
Systemes électromécaniques

Chapitre 05 ***MOTEURS SYNCHRONES À AIMANTS PERMANENTS*** ***DC sans collecteur***



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

PAGE

5. LES MOTEURS DC SANS COLLECTEUR.....	1
5.1 INTRODUCTION.....	1
5.2 COUPLAGE MAGNÉTIQUE ENTRE ROTOR ET STATOR.....	1
5.2.1 Généralités.....	1
5.2.2 Forme des distributions des constantes de tensions induites et flux mutuels.....	1
5.2.2.1 Distribution des constantes de tensions induites triangulaires.....	1
5.2.2.2 Distribution des constantes de tensions induites trapézoïdales.....	3
5.2.2.3 Distribution des constante de tensions induites rectangulaire.....	4
5.2.2.4 Distribution des constantes de tensions induites sinusoïdales.....	6
5.3 MOTEURS DC SANS COLLECTEUR BIPHASÉS.....	7
5.3.1 Généralités.....	7
5.3.2 Commutation à 90°.....	7
5.3.2.1 Moteur et capteur de commutation.....	7
5.3.2.2 Forme des tensions de phases et calage du capteur de commutation.....	8
5.3.2.3 Commande en courant en boucle fermée.....	8
5.3.2.4 Représentation vectorielle.....	9
5.3.2.5 Commande en tension en boucle fermée.....	10
5.3.3 Commutation à 180°.....	10
5.3.3.1 Moteur et capteur de commutation.....	10
5.3.3.2 Forme des tensions de phases et calage du capteur de commutation.....	11
5.3.3.3 Commande en courant en boucle fermée.....	11
5.3.3.4 Représentation vectorielle.....	12
5.3.3.5 Commande en tension en boucle fermée.....	14
5.4 MOTEURS DC SANS COLLECTEUR TRIPHASÉS.....	15
5.4.1 Généralités.....	15
5.4.2 Commutation à 120°.....	15
5.4.2.1 Moteur et capteur de commutation.....	15
5.4.2.2 Forme des tensions de phases et calage du capteur de commutation.....	16
5.4.2.3 Commande en courant en boucle fermée.....	16
5.4.2.4 Représentation vectorielle.....	17
5.4.2.5 Commande en tension en boucle fermée.....	19
5.4.3 Commutation à 180°.....	20
5.4.3.1 Moteur et capteur de commutation.....	20
5.4.3.2 Forme des tensions de phases et calage du capteur de commutation.....	20
5.4.3.3 Commande en courant en boucle fermée.....	21
5.4.3.4 Représentation vectorielle.....	22
5.4.3.5 Commande en tension en boucle fermée.....	23
5.5 EXEMPLE DE RÉALISATION.....	24
5.5.1 Moteur DC sans collecteur triphasé à rotor extérieur.....	24
5.5.1.1 Description générale.....	24
5.5.2 Caractéristiques électriques.....	25
5.5.2.1 Résistances de phases.....	25
5.5.2.2 Inductances de phases.....	25
5.5.2.3 Tensions induites de phases.....	25
5.5.3 Relation entre signaux du capteur Hall et tensions induites.....	26

Bibliographie

5. LES MOTEURS DC SANS COLLECTEUR

5.1 INTRODUCTION

Ces moteurs sont des moteurs synchrones à aimants permanents dont **les tensions induites de mouvement sont de formes triangulaires, trapézoïdales ou rectangulaires**. De telles formes permettent une limitation des ondulations de couple ou de force pour des courants de phases rectangulaires. Grâce à cette possibilité, le capteur de position donnant la position relative entre la partie mobile (rotor) et la partie fixe (stator) ne doit plus être riche en résolution puisque les courants de phases sont maintenus constants sur 90, 120 voire 180 degrés électriques. La simplicité du capteur permet, pour de nombreuses applications, de réduire sensiblement le prix de l'ensemble moteur – capteur.

Ce chapitre est la suite logique du chapitre 4 du cours de Mécatronique I, soit « *Les moteurs synchrones à aimants permanents AC sans collecteur* ». Si les moteurs AC sans collecteur peuvent être étudiés par une approche analytique simple, ce n'est plus le cas des moteurs DC sans collecteur. L'utilisation d'outils de simulation devient donc un moyen efficace pour déterminer le comportement dynamique de ces moteurs. Comme pour le chapitre 4, les commandes en courant et en tension seront abordées.

5.2 COUPLAGE MAGNÉTIQUE ENTRE ROTOR ET STATOR

5.2.1 Généralités

Le couplage magnétique rotor – stator est déterminé par le flux mutuel aimants – bobinage statorique. Ce couplage peut être facilement connu par une mesure de la tension induite de mouvement à vitesse constante.

5.2.2 Forme des distributions des constantes de tensions induites et flux mutuels

Lorsque l'on parle de la forme des distributions des constantes de tensions induites (pour un moteur rotatif : $K_E(\vartheta_m)$, pour un moteur linéaire $K_E(x)$), on définit implicitement les distributions des constantes de couple $K_T(\vartheta_m)$, respectivement de force $K_F(x)$. Il est démontré plus loin dans ce chapitre que trois formes de tensions induites peuvent être retenues pour avoir des ondulations de couple, respectivement de force, pour un point de fonctionnement donné aussi faibles que possible.

5.2.2.1 Distribution des constantes de tensions induites triangulaires

5.2.2.1.1 Cas idéal

La forme analytique de la tension induite triangulaire à vitesse de déplacement constante est directement donnée par la distribution de la constante de tension induite $K_E(\vartheta_e)$

$$K_E(\vartheta_e) = K_E \frac{2}{\pi} \arcsin(-\sin(\vartheta_e)) \quad 5.1$$

Cette forme correspond à un flux mutuel rotor – stator (flux crée par les aimants au rotor couplé à la phase statorique considérée) dont la distribution normalisée est donnée par

$$\phi_{Sr}(\vartheta_e) = \frac{\phi_{Sr}(0)}{K_E} \int_0^{2\pi} K_E(\vartheta_e) + \phi_{Sr}(0) \quad 5.2$$

avec $\phi_{Sr}(0)$: Amplitude de la distribution du flux mutuel rotor - stator
 K_E : Amplitude de la distribution de la cte de tension induite de mouvement

La Figure 5-1 illustre les formes des distributions de flux et de constante de tension induite de mouvement. On voit que le flux est une fonction quadratique en fonction de ϑ_e .

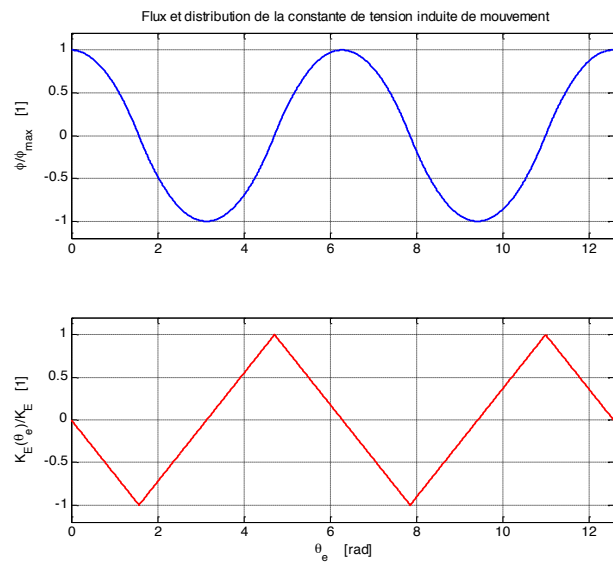


Figure 5-1 : Formes des distributions du flux et de la constante de tension induite (cas idéal)

5.2.2.1.2 Cas réel

En pratique, il n'est pas possible de créer une forme de tension induite triangulaire. La forme réelle se présente sous la forme d'un triangle dont les sommets sont arrondis. Si les exigences sur l'ondulation de couple, respectivement de force l'imposent, il est possible de réaliser un point d'inflexion de la tension induite au passage par zéro. Pour ce faire il faut maîtriser les amplitudes des harmoniques suivantes :

$$K_E(\vartheta_e) = \sum_{k=1}^n K_E^{[k]} \sin(k\vartheta_e) \quad \left\{ \begin{array}{l} K_E^{[1]} = -0.855, \\ K_E^{[3]} = -0.138, \\ K_E^{[7]} = -0.024 \end{array} \right. \quad 5.3$$

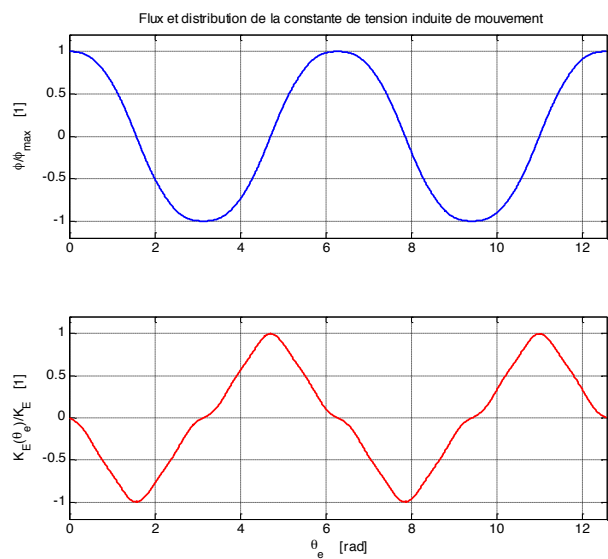


Figure 5-2 : Formes des distributions du flux et de la constante de tension induite (cas idéal)

La Figure 5-2 illustre les formes des distributions de flux et de constante de tension induite de mouvement

5.2.2.2 Distribution des constantes de tensions induites trapézoïdales

5.2.2.2.1 Cas idéal

La forme analytique de la tension induite trapézoïdale à vitesse de déplacement constante est directement donnée par la distribution de la constante de tension induite $K_E(\vartheta_e)$

$$K_E(\vartheta_e) = \begin{cases} -K_E \frac{\alpha}{\pi} \vartheta_e & \text{pour } -\frac{1}{\alpha}\pi \leq \vartheta_e < \frac{1}{\alpha}\pi \\ -K_E & \text{pour } \frac{1}{\alpha}\pi \leq \vartheta_e < \frac{\alpha-1}{\alpha}\pi \\ +K_E \alpha \left(\frac{\vartheta_e}{\pi} - 1 \right) & \text{pour } \frac{\alpha-1}{\alpha}\pi \leq \vartheta_e < \frac{\alpha+1}{\alpha}\pi \\ +K_E & \text{pour } \frac{\alpha+1}{\alpha}\pi \leq \vartheta_e < \frac{2\alpha-1}{\alpha}\pi \end{cases} \quad 5.4$$

Les limites de α sont directement liées au type de moteur. Pour un moteur biphasé $\alpha \geq 4$ alors que pour un moteur triphasé $\alpha \geq 6$. La justification de ces limitations est donnée plus loin dans ce chapitre.

