = K_{FY120^\circ} I$$

La valeur minimum du couple (force) est donnée pour $\vartheta_e = \pi/6 + k \cdot \pi/3$.

Moteur rotatif

$$\begin{aligned}
 T_{em[\min]} &= -K_T \sin(\pi/6)(-I) - K_T \sin(-\pi/2)(I) - K_T \sin(-7\pi/6)(0) \\
 &= \frac{3}{2} K_T I
 \end{aligned}
 \tag{6.22}$$

Moteur linéaire

$$F_{em[m\min]} = \frac{3}{2} K_F I$$

La valeur maximum du couple (force) est donnée pour $\vartheta_e = k \cdot \pi/3$.

Moteur rotatif

$$\begin{aligned}
 T_{em[\max]} &= -K_T \sin(\pi/3)(-I) - K_T \sin(-\pi/3)(I) - K_T \sin(\pi)(0) \\
 &= \sqrt{3} K_T I
 \end{aligned}
 \tag{6.23}$$

Moteur linéaire

$$F_{em[m\max]} = \sqrt{3} K_F I$$

L'ondulation de couple (force), en valeur relative vaut donc

Moteur rotatif

$$\frac{\Delta T_{em}}{T_{em}} = \frac{T_{em[\max]} - T_{em[\min]}}{T_{em}} \cdot 100 = \frac{\sqrt{3} - 3/2}{3\sqrt{3}} \pi \cdot 100 = \frac{2 - \sqrt{3}}{6} \pi \cdot 100 = 14\%$$

Moteur linéaire

$$F_{em[m\max]} = \frac{F_{em[\max]} - F_{em[\min]}}{F_{em}} \cdot 100 = 14\%$$

Pour des formes de distributions non sinusoïdales, les calculs doivent être conduits de la même manière.

6.2.7.2 Commutation à 180°

Pour la commutation à 180° , les trois phases sont actives simultanément. Pour le couplage étoile, la somme des courants de phases et donc de lignes (commande) doit être nulle. Par conséquent il faut que le courant dans une phase ait une amplitude deux fois plus grande que dans les deux autres.

6.2.7.2.1 Commande en tension

Une phase est mise en série avec les deux autres qui elles sont en parallèle. Les tensions induites des phases en parallèle sont approximativement identiques, les courants se répartissent donc de manière plus ou moins égale.

6.2.7.2.2 Couple (force) produit pour une commande en courant

Les tensions induites de phases sont sinusoïdales ou autrement dit les distributions des constantes de couple respectivement de force sont sinusoïdales. Les allures des courants, des couples (forces) produits par chaque phase et du couple (force) total sont illustrées aux figures suivantes. Les sondes de Hall peuvent être identifiées par rapport aux tensions induites composées. Les signaux issus des sondes de Hall sont déphasés (en retard) de $\pi/6$ sur les tensions induites de phases composées (en phase sur les tensions induites de phases).

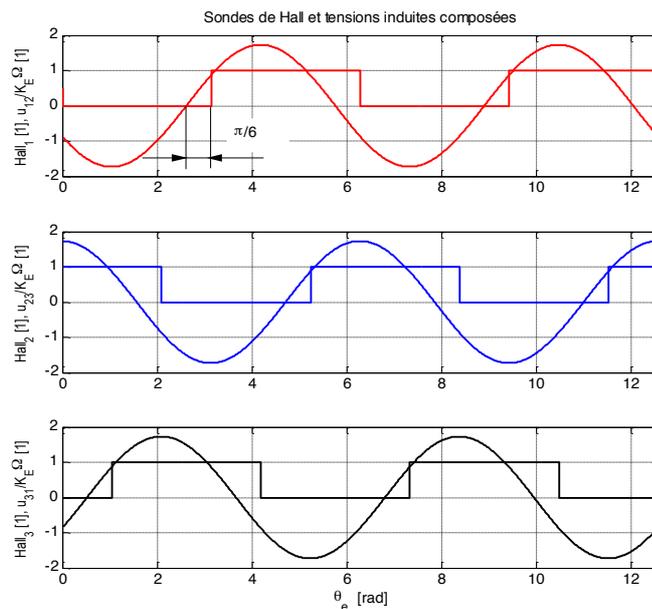


Figure 6-11 : Position des sondes de Hall en fonction des tensions composées

La Figure 6-11 montre le déphasage qu'il faut appliquer entre les tensions composées, accessibles entre les bornes du moteur et les sondes de Hall.

La Figure 6-12 montre la forme des courants de phases. On voit que la somme des courants de phases est bien nulle pour toutes les valeurs de l'angle électrique θ_e .

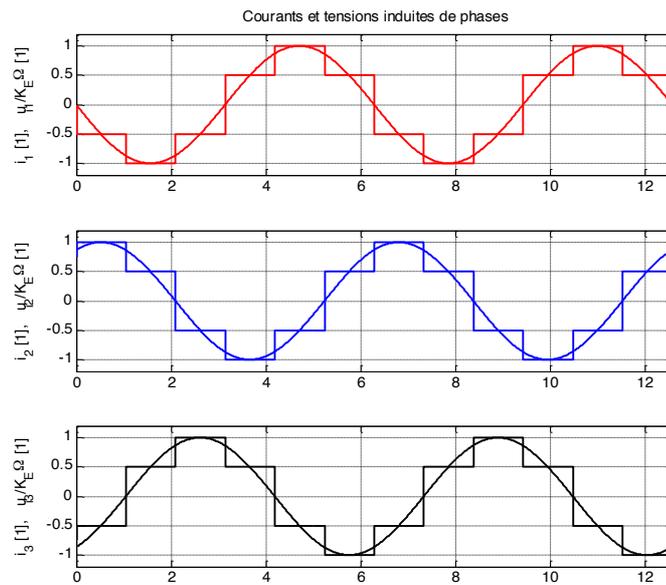


Figure 6-12 : Courants et tensions induites de phases

Comme pour la commutation à 120° , les couples produits par chaque phase peuvent être déduits des courants et des tensions induites de phases.

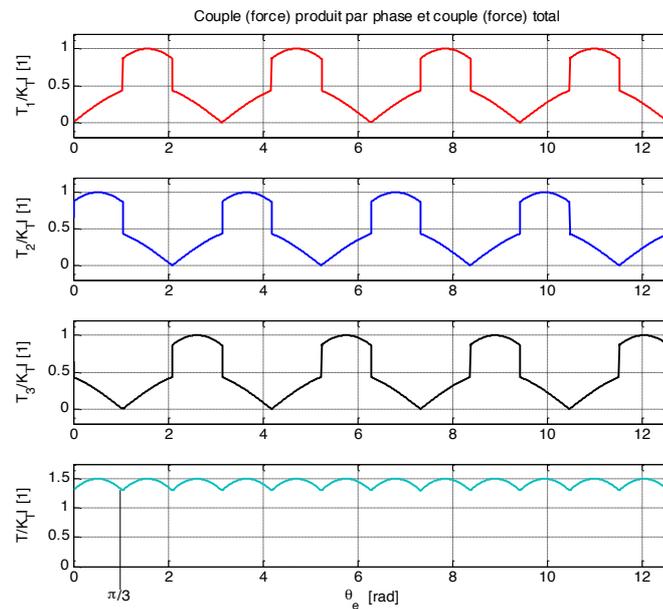


Figure 6-13 : Couples (forces) produits par chaque phase et couple (force) total

Le couple (force) moyen se détermine dans l'intervalle $[0 \dots \pi/3]$ pour lequel l'ondulation de couple (force) est périodique.

Moteur rotatif

$$T_{em} = \frac{3}{\pi} \int_0^{\pi/3} \left(-K_T \sin(\vartheta_e) \left(\frac{-I}{2} \right) - K_T \sin(\vartheta_e - 2\pi/3)(I) - K_T \sin(\vartheta_e - 4\pi/3) \left(\frac{-I}{2} \right) \right) d\vartheta_e$$

$$= \frac{9}{2\pi} K_T I = K_{TY180^\circ} I \quad 6.25$$

Moteur linéaire

$$F_{em} = \frac{9}{2\pi} K_F I = K_{FY180^\circ} I$$

La valeur minimum du couple (force) est donné pour $\vartheta_e = 0 + k \cdot \pi/3$.

Moteur rotatif

$$T_{em[\min]} = -K_T \sin(0) \left(\frac{-I}{2} \right) - K_T \sin(-2\pi/3)(I) - K_T \sin(-4\pi/3) \left(\frac{-I}{2} \right)$$

$$= \frac{3\sqrt{3}}{4} K_T I \quad 6.26$$

Moteur linéaire

$$F_{em[m\min]} = \frac{3\sqrt{3}}{4} K_F I$$

La valeur maximum du couple (force) est donné pour $\vartheta_e = \pi/6 + k \cdot \pi/3$.