Le flux mutuel rotor – stator correspondant à cette forme de distribution de la constante de tension induite est donné par la relation 5.2.

La distribution du flux est donc une succession de formes quadratiques et linéaires (triangle avec sommets arrondis)

La Figure 5-1 illustre les formes des distributions de flux et de constante de tension induite de mouvement

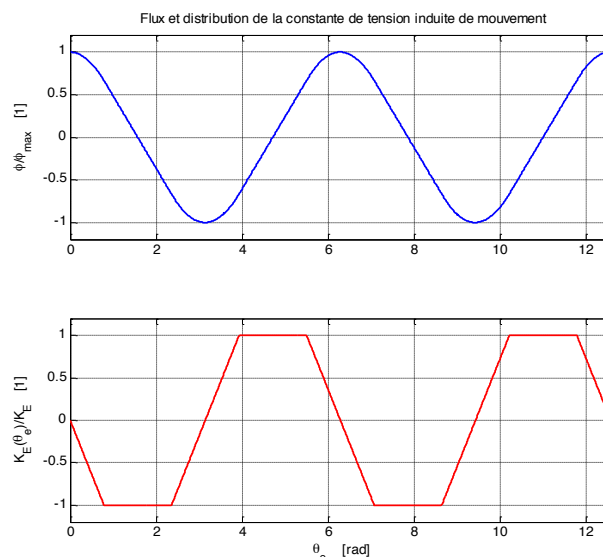


Figure 5-3 : Formes des distributions du flux et de la constante de tension induite (cas idéal)

5.2.2.2.2 Cas réel

La forme réelle se présente sous la forme d'un trapèze dont les angles sont arrondis. Pour ce faire il faut maîtriser les amplitudes des harmoniques suivantes :

$$K_E(\vartheta_e) = \sum_{k=1}^n K_E^{[k]} \sin(k\vartheta_e) \quad \left\{ \begin{array}{l} K_E^{[1]} = -1.103, \\ K_E^{[3]} = -0.089, \\ K_E^{[5]} = 0.018 \end{array} \right. \quad 5.5$$

La Figure 5-4 illustre les formes des distributions de flux et de constante de tension induite de mouvement.

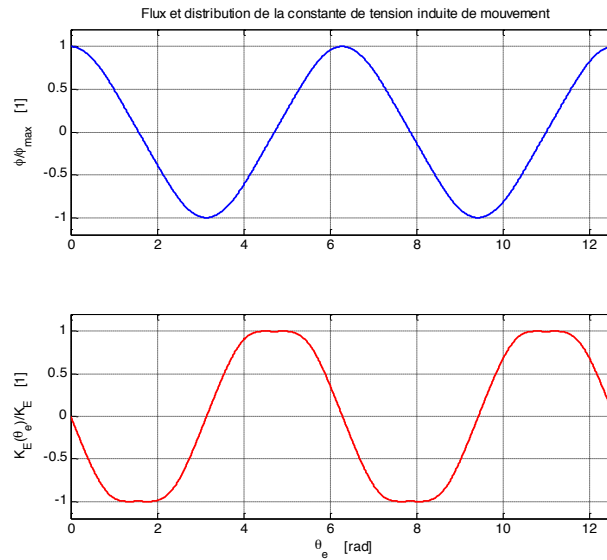


Figure 5-4 : Formes des distributions du flux et de la constante de tension induite (cas idéal)

5.2.2.3 Distribution des constante de tensions induites rectangulaire

5.2.2.3.1 Cas idéal

La forme analytique de la tension induite rectangulaire à vitesse de déplacement constante est directement donnée par la distribution de la constante de tension induite $K_E(\vartheta_e)$

$$K_E(\vartheta_e) = \begin{cases} 0 & \text{pour } -\frac{1}{\alpha}\pi \leq \vartheta_e < \frac{1}{\alpha}\pi \\ -K_E & \text{pour } \frac{1}{\alpha}\pi \leq \vartheta_e < \frac{\alpha-1}{\alpha}\pi \\ 0 & \text{pour } \frac{\alpha-1}{\alpha}\pi \leq \vartheta_e < \frac{\alpha+1}{\alpha}\pi \\ +K_E & \text{pour } \frac{\alpha+1}{\alpha}\pi \leq \vartheta_e < \frac{2\alpha-1}{\alpha}\pi \end{cases} \quad 5.6$$

Cette forme correspond à un flux mutuel rotor – stator (flux crée par les aimants au rotor couplé à la phase statorique considérée) dont la distribution normalisée est donnée par la relation 5.2.

La Figure 5-5 illustre les formes des distributions de flux et de constante de tension induite de mouvement

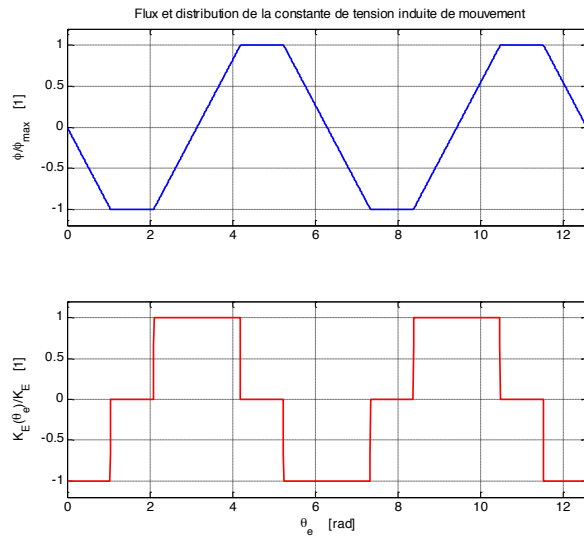


Figure 5-5 : Formes des distributions du flux et de la constante de tension induite (cas idéal)

5.2.2.3.2 Cas réel

Une distribution rectangulaire de la tension induite n'est pas réalisable en pratique. Par contre, en maîtrisant les amplitudes des harmoniques 1, 5, 7, 11, il est possible d'obtenir une distribution approchée dont les caractéristiques sont suffisantes pour la plupart des applications.

$$K_E(\vartheta_e) = \sum_{k=1}^n K_E^{[k]} \sin(k\vartheta_e) \quad \left\{ \begin{array}{l} K_E^{[1]} = -1.0799 \\ K_E^{[5]} = +0.1365 \\ K_E^{[7]} = +0.0579 \\ K_E^{[11]} = -0.0040 \end{array} \right. \quad 5.7$$

La Figure 5-6 illustre les formes des distributions de flux et de constante de tension induite de mouvement

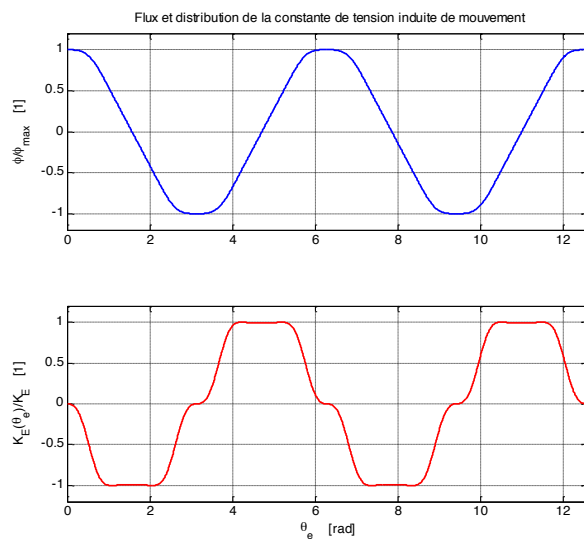


Figure 5-6 : Formes des distributions du flux et de la constante de tension induite (cas idéal)

5.2.2.4 Distribution des constantes de tensions induites sinusoïdales

Cette forme de tension induite ne convient en principe pas aux moteurs DC sans collecteur. En effet, l'utilisation de capteurs de commutation sous forme de sondes de Hall impose des courants de phases rectangulaires qui, pour des distributions sinusoïdales des constantes de couple, respectivement de force, provoquent des ondulations de couple importantes. Néanmoins, les fabricants de moteurs à bobinages rhombiques mettent à disposition des utilisateurs des moteurs AC sans collecteur avec intégration du capteur de commutation (sondes de Hall). Il y a ici un important compromis entre qualité de l'entraînement et coût de fabrication. Ces moteurs sont classés sur le nom de « *Moteurs à commutation électronique* ». La forme analytique de la tension induite sinusoïdale a vitesse de déplacement constante est directement donnée par la distribution de la constante de tension induite $K_E(\vartheta_e)$

$$K_E(\vartheta_e) = -\sin(\vartheta_e) \quad 5.8$$

Cette forme correspond à un flux mutuel rotor – stator (flux crée par les aimants au rotor couplé à la phase statorique considérée) dont la distribution normalisée est donnée par la relation 5.2.

$$\phi_{S_r}(\vartheta_e) = \phi_{S_r}(0)\cos(\vartheta_e) \quad 5.9$$

La Figure 5-5 illustre les formes des distributions de flux et de constante de tension induite de mouvement

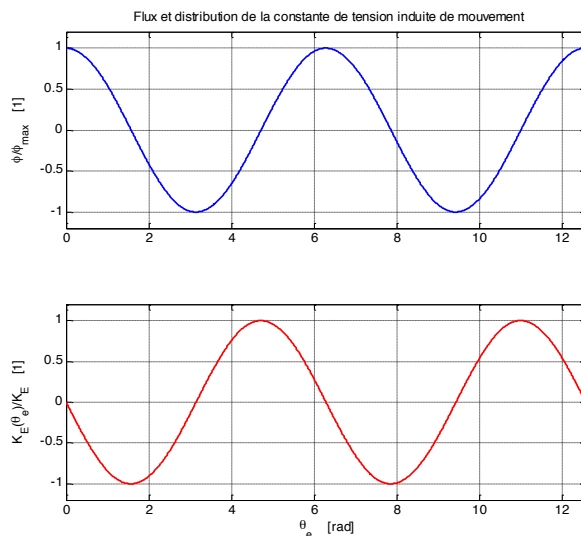


Figure 5-7 : Formes des distributions du flux et de la constante de tension induite (cas idéal)

5.3 MOTEURS DC SANS COLLECTEUR BIPHASÉS.

5.3.1 Généralités

Les moteurs biphasés ne sont pas symétriques du point de vue électrique, en effet on a

$$\begin{aligned}
 \text{Courants de phases} & : \sum_{k=1}^2 i_k \neq 0 \\
 \text{Tensions de phases} & : \sum_{k=1}^2 u_k \neq 0 \\
 \text{Tension induites de mouvement} & : \sum_{k=1}^2 u_{ik} \neq 0
 \end{aligned}
 \tag{5.10}$$

Sachant que les courants de phases sont de forme rectangulaire, ceci en raison du type de capteur utilisé pour la commutation, il s'agit de trouver les meilleures distributions des constantes de couple $K_T(\vartheta_m)$ ou de force $K_F(x)$ respectivement de tension induite $K_E(\vartheta_m)$ ou $K_E(x)$ pour avoir un couple respectivement une force avec le moins possible d'ondulation pour un point de fonctionnement donné. On entend par point de fonctionnement une vitesse constante et des amplitudes de courants de phases constantes.

Une simple observation du moteur montre que deux types de commutation se prêtent aux exigences sur l'ondulation de couple. Soit les commutations à 90° et à 180° . Le choix dépend de la forme de la distribution des constantes de tensions induites ou plus simplement des tensions induites mesurées à vitesse constante.

5.3.2 Commutation à 90°

5.3.2.1 Moteur et capteur de commutation

Les moteurs DC sans collecteur biphasés ont un capteur d'aide à la commutation en général sous la forme de sondes de Hall. Le capteur est placé à un endroit tel qu'il est possible de mesurer le champ d'induction magnétique produit par les aimants du rotor.

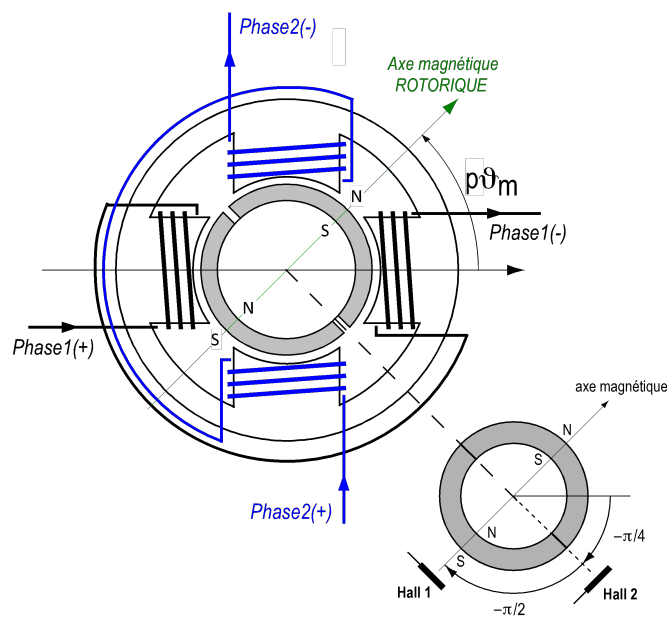


Figure 5-8 : Moteur biphasé avec capteur d'aide à la commutation

5.3.2.2 Forme des tensions de phases et calage du capteur de commutation

Les sondes de Hall sont placées de manière à ce que les signaux logiques qu'elles fournissent soient déphasés de $\pi/4$ par rapport aux tensions induites respectives.

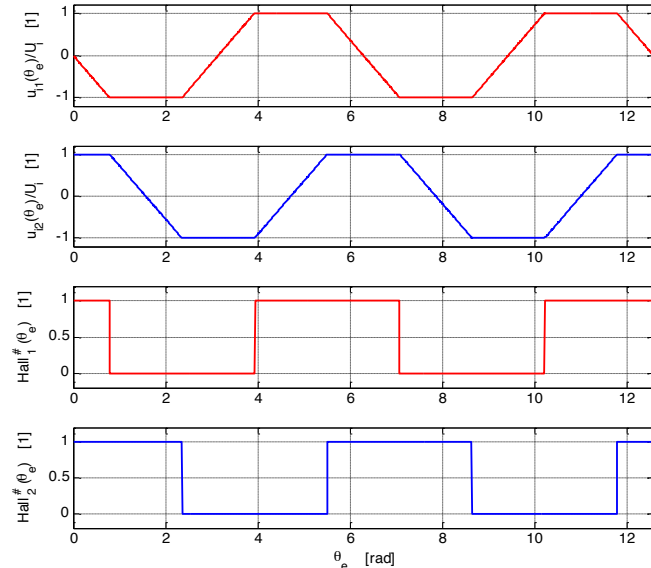


Figure 5-9 : Tensions induites de mouvement « rectangulaire »

5.3.2.3 Commande en courant en boucle fermée

Pour obtenir un couple indépendant de la position relative rotor – stator, les courants de phases ne doivent être présents que lorsque les tensions de phases respectives sont constantes. En se reportant à la relation générale 5.4, on voit que dans ce cas $\alpha=4$. En effet les tensions induites de phases sont constants sur un intervalle de $\pi/2$ et varie linéairement sur un intervalle de $\pi/2$ également.

Les courants de phases sont liés aux signaux des sondes de Hall par les relations suivantes :

$$i_1(\vartheta_e) = (Hall_1^{\#} - Hall_2^{\#})I \quad 5.11$$

$$i_2(\vartheta_e) = (Hall_1^{\#} - \overline{Hall_2^{\#}})I \quad 5.12$$

Le produit des courants de phases par les tensions induites de mouvement des phases respectives donne la puissance mécanique du moteur. Pour une vitesse constante, ce produit correspond, à une constante près, au couple ou à la force électromagnétique.

De la Figure 5-10, on obtient:

$$P_{el} = u_{i1}i_1 + u_{i2}i_2 = U_i I = P_{mec} \quad \begin{cases} \text{moteur rotatif} \xrightarrow{1/\Omega} T_{em} = K_T I \\ \text{moteur linéaire} \xrightarrow{1/v} F_{em} = K_F I \end{cases} \quad 5.13$$

La relation 5.13 montre que ce couple, ou cette force est indépendant de la position électrique donc également de la position mécanique.

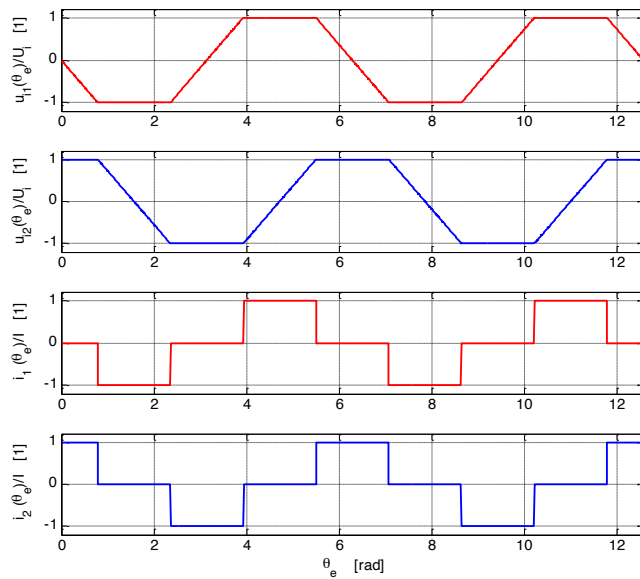


Figure 5-10 : Tensions induites de mouvement « rectangulaire »

5.3.2.3.1 Modèle de simulation

Pour la commutation à 90°, il est possible de définir un modèle de simulation liant la position mécanique aux courants de phases