Moteur rotatif

$$T_{em[\max]} = -K_T \sin(\pi/6) \left(\frac{-I}{2} \right) - K_T \sin(-\pi/2)(I) - K_T \sin(-7\pi/6) \left(\frac{-I}{2} \right)$$

$$= \frac{3}{2} K_T I \quad 6.27$$

Moteur linéaire

$$F_{em[m\max]} = \frac{3}{2} K_F I$$

L'ondulation de couple (force), en valeur relative vaut donc

Moteur rotatif

$$\frac{\Delta T_{em}}{T_{em}} = \frac{T_{em[\max]} - T_{em[\min]}}{T_{em}} \cdot 100 = \frac{2 - \sqrt{3}}{6} \pi \cdot 100 = 14\% \quad 6.28$$

Moteur linéaire

$$F_{em[m\max]} = \frac{F_{em[\max]} - F_{em[\min]}}{F_{em}} \cdot 100 = 14\%$$

Pour des formes de distributions non sinusoïdales, les calculs doivent être conduits de la même manière.

6.2.8 Modèle du moteur et du capteur pour un couplage étoile

A partir des paragraphes § 6.2.7.1 et 6.2.7.2 il est possible de construire un modèle pour le moteur et son capteur. Les grandeurs apparaissant dans les blocs représentant les phases correspondent aux valeurs mesurées (R_m et L_m). Les distributions des constantes de couple (force) et de tensions induites sont identiques à celles de phases.

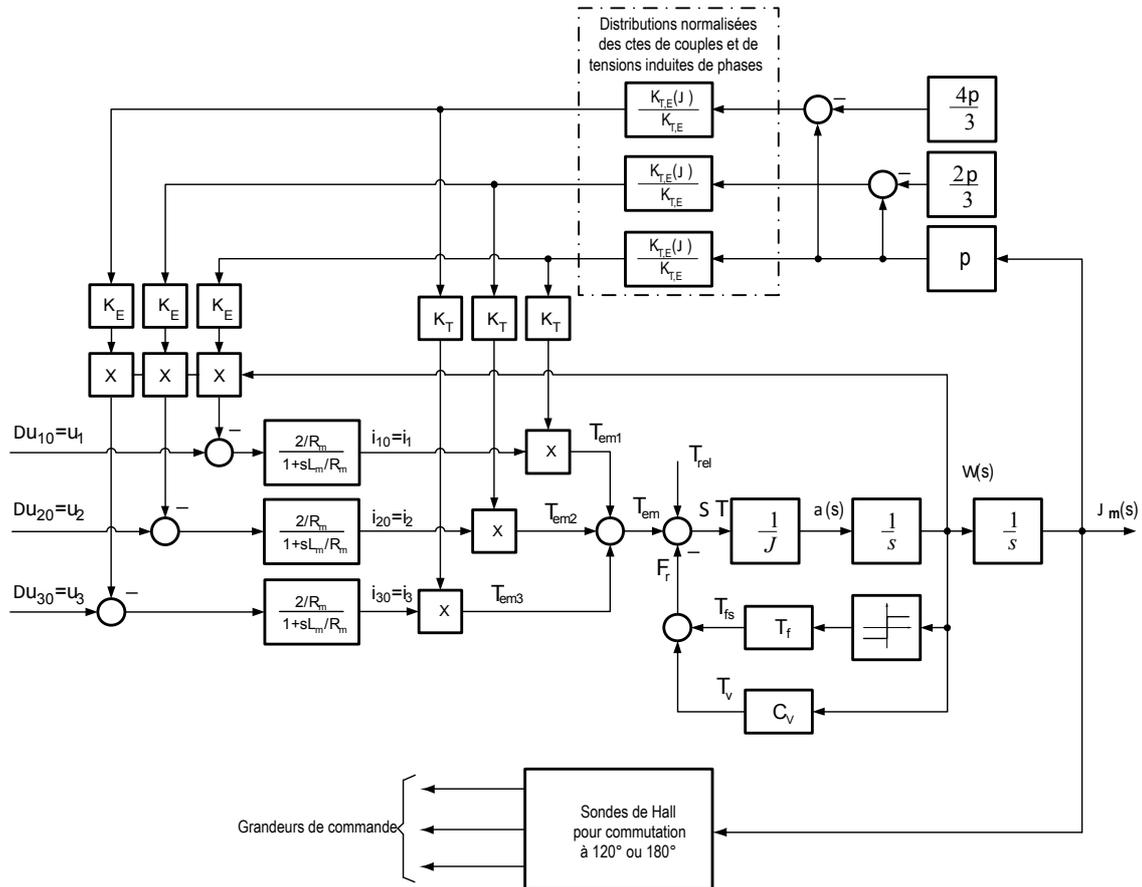


Figure 6-14 : Modèle du moteur pour un couplage étoile

Le choix du déphasage entre tensions induites composées et signaux des sondes de Hall définit le type de commutation (120° ou 180°).

Le tableau ci-dessous fait la synthèse des résultats obtenus dans cette section.

Paramètres	Type de commutation	
	180°	120°
Déphasage entre sondes de Hall et tensions induites composées	$-\pi/6$	$-\pi/3$
Déphasage entre sondes de Hall et tensions induites de phases	0	$-\pi/6$
Couple rapporté au couple (force) produit par une phase (K_T ou K_{Tf})	$\frac{9}{2\pi}$	$\frac{3\sqrt{3}}{\pi}$
Ondulation relative de couple (force)	14%	14%
Valeur de la résistance entre bornes	2R	2R
Valeur de l'inductance entre bornes	2(L-M)	2(L-M)

6.3 COUPLAGE TRIANGLE

La Figure 6-15 montre le couplage des différentes phases. On voit qu'il s'agit bien d'un couplage triangle.

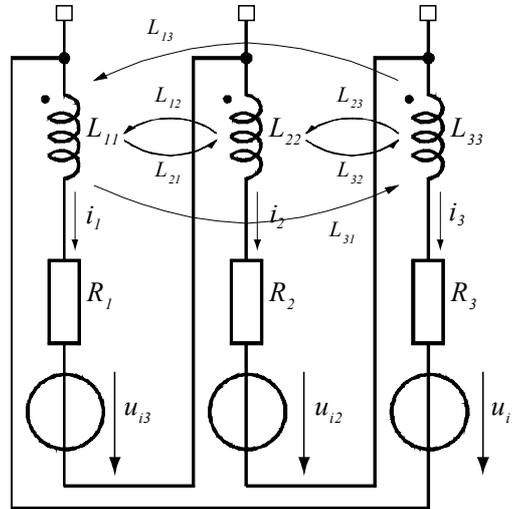


Figure 6-15 : Couplage triangle

Les inductances de champ principal, les inductances mutuelles et les résistances peuvent être déterminées par de simples mesures R et L entre deux bornes. La suite des calculs sont conduits en faisant l'hypothèse que l'on est en présence d'un système triphasé symétrique, c'est-à-dire que les éléments de chaque phase sont identiques.

6.3.1 Mesure des résistances

La mesure de la résistance entre deux bornes correspond au schéma illustré à la Figure 6-16.

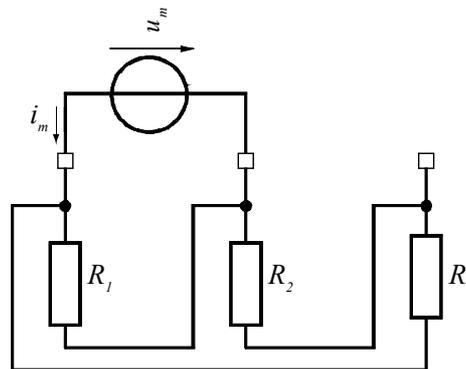


Figure 6-16 : Mesure DC de la résistance entre deux bornes

On voit que :

$$\left. \begin{aligned} R_m &= \frac{u_m}{i_m} = \frac{R_1(R_2 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3} \\ R &= R_1 = R_2 = R_3 \end{aligned} \right\} R_m = \frac{2}{3} R \quad 6.29$$

6.3.2 Mesure des inductances

La mesure de l'inductance se fait à l'aide d'un RLC-mètre. Le schéma de la Figure 6-15 peut donc être modifié comme illustré à la Figure 6-17.

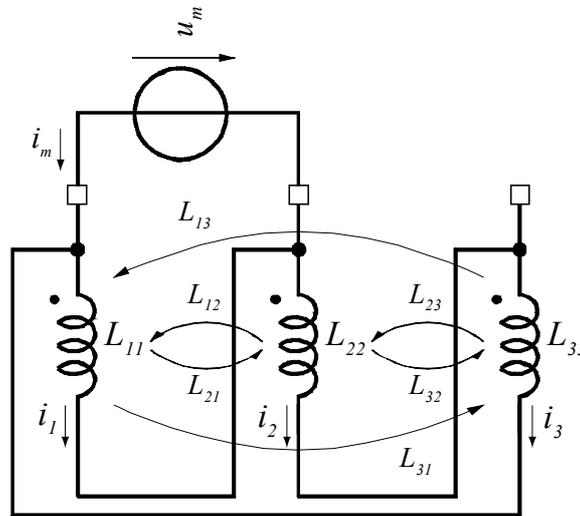


Figure 6-17 : Mesure AC de l'inductance équivalente entre deux bornes (RLC-mètre)

La connaissance de la structure géométrique du moteur permet de déterminer la relation existant entre les inductances de champ principal (L_{xx}) et les inductances mutuelles (L_{xy}) pour x et y variant de 1 à 3.

A l'aide de la Figure 6-17, on peut écrire les relations suivantes

$$\begin{aligned}
 (1) \quad & \rightarrow u_m = L_{11} \frac{\partial i_1}{\partial t} + L_{12} \frac{\partial i_2}{\partial t} + L_{13} \frac{\partial i_3}{\partial t} \\
 (2) \quad & \rightarrow u_m = -L_{22} \frac{\partial i_2}{\partial t} - L_{33} \frac{\partial i_3}{\partial t} - (L_{21} + L_{31}) \frac{\partial i_1}{\partial t} - L_{32} \frac{\partial i_2}{\partial t} - L_{23} \frac{\partial i_3}{\partial t} \\
 (3) \quad & \rightarrow L = L_{11} = L_{22} = L_{33} \\
 (3) \quad & \rightarrow M = L_{12} = L_{21} = L_{13} = L_{31} = L_{23} = L_{32} \\
 (4) \quad & \rightarrow i_m = i_1 - i_2 \\
 (5) \quad & \rightarrow i_2 = i_3
 \end{aligned}
 \tag{6.30}$$

après quelques calculs, on obtient pour (1) et (2)

$$\begin{aligned}
 (1) \quad & \rightarrow u_m = L \frac{\partial i_1}{\partial t} + M \frac{\partial i_2}{\partial t} + M \frac{\partial i_3}{\partial t} \\
 (2) \quad & \rightarrow u_m = -L \frac{\partial i_2}{\partial t} - L \frac{\partial i_3}{\partial t} - 2M \frac{\partial i_1}{\partial t} - M \frac{\partial i_2}{\partial t} - M \frac{\partial i_3}{\partial t}
 \end{aligned}
 \tag{6.31}$$

Puis, pour l'inductance mesurée

$$L_m = \frac{u_m}{\frac{\partial i_m}{\partial t}} = \frac{2}{3} (L - M)
 \tag{6.32}$$

6.3.2.1 Modèle du moteur

En vue de l'asservissement de ce moteur, il est primordial de pouvoir en créer un modèle aussi simple que possible.

A partir de la Figure 6-18, on peut écrire

$$\begin{aligned} u_1 &= Ri_1 + L \frac{\partial i_1}{\partial t} + M \frac{\partial i_2}{\partial t} + M \frac{\partial i_3}{\partial t} + u_{i1} \\ u_2 &= Ri_2 + L \frac{\partial i_2}{\partial t} + M \frac{\partial i_3}{\partial t} + M \frac{\partial i_1}{\partial t} + u_{i2} \\ u_3 &= Ri_3 + L \frac{\partial i_3}{\partial t} + M \frac{\partial i_1}{\partial t} + M \frac{\partial i_2}{\partial t} + u_{i3} \end{aligned} \quad 6.33$$

Sachant que :

$$u_1 + u_2 + u_3 = 0 \quad 6.34$$

$$0 = R(i_1 + i_2 + i_3) + (L + 2M) \frac{\partial}{\partial t} (i_1 + i_2 + i_3) + u_{i1} + u_{i2} + u_{i3} \quad 6.35$$

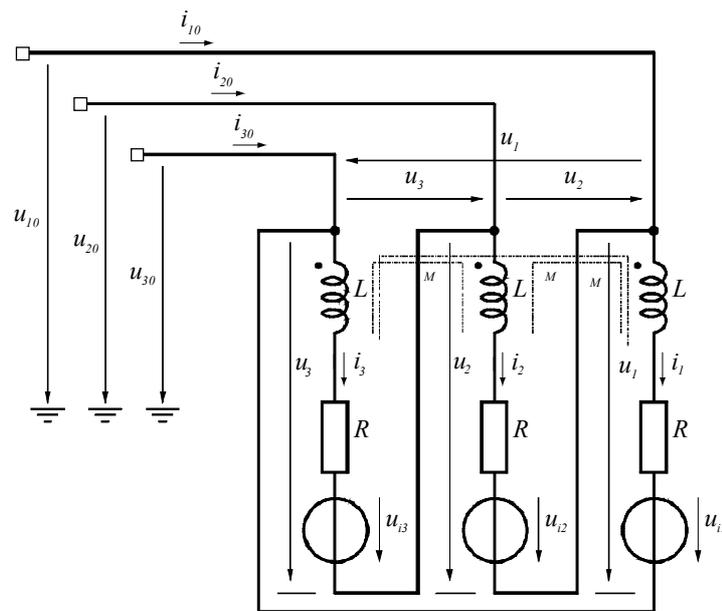


Figure 6-18 : Schéma électrique du moteur (couplage triangle)

On voit donc qu'il peut y avoir un courant de circulation dans le moteur. On peut écrire les relations suivantes

$$\begin{aligned} u_1 &= Ri_1 + (L - M) \frac{\partial i_1}{\partial t} + M \frac{\partial}{\partial t} (i_1 + i_2 + i_3) + u_{i1} \\ u_2 &= Ri_2 + (L - M) \frac{\partial i_2}{\partial t} + M \frac{\partial}{\partial t} (i_1 + i_2 + i_3) + u_{i2} \\ u_3 &= Ri_3 + (L - M) \frac{\partial i_3}{\partial t} + M \frac{\partial}{\partial t} (i_1 + i_2 + i_3) + u_{i3} \end{aligned} \quad 6.36$$

6.3.3 Composante homopolaire des tensions induites de mouvement

Et en utilisant la relation 6.35, on peut déterminer la composante homopolaire des tensions induites de phases

$$3u_{i0} = u_{i1} + u_{i2} + u_{i3} = -R(i_1 + i_2 + i_3) - (L + 2M) \frac{\partial}{\partial t} (i_1 + i_2 + i_3) \quad 6.37$$

Si les tension induites de phase u_{i1} , u_{i2} , u_{i3} ne comportent pas de composante homopolaire (pas d'harmoniques de rang $k = 3(2n+1)$ avec $n=[0, 1, 2, \dots]$), le courant de circulation $i_1+i_2+i_3$ est nul, ce qui est raisonnable si le moteur est bien dimensionné. On peut alors écrire les relations générales suivantes pour toutes les phases :

$$\begin{aligned} u_1 &= Ri_1 + (L - M) \frac{\partial i_1}{\partial t} + u_{i1} = \frac{3}{2} R_m i_1 + \frac{3}{2} L_m \frac{\partial i_1}{\partial t} + u_{i1} \\ u_2 &= Ri_2 + (L - M) \frac{\partial i_2}{\partial t} + u_{i2} = \frac{3}{2} R_m i_2 + \frac{3}{2} L_m \frac{\partial i_2}{\partial t} + u_{i2} \\ u_3 &= Ri_3 + (L - M) \frac{\partial i_3}{\partial t} + u_{i3} = \frac{3}{2} R_m i_3 + \frac{3}{2} L_m \frac{\partial i_3}{\partial t} + u_{i3} \end{aligned} \quad 6.38$$

6.3.4 Relations entre tensions de commande u_{k0} et tensions de phases u_k

Comme pour le couplage étoile, il s'agit de trouver les relations qui lient les tensions de commande u_{k0} aux tensions de phases u_k .