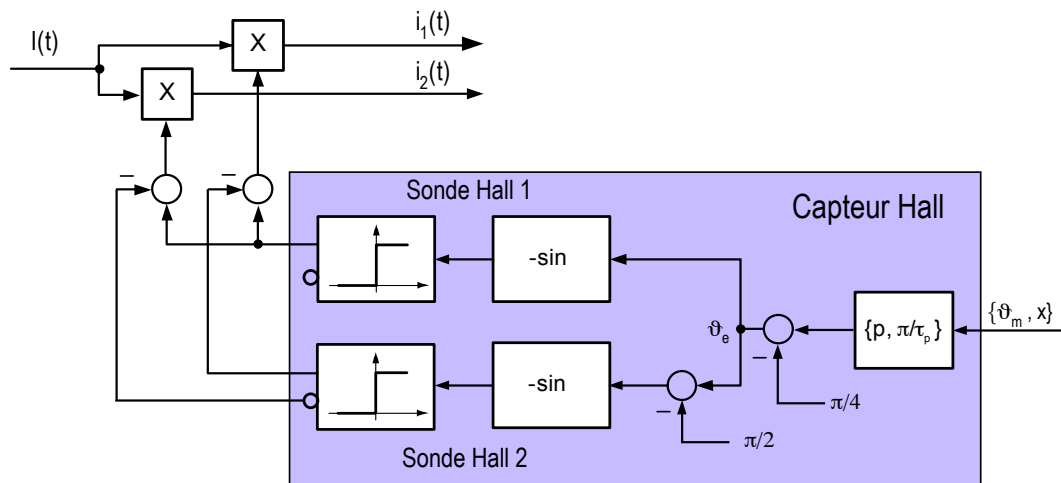


Figure 5-11 : Modèle de simulation pour la commutation à 90°

La modélisation du moteur est identique à celle vue au chapitre 4 du cours de mécatronique I « Les moteurs synchrones à aimants permanents AC sans collecteur ». Seules les distributions sinusoïdales des constantes de tensions induites de mouvement et des constantes de couple, respectivement de force sont différentes

5.3.2.4 Représentation vectorielle

La représentation vectorielle montre les couplages entre le flux crée par le rotor et les flux mutuels circulant dans les bobinages statoriques. Les lignes de couplage en traits continus correspondent aux positions de l'axe magnétique rotorique donnant une variation de flux mutuel linéaire (tension induite constante) en fonction de l'angle électrique θ_e . Au chapitre 4

du cours de mécatronique I, il a été dit que l'axe magnétique statorique doit être en avance de $\pi/2$ électrique sur l'axe magnétique rotorique. La zone ombrée de la Figure 5-12 (b) montre la plage de positions relatives rotor – stator pour laquelle le phaseur de courant correspond à

$$\underline{I}_{S2}(\vartheta_e) = Ie^{j\pi/2} \quad \text{pour} \quad \frac{7\pi}{4} \leq \vartheta_e < \frac{\pi}{4} \quad 5.14$$

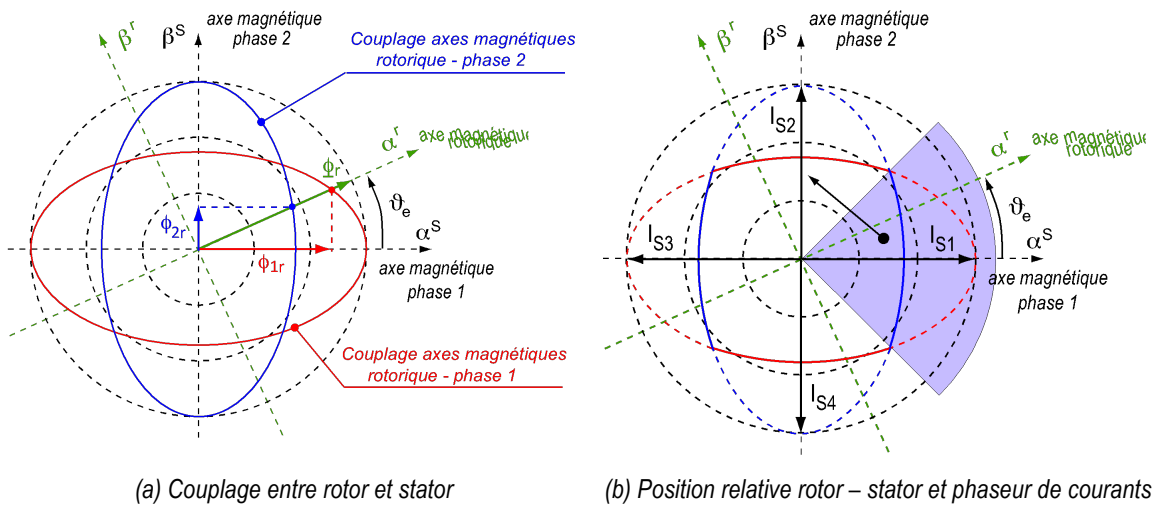


Figure 5-12 : Tensions induites de mouvement « rectangulaire »

Le phaseur des courants est limité à quatre éléments distincts, soit

$$\underline{I}_S(\vartheta_e) = \begin{cases} I_{S1} = I & \text{pour} \quad 5\pi/4 \leq \vartheta_e < 7\pi/4 \\ I_{S2} = Ie^{j\pi/2} & \text{pour} \quad 7\pi/4 \leq \vartheta_e < \pi/4 \\ I_{S3} = Ie^{j\pi} & \text{pour} \quad \pi/4 \leq \vartheta_e < 3\pi/4 \\ I_{S4} = Ie^{j3\pi/2} & \text{pour} \quad 3\pi/4 \leq \vartheta_e < 5\pi/4 \end{cases} \quad 5.15$$

5.3.2.5 Commande en tension en boucle fermée

Au lieu de commuter les courants dans les phases du moteur, il est possible de commuter les tensions aux bornes des phases. Dans ce cas, l'analyse du comportement du moteur devient complexe et nécessite une simulation numérique. La modélisation du moteur est identique à celle vue au chapitre 4 du cours de mécatronique I « *Les moteurs synchrones à aimants permanents AC sans collecteur* ». Les distributions des constantes de tensions induites, de couple, respectivement de force et le capteur de position relative rotor – stator sont à redéfinir en accord avec les caractéristiques du moteur DC sans collecteur étudié.

5.3.3 Commutation à 180°

5.3.3.1 Moteur et capteur de commutation

Les moteurs DC sans collecteur biphasé ont un capteur d'aide à la commutation en général sous la forme de sondes de Hall.

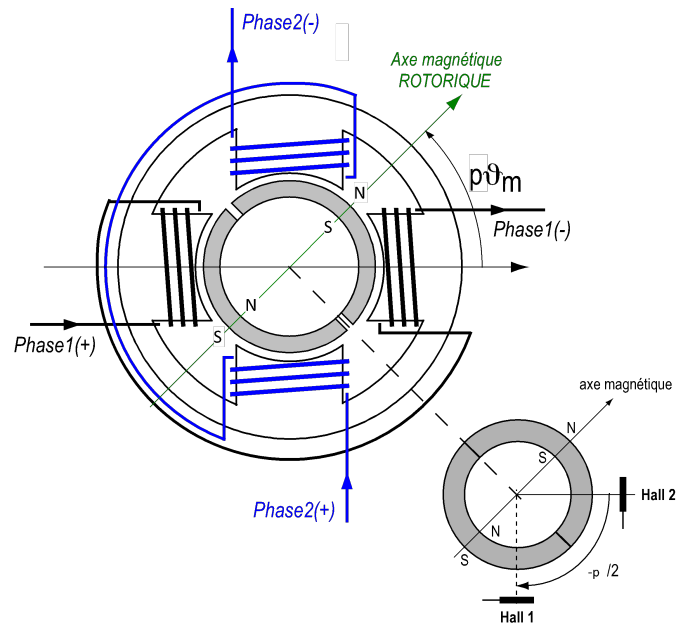


Figure 5-13 : Moteur biphasé avec capteur d'aide à la commutation

5.3.3.2 Forme des tensions de phases et calage du capteur de commutation

Les sondes de Hall placées de manière à ce que les signaux logiques qu'elles fournissent soient en phase avec les tensions induites respectives.

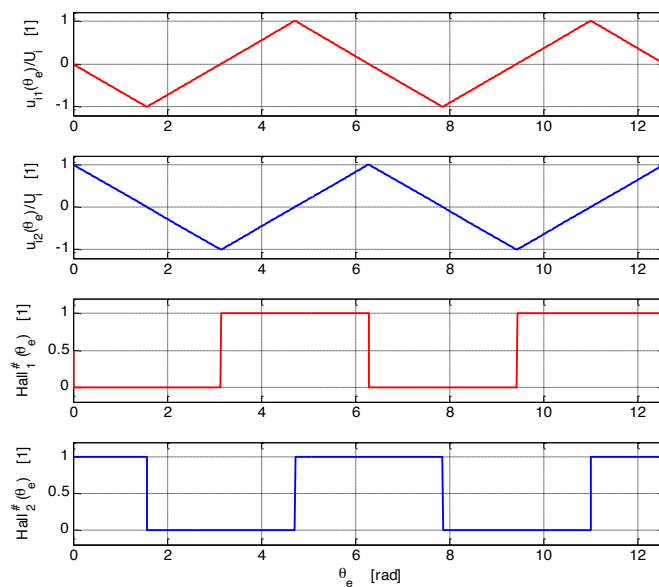


Figure 5-14 : Tensions induites de mouvement « triangulaire »

5.3.3.3 Commande en courant en boucle fermée

Pour obtenir un couple indépendant de la position relative rotor – stator, les courants de phases doivent être de forme rectangulaire et en phase avec les tensions induites de mouvement des phases respectives.

On voit donc que les courants de phases sont liés aux équations suivantes

$$i_1(\vartheta_e) = 2(Hall_1^\# - \frac{1}{2})I \quad 5.16$$

$$i_2(\vartheta_e) = 2(Hall_2^\# - \frac{1}{2})I \quad 5.17$$

La somme des produits des courants de phases par les tensions induites de mouvement des phases respectives donne la puissance mécanique du moteur. Pour une vitesse constante, cette somme de produits correspond au couple ou à la force électromagnétique. La relation 5.18 montre que ce couple, ou cette force est indépendant de la position électrique donc également la position mécanique.