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= u_{10} - u_{30} \\ u_2 &= u_{20} - u_{10} \\ u_3 &= u_{30} - u_{20} \end{aligned} \right\} u_1 + u_2 + u_3 = 0 \quad 6.39$$

Les relations liant les courants de branches aux courants de phases ont la forme suivante

$$\left. \begin{aligned} i_{10} &= i_1 - i_2 \\ i_{20} &= i_2 - i_3 \\ i_{30} &= i_3 - i_1 \end{aligned} \right\} i_{10} + i_{20} + i_{30} = 0 \quad 6.40$$

Sachant que, pour un moteur triphasé symétrique, sans composante homopolaire sur les tensions induites de mouvement on a

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0 \quad 6.41$$

On peut en déduire les courants de phases en fonction des courants de commande

$$\begin{aligned} i_1 &= \frac{1}{3} (i_{10} - i_{30}) \\ i_2 &= \frac{1}{3} (i_{20} - i_{10}) \\ i_3 &= \frac{1}{3} (i_{30} - i_{20}) \end{aligned} \quad 6.42$$

En faisant le même raisonnement que pour le couplage étoile, voir relations 6.14, 6.15 et 6.16, il est possible de déterminer les liens entre tensions et courants de commande

$$\begin{aligned}\Delta u_{10} &= u_1 - u_2 \\ \Delta u_{20} &= u_2 - u_3 \\ \Delta u_{30} &= u_3 - u_1\end{aligned}\tag{6.43}$$

A partir des relations 6.38 et 6.42 on obtient un système d'équations simples liant les grandeurs de commande.

$$\begin{aligned}\Delta u_{10} &= \frac{1}{3}(u_1 - u_2) = \frac{1}{3}R(i_1 - i_2) + \frac{1}{3}(L - M)\frac{\partial}{\partial t}(i_1 - i_2) + \frac{1}{3}(u_{i1} - u_{i2}) \\ &= \frac{1}{3}Ri_{10} + \frac{1}{3}(L - M)\frac{\partial i_{10}}{\partial t} + u_{i10} = \frac{1}{2}R_m i_{10} + \frac{1}{2}L_m \frac{\partial i_{10}}{\partial t} + \Delta u_{i10} \\ \Delta u_{20} &= \frac{1}{3}Ri_{20} + \frac{1}{3}(L - M)\frac{\partial i_{20}}{\partial t} + u_{i20} = \frac{1}{2}R_m i_{20} + \frac{1}{2}L_m \frac{\partial i_{20}}{\partial t} + \Delta u_{i20} \\ \Delta u_{30} &= \frac{1}{3}Ri_{30} + \frac{1}{3}(L - M)\frac{\partial i_{30}}{\partial t} + u_{i30} = \frac{1}{2}R_m i_{30} + \frac{1}{2}L_m \frac{\partial i_{30}}{\partial t} + \Delta u_{i30}\end{aligned}\tag{6.44}$$

On voit une parfaite adéquation entre les grandeurs de phases pour le couplage étoile (relation 6.7) et les grandeurs de commande ou les grandeurs composées pour le couplage triangle.

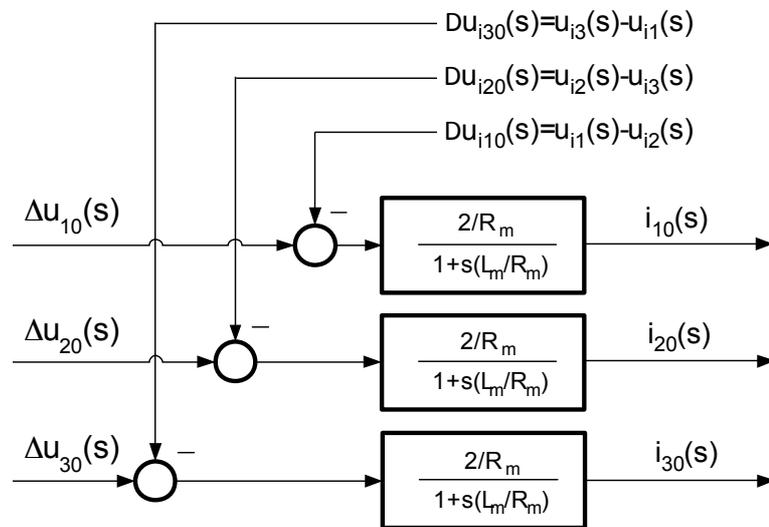


Figure 6-19 : Modèle du moteur couplé en triangle

6.3.5 Commande sinusoïdale

6.3.5.1 Couple (force) produit pour une commande en courant

En se référant au § 6.2.6.1 et en explicitant la relation liant le couple (force) aux courants de commande, on obtient

$$\begin{aligned}
T_{em} &= K_{T1}i_1 + K_{T2}i_2 + K_{T3}i_3 \\
&= \frac{1}{3}(K_{T1}(i_{10} - i_{30}) + K_{T2}(i_{20} - i_{10}) + K_{T3}(i_{30} - i_{20})) \\
&= \frac{1}{3}((K_{T1} - K_{T2})i_{10} - (K_{T2} - K_{T3})i_{20} - (K_{T3} - K_{T1})i_{30}) \\
&= K_{T10}i_{10} + K_{T20}i_{20} + K_{T30}i_{30}
\end{aligned} \tag{6.45}$$

avec

$$\begin{aligned}
K_{T10}(\vartheta_e) &= \frac{1}{3}(K_{T1} - K_{T2}) = -\frac{1}{\sqrt{3}}K_T \sin(\vartheta_e + \pi/6) \\
K_{T20}(\vartheta_e) &= \frac{1}{3}(K_{T2} - K_{T3}) = -\frac{1}{\sqrt{3}}K_T \sin(\vartheta_e - \pi/2) \\
K_{T30}(\vartheta_e) &= \frac{1}{3}(K_{T3} - K_{T1}) = -\frac{1}{\sqrt{3}}K_T \sin(\vartheta_e - 7\pi/6)
\end{aligned} \tag{6.46}$$

Et les courants de commande

$$\begin{aligned}
i_{10} &= -I \sin(\theta_e + \pi/6 + \varphi) \\
i_{20} &= -I \sin(\theta_e - \pi/2 + \varphi) \\
i_{30} &= -I \sin(\theta_e - 7\pi/6 + \varphi)
\end{aligned} \tag{6.47}$$

Le couple (force) total vaut donc

$$\begin{aligned}
&\textit{Moteur rotatif} \\
T_{em} &= K_{T10}i_{10} + K_{T20}i_{20} + K_{T30}i_{30} \\
&= \frac{\sqrt{3}}{2}K_T I \cos(\varphi) = K_{T\Delta} I \cos(\varphi)
\end{aligned} \tag{6.48}$$

Moteur linéaire

$$F_{em} = \frac{\sqrt{3}}{2}K_F I \cos(\varphi) = K_{F\Delta} I \cos(\varphi)$$

On voit que si on utilise comme référence l'amplitude des courants de commande, le couple (force) pour un couplage triangle est $\sqrt{3}$ fois plus petit que pour le couplage étoile.

6.3.6 Commande rectangulaire pour des moteurs AC synchrones à aimants permanents

Dans le cas d'une commande rectangulaire, les relations liant les tensions de commande aux tensions de phases, respectivement les courants de commande aux courants de phases sont identique à celles de la commande sinusoïdale.

6.3.6.1 Commutation à 120°

Pour la commutation à 120°, seules deux phases sont alimentées à la fois (mise en parallèle), la troisième étant :

- non alimentée (court-circuitée) en commande en tension
- le courant est imposé à zéro en commande en courant

6.3.6.1.1 Commande en tension.

Lorsque le moteur est commandé en tension, deux phases sont placées en parallèle aux bornes de la source d'alimentation, la troisième étant court-circuitée. Les courants de phases sont donc identiques et de signes opposés. Au démarrage le courant n'est limité que par la mise en parallèle de deux résistances de phases. A vide la vitesse est limitée par la tension de la source d'alimentation.

6.3.6.1.2 Couple (force) produit pour une commande en courant

Les tensions induites de phases sont sinusoïdales ou autrement dit les distributions des constantes de couple (force) sont sinusoïdales. Les allures des courants, des couples (forces) produits par chaque phase et du couple (force) total sont illustrées aux figures suivantes. Les sondes de Hall peuvent être identifiées par rapport aux tensions composées. En effet les tensions mesurables aux bornes du moteur sont les tensions de phases

$$\begin{aligned} u_{12} &= u_1 \\ u_{23} &= u_2 \\ u_{31} &= u_3 \end{aligned} \tag{6.49}$$

Les signaux issus des sondes de Hall sont en phase avec les tensions induites de phases.