De la Figure 5-15, on obtient :

$$P_{el} = u_{i1}i_1 + u_{i2}i_2 = U_i I = P_{mec} \quad \begin{cases} \text{moteur rotatif} \xrightarrow{1/\Omega} T_{em} = K_T I \\ \text{moteur linéaire} \xrightarrow{1/v} F_{em} = K_F I \end{cases} \quad 5.18$$

La relation 5.18 montre que ce couple, ou cette force est indépendant de la position électrique donc également la position mécanique.

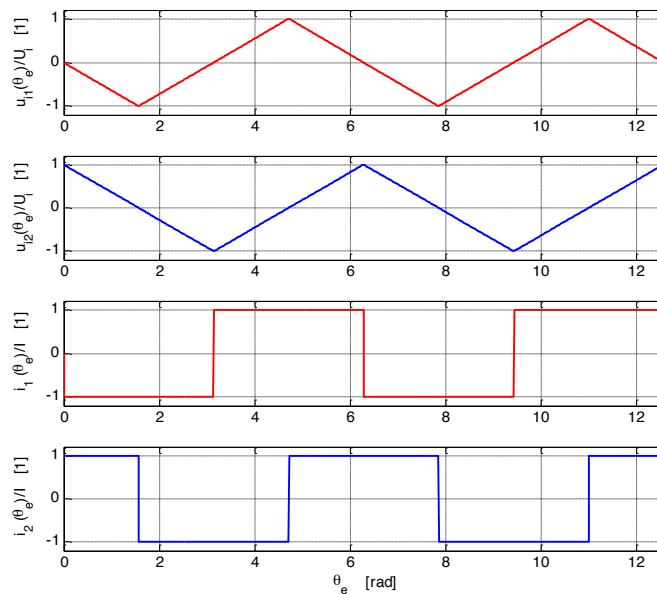


Figure 5-15 : Tensions induites de mouvement « rectangulaire »

5.3.3.4 Représentation vectorielle

La représentation vectorielle montre les couplages entre le flux créé par le rotor et les flux mutuels circulant dans les bobinages statoriques. Les lignes de couplage en traits continus correspondent aux positions de l'axe magnétique rotorique donnant une variation de flux mutuel linéaire (tension induite constante) en fonction de l'angle électrique ϑ_e . Au chapitre 4 du cours de mécatronique I, il a été dit que l'axe magnétique statorique doit être en avance de $\pi/2$ électrique sur l'axe magnétique rotorique. La zone ombrée de la Figure 5-16 (b) montre la plage de positions relatives rotor – stator pour laquelle le phaseur de courant correspond à

$$\underline{I}_{S2}(\vartheta_e) = I e^{j3\pi/4} \quad \text{pour} \quad 0 \leq \vartheta_e < \frac{\pi}{2} \quad 5.19$$

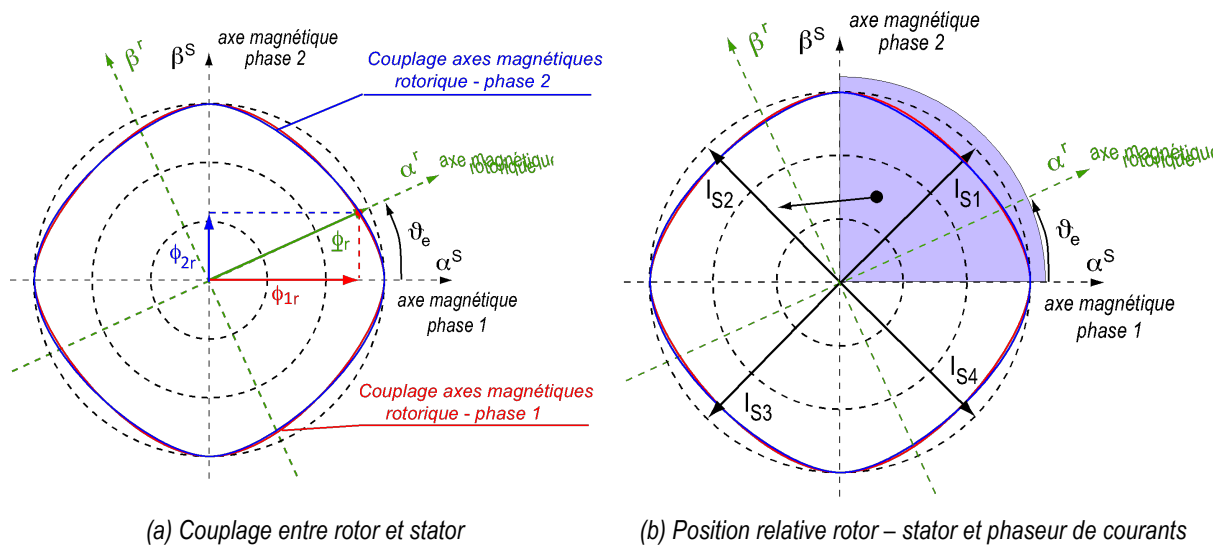


Figure 5-16 : Représentation vectorielle pour une commutation de 180°

Cette représentation vectorielle montre les couplages entre le flux crée par le rotor et les flux mutuels circulant dans les bobinages statoriques. Les lignes de couplage en traits continus correspondent aux positions de l'axe magnétique rotorique donnant une variation de flux mutuel quadratique (tension induite linéaire) en fonction de l'angle électrique ϑ_e . Le phaseur de courant est limité à quatre éléments distincts, soit

$$\underline{I}_S(\vartheta_e) = \begin{cases} I_{S1} = Ie^{j\pi/4} & \text{pour } -\pi/2 \leq \vartheta_e < 0 \\ I_{S2} = Ie^{j3\pi/4} & \text{pour } 0 \leq \vartheta_e < \pi/2 \\ I_{S3} = Ie^{j5\pi/4} & \text{pour } \pi/2 \leq \vartheta_e < \pi \\ I_{S4} = Ie^{j7\pi/4} & \text{pour } \pi \leq \vartheta_e < 3\pi/2 \end{cases} \quad 5.20$$

5.3.3.4.1 Modèle de simulation

Pour la commutation à 180°, il est possible de définir un modèle de simulation liant les signaux des sondes de Hall aux courants de phases.

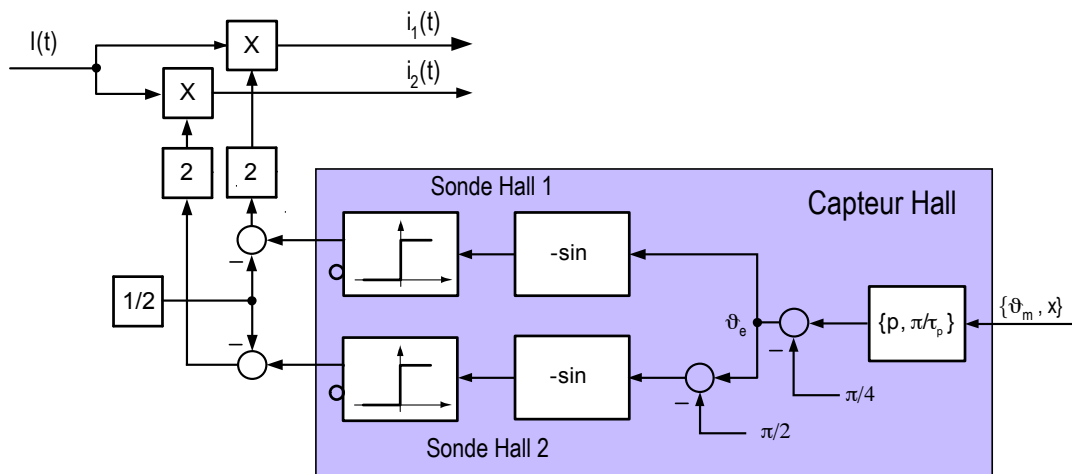


Figure 5-17 : Modèle de simulation pour la commutation à 180°

5.3.3.5 *Commande en tension en boucle fermée*

On peut faire ici la même remarque qu'au § 5.3.2.5.

5.4 MOTEURS DC SANS COLLECTEUR TRIPHASÉS.

5.4.1 Généralités

Les moteurs triphasés sont symétriques du point de vue électrique, ce qui signifie que :

$$\begin{aligned} \text{Courants de phases} & : \sum_{k=1}^2 i_k = 0 \\ \text{Tensions de phases} & : \sum_{k=1}^2 u_k = 0 \\ \text{Tension induites de mouvement} & : \sum_{k=1}^2 u_{ik} = 0 \end{aligned} \quad 5.21$$

Il n'y a donc pas de composantes homopolaires sur les courants et sur les tensions. Ceci implique que les harmoniques 3, 9, ..., $3(2k-1)$ sont nulles.

Sachant que les courants de phases sont de forme rectangulaire, ceci en raison du type de capteur utilisé pour la commutation, il s'agit de trouver les meilleures distributions des constantes de couple $K_T(\vartheta_m)$ ou de force $K_F(x)$ respectivement de tension induite $K_E(\vartheta_m)$ ou $K_E(x)$ pour avoir un couple respectivement une force avec le moins possible d'ondulation pour un point de fonctionnement donné. On entend par point de fonctionnement une vitesse constante et des amplitudes de courants de phases constantes.

Une simple observation du moteur montre que deux types de commutation se prêtent aux exigences sur l'ondulation de couple. Soit la commutation à 120° et la commutation à 180° , le choix dépendant de la forme de la distribution des constantes de tensions induites ou plus simplement des tensions induites mesurées à vitesse constante.

5.4.2 Commutation à 120°

5.4.2.1 Moteur et capteur de commutation

Les moteurs DC sans collecteur triphasés ont un capteur d'aide à la commutation en général sous la forme de sondes de Hall.