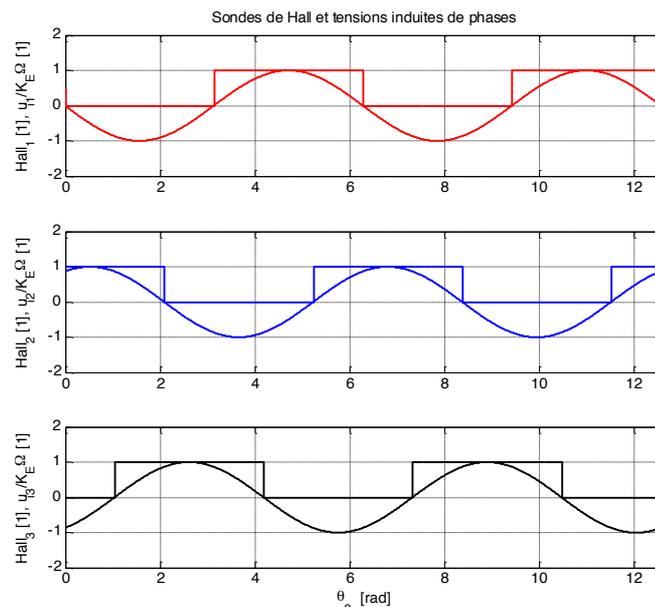


Figure 6-20 : Position des sondes de Hall en fonction des tensions de phases

La Figure 6-21 montre les tensions induites de phases et les courants de commande. On voit que les courants de commande sont présents durant 120° électrique. Les courants de phases sont quant à eux jamais nuls.

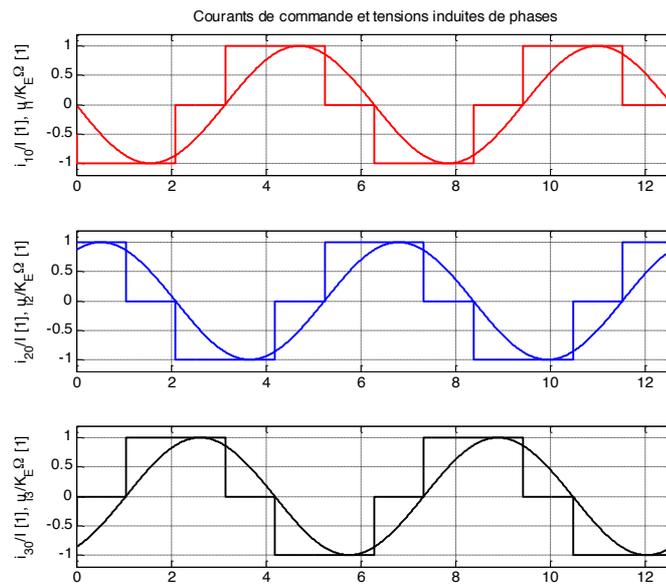


Figure 6-21 : Courants de commande et tensions induites de phases

Selon la relation 6.45, il est possible de déterminer les couples (forces) produits par chaque phase et par conséquent le couple (force) total.

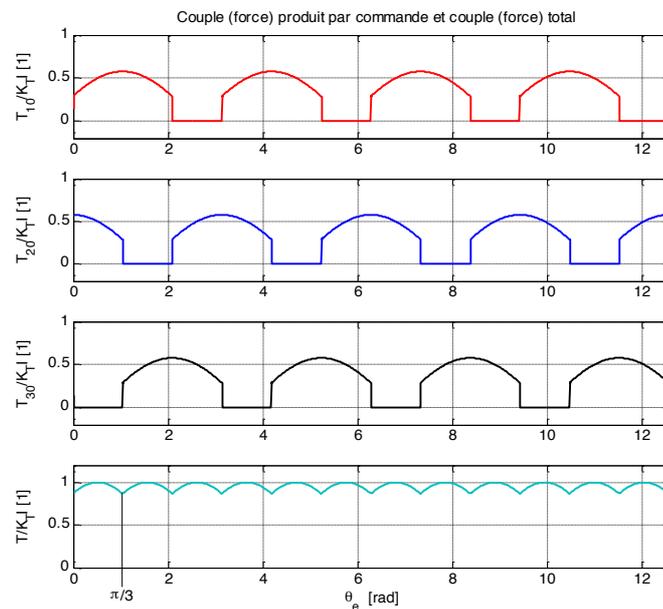


Figure 6-22 : Couples (forces) produits par chaque commande et couple (force) totale

Le couple (force) moyen se détermine dans l'intervalle $[0 \dots \pi/3]$ pour lequel seules deux mêmes phases sont actives.

Moteur rotatif

$$\begin{aligned} T_{em} &= \frac{3}{\pi} \int_0^{\pi/3} (K_{T10}(\vartheta_e) \cdot (-I) - K_{T20}(\vartheta_e) \cdot (I) - K_{T30}(\vartheta_e) \cdot (0)) d\vartheta_e \\ &= \frac{3}{\pi} K_T I = K_{T\Delta 120^\circ} I \end{aligned} \quad 6.50$$

Moteur linéaire

$$F_{em} = \frac{3}{\pi} K_F I = K_{F\Delta 120^\circ} I$$

La valeur minimum du couple (force) est donnée pour $\vartheta_e = k \cdot \pi/3$.

Moteur rotatif

$$\begin{aligned} T_{em[\min]} &= -K_{T10}(\pi/3) \cdot (-I) - K_T(\pi/3) \cdot (I) - K_T(\pi/3) \cdot (0) \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2} K_T I \end{aligned} \quad 6.51$$

Moteur linéaire

$$F_{em[m \min]} = \frac{\sqrt{3}}{2} K_F I$$

La valeur maximum du couple (force) est donnée pour $\vartheta_e = k \cdot \pi/3$.

Moteur rotatif

$$\begin{aligned} T_{em[\max]} &= -K_T \sin(\pi/3)(-I) - K_T \sin(-\pi/3)(I) - K_T \sin(\pi)(0) \\ &= K_T I \end{aligned} \quad 6.52$$

Moteur linéaire

$$F_{em[m \max]} = K_F I$$

L'ondulation de couple (force), en valeur relative vaut donc

Moteur rotatif

$$\frac{\Delta T_{em}}{T_{em}} = \frac{T_{em[\max]} - T_{em[\min]}}{T_{em}} \cdot 100 = \frac{2 - \sqrt{3}}{6} \pi \cdot 100 = 14\% \quad 6.53$$

Moteur linéaire

$$F_{em[m \max]} = \frac{F_{em[\max]} - F_{em[\min]}}{F_{em}} \cdot 100 = 14\%$$

Pour des formes de distributions non sinusoïdales, les calculs doivent être conduits de la même manière.

6.3.6.2 Commutation à 180°

Pour la commutation à 180° , les trois phases sont actives simultanément. La somme des courants de phases et donc de commande doit être nulle. Par conséquent il faut que le courant dans une phase ait une amplitude deux fois plus grande que dans les autres.

6.3.6.2.1 Commande en tension

Deux phases en série sont mises en parallèle avec la troisième. La somme des tensions induites des deux phases en série est approximativement identique à celle de la phase en parallèle, les courants se répartissent donc de manière plus ou moins égale.

6.3.6.2.2 Couple (force) produit pour une commande en courant

Les tensions induites de phases sont sinusoïdales ou autrement dit les distributions des constantes de couple (force) sont sinusoïdales. Les allures des courants, des couples (forces) produits par chaque phase et du couple (force) total est illustré à la figure suivante.

Les sondes de Hall peuvent être identifiées par rapport aux tensions composées. En effet les tensions mesurables aux bornes du moteur sont les tensions de phases.

Les signaux issus des sondes de Hall sont déphasés (en retard) de $-\pi/6$ sur les tensions de phases

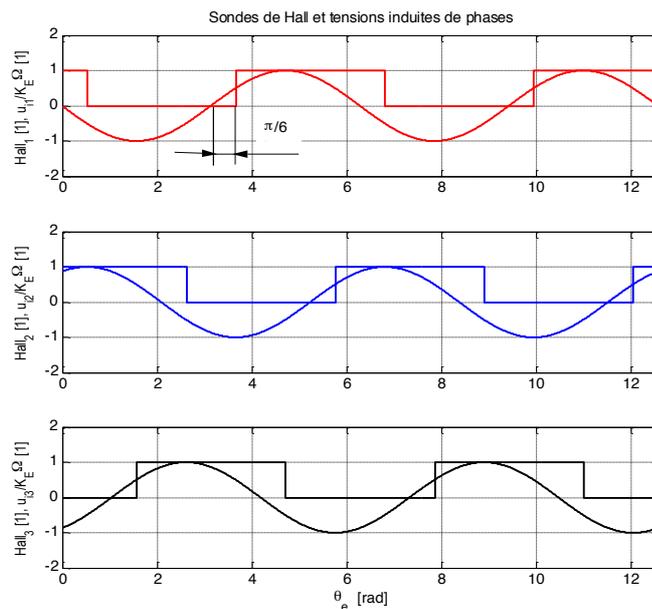


Figure 6-23 : Position des sondes de Hall en fonction des tensions induites de phases

La Figure 6-24 montre la forme des courants de commande et des tensions induites de phases. On voit que les courants en commutation à 180° ne sont jamais nuls, ce qui n'est pas le cas des courants de phases

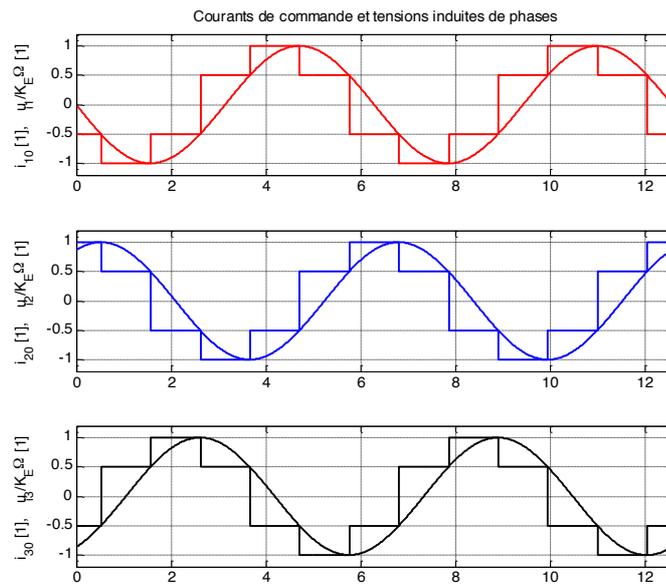


Figure 6-24 : Courants de commande et tensions induites de phases

Selon la relation 6.45, il est possible de déterminer les couples (forces) produits par chaque phase et par conséquent le couple (force) total.

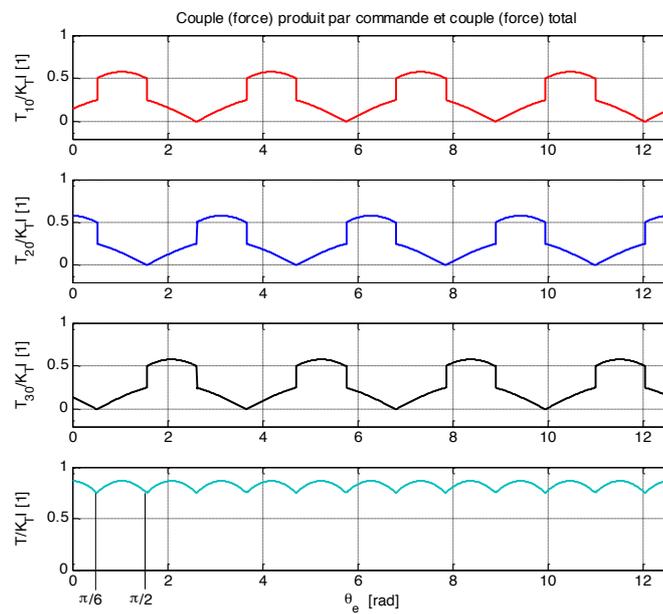


Figure 6-25 : Couples (forces) produits par chaque commande et couple (force) total

Le couple (force) moyen se détermine dans l'intervalle $[\pi/6 \dots \pi/2]$ pour lequel l'ondulation de couple (force) est périodique.

Moteur rotatif

$$\begin{aligned} T_{em} &= \frac{3}{\pi} \int_{\pi/6}^{\pi/2} (-K_{T10}(\vartheta_e) \cdot (-I) - K_{T20}(\vartheta_e) \cdot (I) - K_{T30}(\vartheta_e) \cdot (-I)) d\vartheta_e \\ &= \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} K_T I = K_{T\Delta 180^\circ} I \end{aligned} \quad 6.54$$

Moteur linéaire

$$F_{em} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} K_F I = K_{F\Delta 180^\circ} I$$

La valeur minimum du couple (force) est donné pour $\vartheta_e = \pi/6 + k \cdot \pi/3$.

Moteur rotatif

$$\begin{aligned} T_{em[\min]} &= -K_{T10}(\pi/6) \cdot (-I) - K_{T20}(\pi/6) \cdot (I) - K_{T30}(\pi/6) \cdot (-I) \\ &= \frac{3}{4} K_T I \end{aligned} \quad 6.55$$

Moteur linéaire

$$F_{em[\min]} = \frac{3}{4} K_F I$$

La valeur maximum du couple (force) est donnée pour $\vartheta_e = k \cdot \pi/3$.

Moteur rotatif

$$\begin{aligned} T_{em[\max]} &= -K_T(0) \cdot (-I) - K_T(0) \cdot (I) - K_T(0) \cdot (-I) \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2} K_T I \end{aligned} \quad 6.56$$

Moteur linéaire

$$F_{em[\max]} = \frac{\sqrt{3}}{2} K_F I$$

L'ondulation de couple (force), en valeur relative vaut donc

Moteur rotatif

$$\frac{\Delta T_{em}}{T_{em}} = \frac{T_{em[\max]} - T_{em[\min]}}{T_{em}} \cdot 100 = \frac{2 - \sqrt{3}}{6} \pi \cdot 100 = 14\% \quad 6.57$$

Moteur linéaire

$$F_{em[\max]} = \frac{F_{em[\max]} - F_{em[\min]}}{F_{em}} \cdot 100 = 14\%$$

Pour des formes de distributions non sinusoïdales, les calculs doivent être conduits de la même manière.

6.3.7 Modèle du moteur et du capteur pour un couplage triangle

A partir des paragraphes § 6.3.6.1 et 6.3.6.2 il est possible de construire un modèle pour le moteur et son capteur. Les grandeurs apparaissant dans les blocs représentant les phases correspondent aux valeurs mesurées (R_m et L_m). Les distributions des constantes de couple (force) et de tensions induites sont identiques à celles de phases.