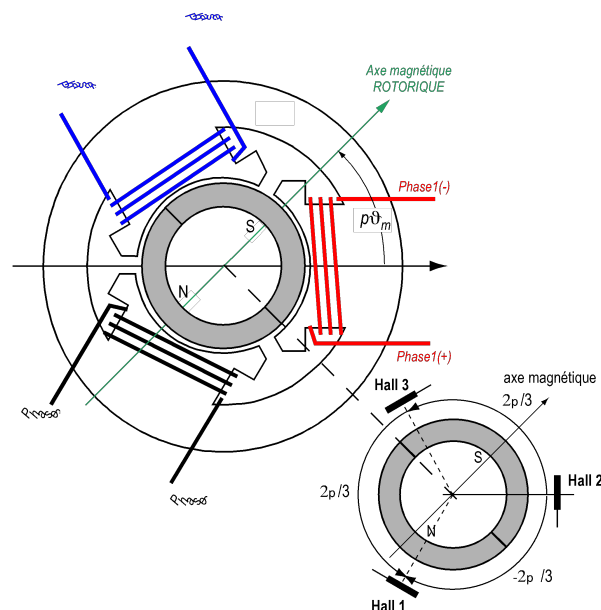


Figure 5-18 : Moteur triphasé avec capteur d'aide à la commutation

Le capteur est placé à un endroit tel qu'il est possible de mesurer le champ d'induction magnétique produit par les aimants du rotor

5.4.2.2 Forme des tensions de phases et calage du capteur de commutation

Les sondes de Hall sont placées de manière à ce que les signaux logiques qu'elles fournissent soient déphasés (en retard) de $\pi/6$ par rapport aux fondamentales des tensions induites de mouvement des phases respectives.

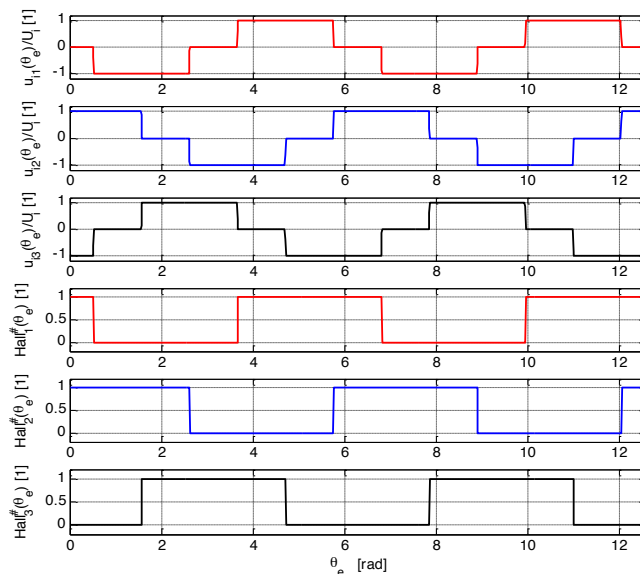


Figure 5-19 : Tensions induites de mouvement « rectangulaire »

5.4.2.3 Commande en courant en boucle fermée

Pour obtenir un couple indépendant de la position relative rotor – stator, les courants de phases doivent être présents que lorsque les tensions induites de mouvement des phases respectives sont constantes.

En se reportant à la relation générale 5.6, on voit que dans ce cas $\alpha=6$. En effet les tensions induites de phases sont constantes sur un intervalle de $2\pi/3$ et nul sur un intervalle de $\pi/3$.

Les courants (système symétrique) répondent à la condition suivante :

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0 \quad 5.22$$

On voit donc que les courants de phases sont liés aux équations logiques

$$i_1(\vartheta_e) = (Hall_1^\# - Hall_2^\#)I \quad 5.23$$

$$i_2(\vartheta_e) = (Hall_2^\# - Hall_3^\#)I \quad 5.24$$

$$i_3(\vartheta_e) = (Hall_3^\# - Hall_1^\#)I \quad 5.25$$

Le produit des courants de phases par les tensions induites de mouvement des phases respectives donne la puissance mécanique du moteur. Pour une vitesse constante, ce produit correspond, à une constante près, au couple ou à la force électromagnétique.

De la Figure 5-20 on obtient :

$$P_{el} = u_{i1}i_1 + u_{i2}i_2 + u_{i3}i_3 = 2U_i I = P_{mec} \begin{cases} \text{moteur rotatif} & \xrightarrow{1/\Omega} T_{em} = 2K_T I \\ \text{moteur linéaire} & \xrightarrow{1/v} F_{em} = 2K_F I \end{cases} \quad 5.26$$

La relation 5.26 montre que ce couple, ou cette force est indépendant de la position électrique donc également de la position mécanique.

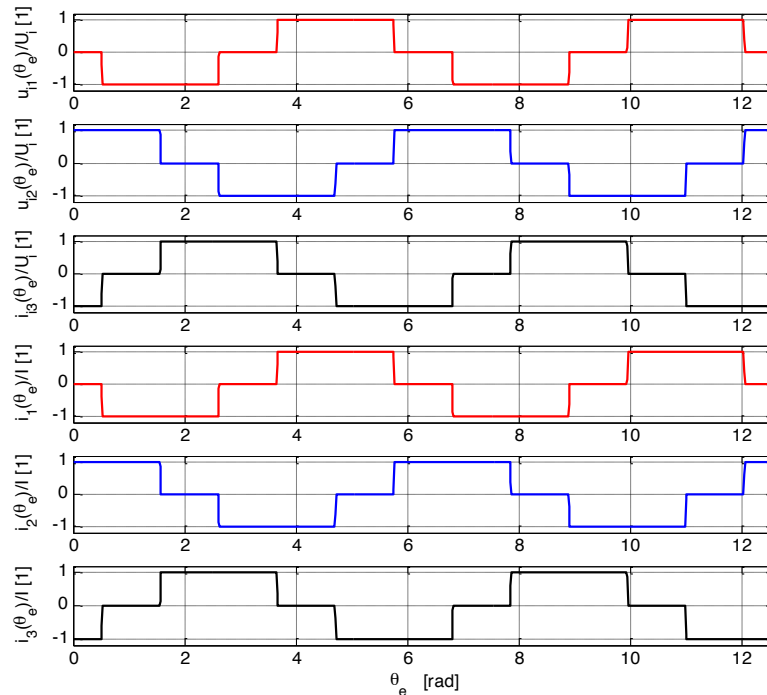


Figure 5-20 : Tensions induites de mouvement « rectangulaire »

5.4.2.4 Représentation vectorielle

La représentation vectorielle montre les couplages entre le flux créé par le rotor et les flux mutuels circulant dans les bobinages statoriques. Les lignes de couplage en traits continus correspondent aux positions de l'axe magnétique rotorique donnant une variation de flux mutuel linéaire (tension induite constante) en fonction de l'angle électrique ϑ_e . Au chapitre 4 du cours de mécatronique I, il a été dit que l'axe magnétique statorique doit être en avance de $\pi/2$ électrique sur l'axe magnétique rotorique. La zone ombrée de la Figure 5-21 (b) montre la plage de positions relatives rotor – stator pour laquelle le phaseur de courant correspond à

$$\underline{I}_{S2}(\vartheta_e) = I e^{j\pi/2} \quad \text{pour} \quad \frac{11\pi}{6} \leq \vartheta_e < \frac{\pi}{6} \quad 5.27$$

Cette représentation vectorielle montre les couplages entre le flux créé par le rotor et les flux mutuels circulant dans les bobinages statoriques. Les lignes de couplage en traits continus correspondent aux positions de l'axe magnétique rotorique donnant une variation de flux mutuel linéaire (tension induite constante non nulle) en fonction de l'angle électrique ϑ_e .

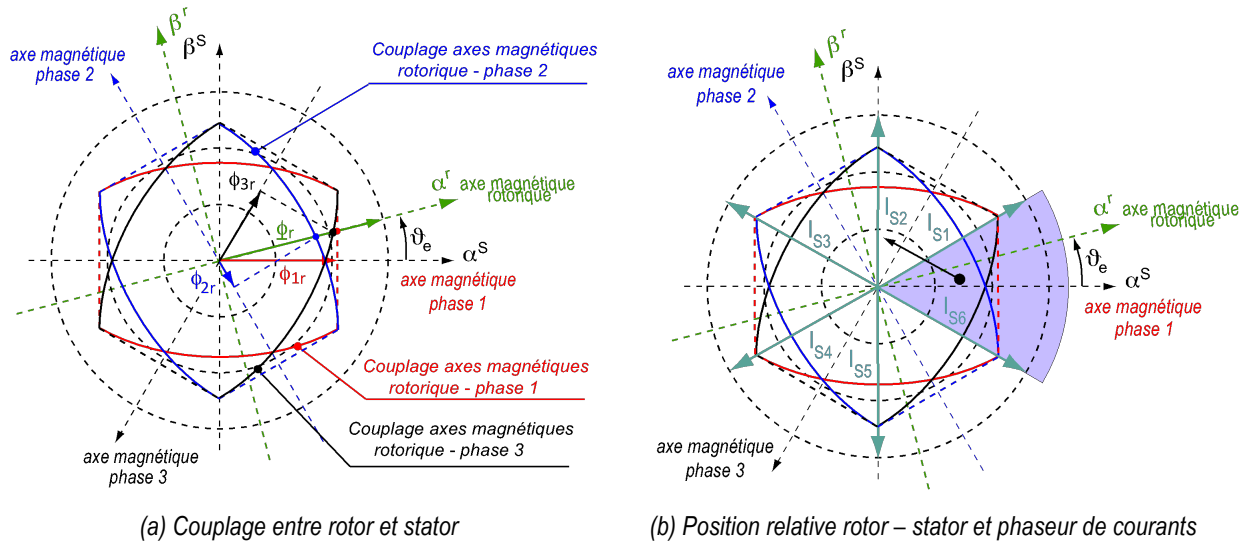


Figure 5-21 : Représentation vectorielle pour une commutation de 120°

Le phaseur de courant est limité à six éléments distincts, soit

$$\underline{I}_S(\vartheta_e) = \begin{cases} I_e^{j\pi/2} & \text{pour } -\pi/6 \leq \vartheta_e < +\pi/6 \\ I_e^{j5\pi/6} & \text{pour } +\pi/6 \leq \vartheta_e < +\pi/2 \\ I_e^{j7\pi/6} & \text{pour } +\pi/2 \leq \vartheta_e < +5\pi/6 \\ I_e^{j3\pi/2} & \text{pour } +5\pi/6 \leq \vartheta_e < -7\pi/6 \\ I_e^{j11\pi/6} & \text{pour } -7\pi/6 \leq \vartheta_e < -3\pi/2 \\ I_e^{j\pi/6} & \text{pour } -3\pi/2 \leq \vartheta_e < -11\pi/6 \end{cases} \quad 5.28$$