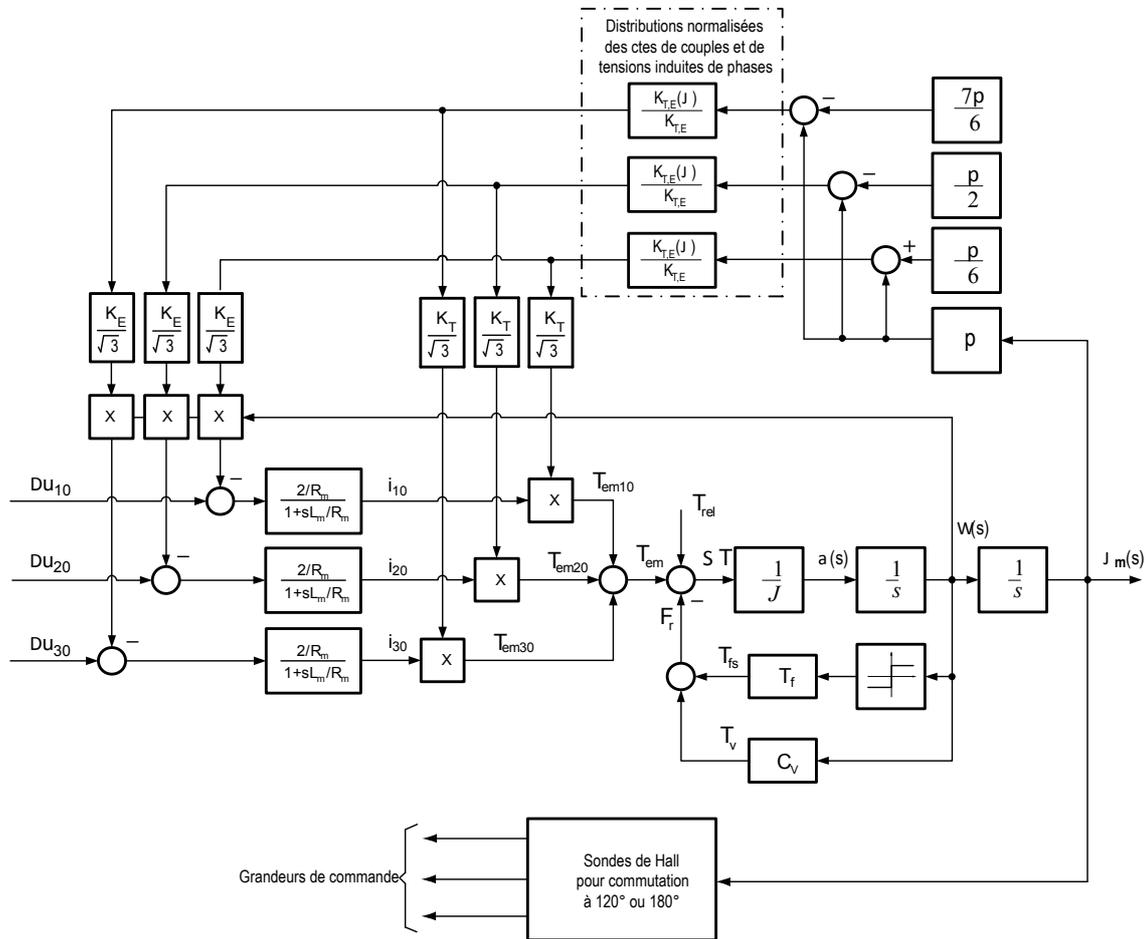


Figure 6-26 : Modèle du moteur pour un couplage triangle

Le choix du déphasage entre tensions induites composées et signaux des sondes de Hall définissent le type de commutation (120° ou 180°).

Le tableau ci-dessous fait la synthèse des résultats obtenus dans cette section.

Paramètres	Type de commutation	
	180°	120°
Déphasage entre sondes de Hall et tensions induites de phases	$-\pi/6$	0
Couple rapporté au couple (force) produit par une phase (K_{Tf} ou K_{Fl})	$\frac{3\sqrt{3}}{2\pi}$	$\frac{3}{\pi}$
Ondulation relative de couple	14%	14%
Valeur de la résistance entre bornes	$2/3R$	$2/3R$
Valeur de l'inductance entre bornes	$2/3(L-M)$	$2/3(L-M)$

6.4 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

6.4.1 Résistance et inductance

En principe les fabricants de moteurs donnent, dans leurs fiches de caractéristiques (data sheets), les valeurs des résistances et des inductances mesurables entre deux bornes. Si ces valeurs ne sont pas données, elles sont faciles à mesurer.

6.4.2 Amplitude des distributions des constantes de tensions induites

L'amplitude des distributions des constantes de tensions induites correspond aux rapports entre l'amplitude des tensions induites mesurées entre deux bornes du moteur et la vitesse mécanique.

- Pour un couplage étoile les tensions induites correspondent aux tensions composées.
- Pour un couplage triangle, les tensions induites correspondent aux tensions de phases.

Le rapport entre l'amplitude des tensions induites de phases et tensions induites composées dépend de la forme des distributions. Pour des distributions de forme sinusoïdale, l'amplitude des tensions induites composées est $\sqrt{3}$ fois plus grande que l'amplitude des tensions induites de phases

6.4.3 Amplitude des distributions des constantes de couple (force)

L'amplitude des distributions des constantes de couple (force) correspond aux rapports entre le couple (force) électromagnétique et l'amplitude des courants injectés dans le moteur.

- Pour un couplage étoile les courants de lignes correspondent aux courants de phases.
- Pour un couplage triangle, les courants de lignes ne sont pas égaux aux courants de phases.

Pour des distributions de forme sinusoïdale, le couple (force) électromagnétique pour des amplitudes de courants identiques est $\sqrt{3}$ fois plus grand pour le couplage étoile

6.4.4 Modèles de simulation

Les modèles de simulation sont identiques pour les deux types de couplage. Pour le couplage étoile on travaille avec les grandeurs de phases alors que pour le couplage triangle ce sont les grandeurs composées qui sont utilisées.

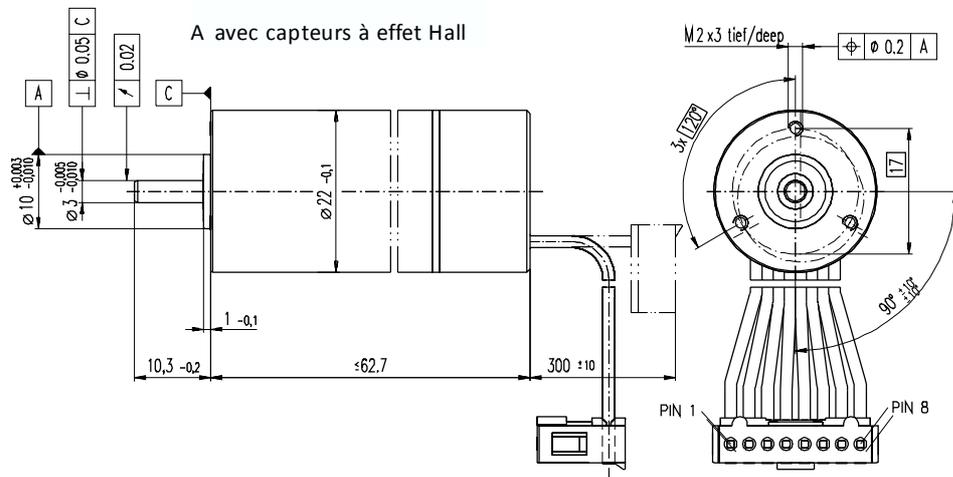
6.5 ANALYSE DES CARACTÉRISTIQUES D’UN MOTEUR À COMMUTATION ÉLECTRONIQUE.

6.5.1 Introduction

Les fabricants de moteurs désignent leur moteur sous une appellation qui tient compte non seulement du moteur mais également du capteur. Par exemple, la société Maxon propose des moteurs triphasés AC à aimants permanents dont le bobinage statorique est de type rhombique. Les tensions induites de phases sont donc sinusoïdales. Ces moteurs, de petite taille peuvent être équipés par de capteur Hall ou de codeur optique, voir de résoudre. Il est donc possible de les utiliser soit comme des moteurs AC sans collecteur (AC Brushless motors) ou des moteurs DC sans collecteur (DC brushless motors).

Maxon propose des couplages étoile ou triangle pour les enroulements statoriques. Les caractéristiques données par le fabricant sont illustrées à la Figure 6-27.

EC 22 Ø22 mm, à commutation électronique, 50 Watt



		Couplage en étoile		Couplage en triangle	
		167129	199533	167130	199534
Caractéristiques moteur					
1	Puissance conseillée	W	50	50	50
2	Tension nominale	Volt	32.0	32.0	32.0
3	Vitesse à vide ¹⁾	tr / min	22400	27000	38800
4	Couple de démarrage ¹⁾	mNm	400	332	693
5	Pente vitesse / couple ¹⁾	tr / min / mNm	56	81	56
6	Courant à vide ¹⁾	mA	117	91	304
7	Résistance aux bornes (phase-phase)	Ohm	1.09	1.09	0.36
8	Vitesse limite	tr / min	50000	50000	50000
9	Courant permanent max. à 10 000 tr / min ¹⁾	A	2.80	2.80	4.90
10	Couple permanent max. à 10 000 tr / min	mNm	33.6	27.8	34.0
11	Rendement max. ¹⁾	%	88	89	89
12	Constante de couple	mNm / A	13.6	11.3	7.9
13	Constante de vitesse	tr / min / V	702	845	1216
14	Constante de temps mécanique	ms	2.5	2.6	2.5
15	Inertie du rotor	gcm ²	4.2	3.1	4.2
16	Inductivité (phase-phase)	mH	0.147	0.149	0.049
17	Résistance therm. carcasse / air ambiant	K / W	7.0	7.0	7.0
18	Résistance therm. bobinage / carcasse	K / W	1.0	1.0	1.0
19	Constante de temps thermique du bobinage	s	5.4	5.4	5.4
20	Constante de temps thermique stator	s	323	323	323

Couplage en étoile

Couplage en triangle

Figure 6-27 : Extrait des caractéristiques électriques d'un moteur EC Maxon

6.6 VÉRIFICATIONS DES CARACTÉRISTIQUES POUR UN COUPLAGE ÉTOILE

Le moteur est commandé avec une commutation à 120°.