5.4.2.4.1 Modèle de simulation

Pour la commutation à 120°, il est possible de définir un modèle de simulation liant la position mécanique aux courants de phases

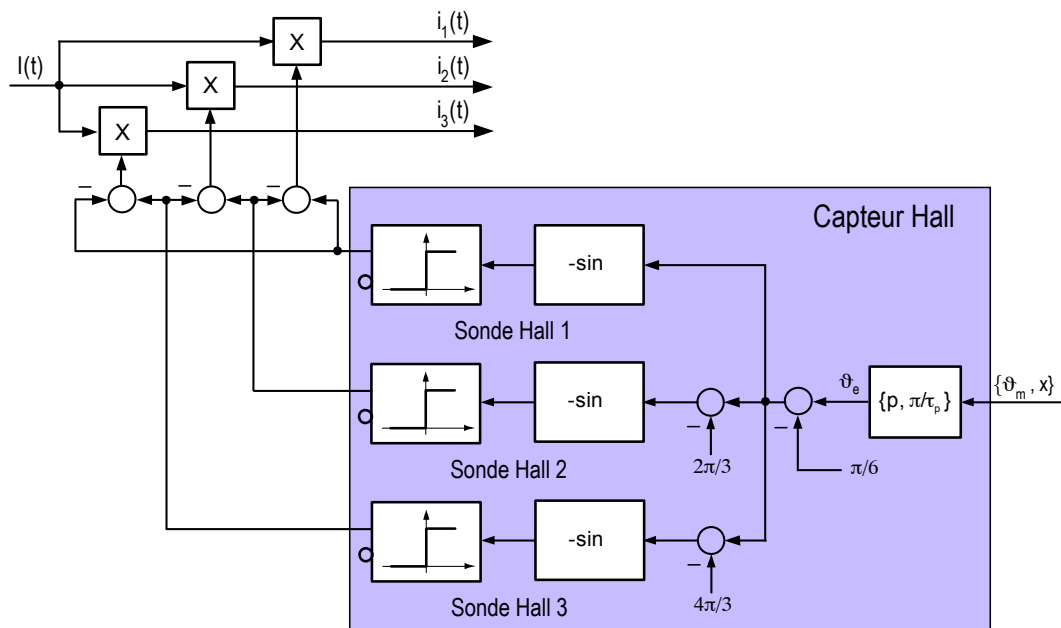


Figure 5-22 : Modèle de simulation pour la commutation à 120°

5.4.2.5 *Commande en tension en boucle fermée*

Au lieu de commuter les courants dans les phases du moteur, il est possible de commuter les tensions aux bornes des phases. Dans ce cas, l'analyse du comportement du moteur devient complexe et nécessite une simulation numérique.

5.4.3 Commutation à 180°

5.4.3.1 Moteur et capteur de commutation

Les moteurs DC sans collecteur triphasé ont un capteur d'aide à la commutation en général sous la forme de sondes de Hall.

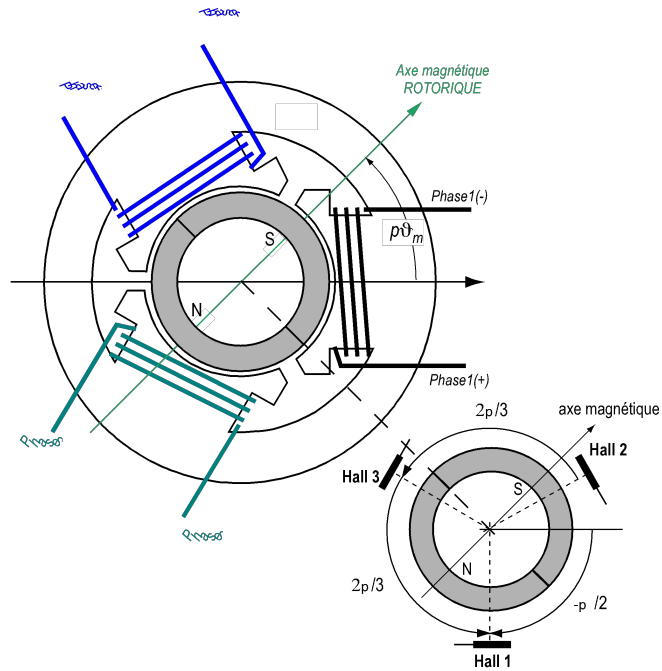


Figure 5-23 : Moteur triphasé avec capteur d'aide à la commutation

5.4.3.2 Forme des tensions de phases et calage du capteur de commutation

Les sondes de Hall placées de manière à ce que les signaux logiques qu'elles fournissent soient en phase avec les tensions induites respectives.

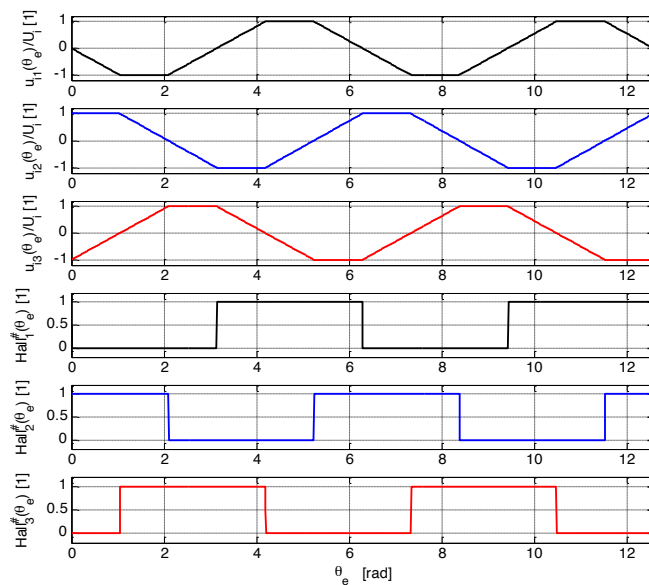


Figure 5-24 : Tensions induites de mouvement « triangulaire »

5.4.3.3 Commande en courant en boucle fermée

Pour obtenir un couple indépendant de la position relative rotor – stator, les courants de phases doivent être présents que lorsque les tensions induites de mouvement des phases respectives sont constantes.

En se reportant à la relation générale 5.6, on voit que dans ce cas $\alpha=6$. En effet les tensions induites de phases sont constants sur un intervalle de $\pi/3$ et varie linéairement sur un intervalle de $2\pi/3$.

Les courants de phases sont liés aux relations suivantes :

$$i_1(\vartheta_e) = \frac{1}{2}(2Hall_1^\# - Hall_2^\# - Hall_3^\#)I \quad 5.29$$

$$i_2(\vartheta_e) = \frac{1}{2}(2Hall_2^\# - Hall_3^\# - Hall_1^\#)I \quad 5.30$$

$$i_3(\vartheta_e) = \frac{1}{2}(2Hall_3^\# - Hall_1^\# - Hall_2^\#)I \quad 5.31$$

Le produit des courants de phases par les tensions induites de mouvement des phases respectives donne la puissance mécanique du moteur. Pour une vitesse constante, ce produit correspond au couple ou à la force électromagnétique.

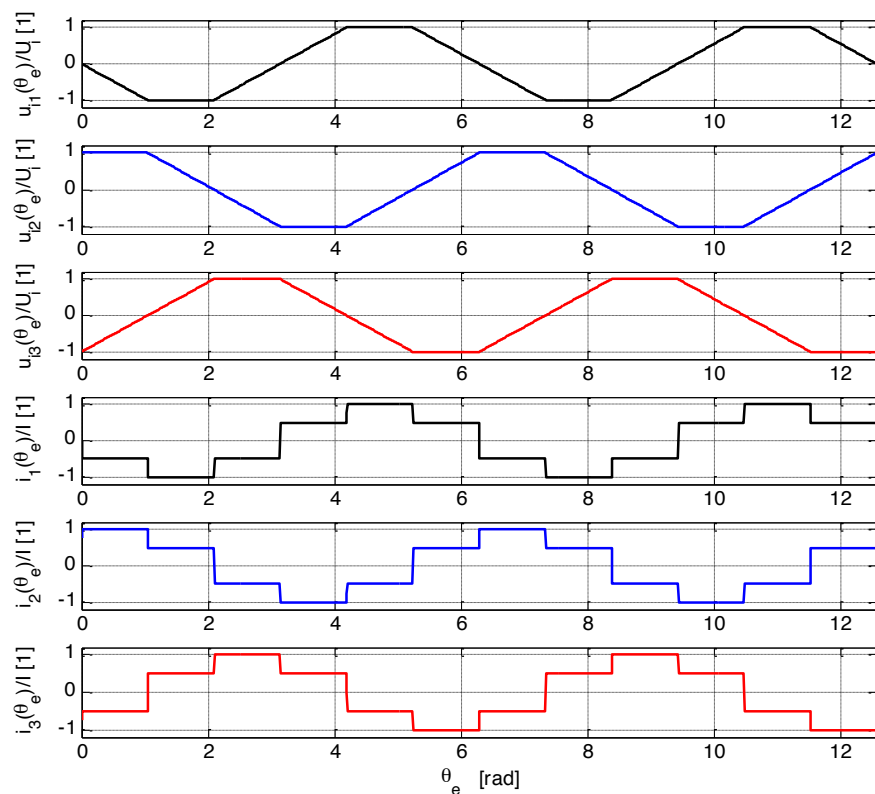


Figure 5-25 : Tensions induites de mouvement « rectangulaire »

De la Figure 5-25, on peut déterminer la puissance électrique directement transformée en puissance mécanique :

$$P_{el} = u_{i1}i_1 + u_{i2}i_2 + u_{i3}i_3 = 2U_i I = P_{mec} \begin{cases} \text{moteur rotatif} & \xrightarrow{1/\Omega} T_{em} = 2K_T I \\ \text{moteur linéaire} & \xrightarrow{1/v} F_{em} = 2K_F I \end{cases} \quad 5.32$$

La relation 5.32 montre que ce couple, ou cette force est indépendant de la position électrique donc également la position mécanique.