6.6.1 Puissance conseillée $P_n=50W$

La puissance conseillée correspond aux conditions de fonctionnement nominales permanentes. Dans le calcul suivant il n'est pas pris en compte les pertes fer qui augmentent avec le courant et la vitesse. On admet que le point de fonctionnement nominal correspond à couple permanent maximum à 10'000 t/min et par conséquent avec le courant permanents maximum.

$$P_n = T_n \Omega_n + R_m I_n^2 = 33.6 \cdot 10^{-3} \cdot 10'000 \frac{2\pi}{60} + 1.09 \cdot 2.8^2 = 44 [W] \quad 6.58$$

6.6.2 Vitesse à vide $\Omega_0=22'400$ t/min

La vitesse à vide est liée à la tension d'alimentation.

$$\Omega_0 = \frac{U}{K_E} = 32 \cdot 702 = 22'460 [t/min] \quad 6.59$$

6.6.3 Pente vitesse couple : 56 [t/min/mNm]

La puissance électrique est donnée par la relation

$$P_e = U \cdot I = U \cdot \frac{T_{em}}{K_{T120^\circ}} = T_{em} \cdot \Omega + R_m I^2 = T_{em} \cdot \Omega + R_m \left(\frac{T_{em}}{K_{T120^\circ}} \right)^2 \quad 6.60$$

De cette expression on peut déterminer la vitesse en fonction du couple

$$\begin{aligned} n = \Omega \frac{60}{2\pi} &= - \frac{R_m}{K_{T120^\circ}^2} \frac{60}{2\pi} T_{em} + \frac{U}{K_{T120^\circ}} \frac{60}{2\pi} \\ &= - \underbrace{\frac{1.09}{(13.6 \cdot 10^{-3})^2} \frac{60}{2\pi} T_{em}}_{56 [t/min/mNm]} + \underbrace{\frac{32}{13.6 \cdot 10^{-3}} \frac{60}{2\pi}}_{22460 [t/min]} \end{aligned} \quad 6.61$$

6.6.4 Couple de démarrage $T_{dem}=400mNm$

Le couple de démarrage est directement proportionnel au courant. A l'arrêt ce dernier n'est limité que par la tension d'alimentation et la résistance de deux phases en série (résistance mesurée entre deux bornes).

$$T_{dem} = K_{TY120^\circ} I = K_{TY120^\circ} \frac{U}{R_m} = 13.6 \frac{32}{1.09} = 399 [mNm] \quad 6.62$$

6.6.5 Courant à vide

Le courant à vide permet de définir les pertes fer et les pertes par frottement lorsque le moteur tourne sans charge.

$$P_{perte} = K_{TY120^\circ} I_0 \Omega_0 = 13.6 \cdot 10^{-3} 117 \cdot 10^{-3} \cdot 22400 \frac{2\pi}{60} = 3.7 [W] \quad 6.63$$

6.6.6 Résistance entre deux bornes

La résistance mesurée entre deux bornes permet de définir la résistance de phase.

$$R = \frac{1}{2} R_m = \frac{1}{2} 1.09 = 0.545 [\Omega] \quad 6.64$$

6.6.7 Couple permanent maximum 33mNm

Le couple permanent maximum est lié au courant permanent maximum (limité pour des raisons thermique) et à la constante de couple.

$$T_{permanent \max} = K_{TY120^\circ} I_{permanent \max} = 13.6 \cdot 2.8 = 38 [mNm] \quad 6.65$$

La valeur donnée par le fabricant est de 33mNm. La différence provient des couples de frottement.

6.6.8 Constante de couple de phase

La constante de couple de phase K_T pour une distribution sinusoïdale, un couplage étoile et une commutation à 120° est donnée par la relation

$$K_T = \frac{\pi}{3\sqrt{3}} K_{TY120^\circ} = \frac{\pi}{3\sqrt{3}} 13.6 = 8.22 [mNm / A] \quad 6.66$$

6.6.9 Constante de tension induite de phase

La constante de tension induite de phase pour une distribution sinusoïdale, un couplage étoile et une commutation à 120° est donnée par la relation

$$K_E = \frac{1}{\sqrt{3}} K_{EY120^\circ} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{1}{702} \frac{60}{2\pi} = 7.9 [mVs / rad] \quad 6.67$$

Les constantes de couple et de tension induite sont à peu près égales. La différence provient de la valeur moyenne effectuée sur la constante de couple. En effet, on a

$$K_{EY120} = \frac{1}{702} \frac{60}{2\pi} = 13.6 \cdot 10^{-3} = K_{TY120} \quad 6.68$$

6.6.10 Constante de temps mécanique $T_m=2.5ms$

La constante de temps mécanique est calculée pour un saut unité de la tension d'alimentation. On peut donc écrire l'équation de mouvement:

$$J \frac{\partial \Omega}{\partial t} = T = K_{TY120^\circ} I = K_{TY120^\circ} \frac{U - U_i}{R_m} = \frac{K_{TY120^\circ}}{R_m} (U - K_{EY120^\circ} \Omega) \quad 6.69$$

Après quelques calculs

$$U = \frac{JR_m}{K_{TY120^\circ}} \frac{\partial \Omega}{\partial t} + K_{EY120^\circ} \Omega \quad 6.70$$

Finalement on obtient par analogie avec un circuit RL

$$\Omega = \frac{U}{K_{EY120^\circ}} \left(1 - e^{-t / \frac{JR_m}{K_{TY120^\circ} K_{EY120^\circ}}} \right) + \Omega(0) e^{-t / \frac{JR_m}{K_{TY120^\circ} K_{EY120^\circ}}} \quad 6.71$$

La constante de temps mécanique vaut donc

$$T_m = \frac{JR_m}{K_{TY120^\circ} K_{EY120^\circ}} = \frac{4.2 \cdot 10^{-7} \cdot 1.09}{(13.6 \cdot 10^{-3})^2} = 2.5 \text{ [ms]} \quad 6.72$$

6.6.11 Inductance entre deux bornes

L'inductance mesurée entre deux bornes permet de définir l'inductance de phase

$$L = \frac{1}{2} L_m = \frac{1}{2} 0.147 = 0.073 \text{ [mH]} \quad 6.73$$

6.6.12 Température de fonctionnement du moteur

On admet que les pertes Joules sont principalement dues aux résistances du bobinage. Ces dernières sont connues en fonction de la température

$$R_m(T) = R_m(25^\circ\text{C})(1 + \alpha_{Cu}(T - 25^\circ\text{C})) \quad 6.74$$

Avec $\alpha_{Cu} = 3.92 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{K}$

La différence de température entre le bobinage et la température ambiante, lorsque le système est stabilisé, est donnée par la relation générale

$$T_{Bob} - T_A = (R_{BC} + R_{CA}) P_J = (R_{BC} + R_{CA}) R_m I^2 \quad 6.75$$

En tenant compte de la valeur de la résistance à 25°C, on obtient l'élévation de température suivante :

$$T_{Bob} - T_A = \frac{(R_{BC} + R_{CA}) R_m(25^\circ\text{C}) I^2}{1 - \alpha_{Cu} (R_{BC} + R_{CA}) R_m(25^\circ\text{C}) I^2} \quad 6.76$$

Pour le courant maximum permanent, la température du bobinage vaut :

$$T_{Bob} = \frac{(15.6 + 1.8) \cdot 1.09 \cdot (2.8)^2}{1 - 3.92 \cdot 10^{-3} (15.6 + 1.8) \cdot 1.09 \cdot (2.8)^2} + 25^\circ\text{C} = 118^\circ\text{C} \quad 6.77$$

6.7 VÉRIFICATIONS DES CARACTÉRISTIQUES POUR UN COUPLAGE TRIANGLE

Le moteur est commandé avec une commutation à 120° .

Les calculs se conduisent de la même manière que pour le couplage étoile. Les résistances R , inductances L , constantes de tensions induites K_E et constantes de couple K_T de phases peuvent être comparées entre les deux types de couplage. Les enroulements étant les mêmes, ses grandeurs sont égales.

Bibliographie

- [1] **TRAITE D'ELECTRICITE**
ELECTROMECHANIQUE
Volume IX
Auteur : Prof. Marcel Jufer
ISBN 2-88074-285-4

- [2] **MAGNA PHYSICS PUBLICATIONS – OXFORD SCIENCE PUBLICATION**
DESIGN OF BRUSHLESS PERMANENT – MAGNET MOTORS
Auteurs : J.R. Hendershot □ and Tje Miller
ISBN 1-881855-03-1

- [3] **ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE**
ENTRAINEMENTS ELECTRIQUES II
Auteur : Dr Nicolas Wavre

- [4] **CATALOGUE**
MAXON 03/04
Maxon motor AG
www.maxonmotor.com

ANNEXE

A.1 EXTRAIT DU CATALOGUE MAXON 03/04