5.4.3.4 Représentation vectorielle

La représentation vectorielle montre les couplages entre le flux créé par le rotor et les flux mutuels circulant dans les bobinages statoriques. Les lignes de couplage en traits continus correspondent aux positions de l'axe magnétique rotorique donnant une variation de flux mutuel linéaire (tension induite constante) en fonction de l'angle électrique ϑ_e . Au chapitre 4 du cours de mécatronique I, il a été dit que l'axe magnétique statorique doit être en avance de $\pi/2$ électrique sur l'axe magnétique rotorique. La zone ombrée de la Figure 5-26 (b) montre la plage de positions relatives rotor – stator pour laquelle le phaseur de courant correspond à

$$\underline{I}_{S2}(\vartheta_e) = I e^{j\pi/2} \quad \text{pour} \quad 0 \leq \vartheta_e < \frac{\pi}{2} \quad 5.33$$

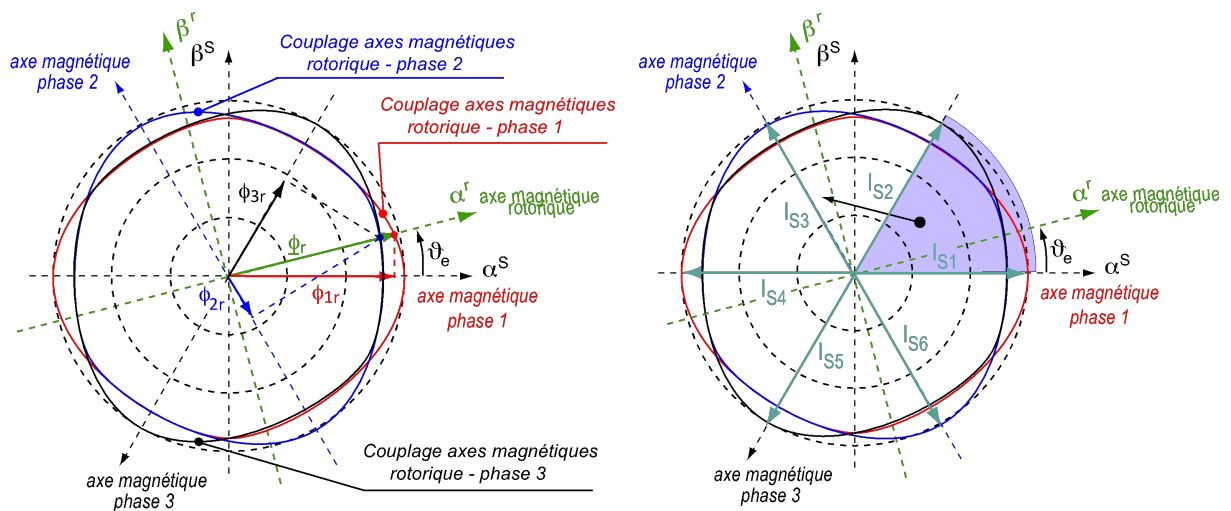


Figure 5-26 : Représentation vectorielle pour une commutation de 180°

Cette représentation vectorielle montre les couplages entre le flux créé par le rotor et les flux mutuels circulant dans les bobinages statoriques. Les lignes de couplage en trait continu correspondent aux positions de l'axe magnétique rotorique donnant une variation de flux mutuel en fonction de l'angle électrique ϑ_e . Le phaseur de courant est limité à six éléments distincts, soit

$$\underline{I}_S(\vartheta_e) = \begin{cases} I e^{j\pi/2} & \text{pour} \quad 0 \leq \vartheta_e < \pi/3 \\ I e^{j5\pi/6} & \text{pour} \quad \pi/3 \leq \vartheta_e < 2\pi/3 \\ I e^{j7\pi/6} & \text{pour} \quad 2\pi/3 \leq \vartheta_e < \pi \\ I e^{j3\pi/2} & \text{pour} \quad \pi \leq \vartheta_e < 4\pi/3 \\ I e^{j11\pi/6} & \text{pour} \quad 4\pi/3 \leq \vartheta_e < 5\pi/3 \\ I e^{j\pi/6} & \text{pour} \quad 5\pi/3 \leq \vartheta_e < 2\pi \end{cases} \quad 5.34$$

5.4.3.4.1 Modèle de simulation

Pour la commutation à 180° , il est possible de définir un modèle de simulation liant la position mécanique aux courants de phases

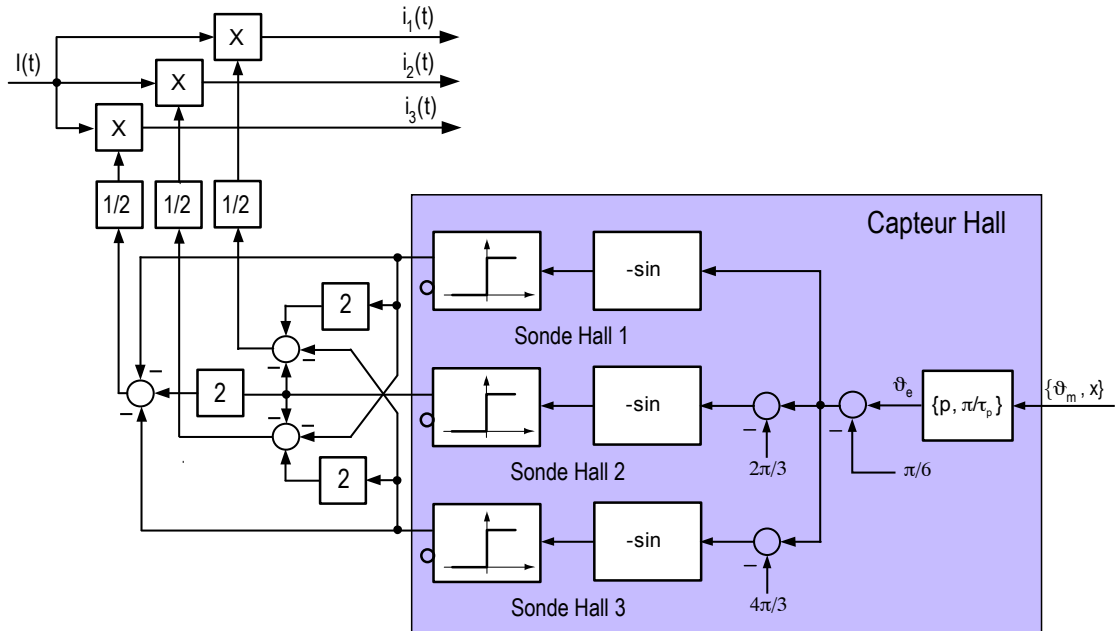


Figure 5-27 : Modèle de simulation pour la commutation à 180°

5.4.3.5 Commande en tension en boucle fermée

Pour la commande en tension. La remarque est la même qu'au § 5.4.2.5.

5.5 EXEMPLE DE RÉALISATION

5.5.1 Moteur DC sans collecteur triphasé à rotor extérieur

5.5.1.1 Description générale

Le moteur présenté est un moteur DC sans collecteur à rotor extérieur. Ce moteur, bon marché est fabriqué par la société PAPST.

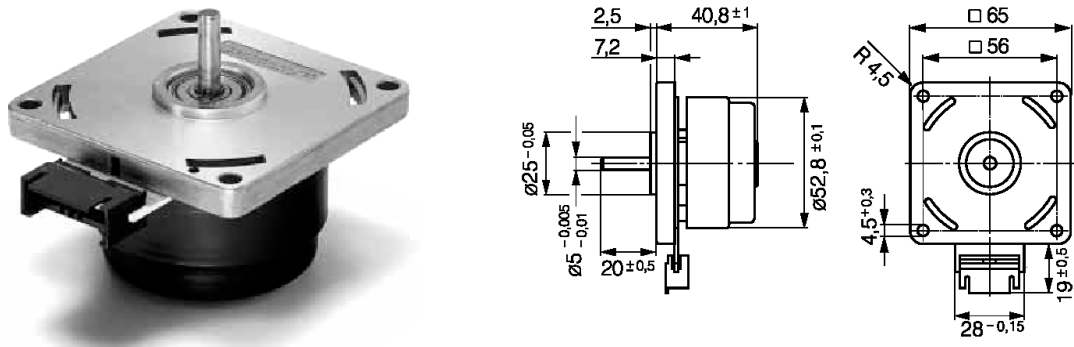


Figure 5-28 : Moteur Variodrive

Il s'agit d'un moteur triphasé dont le stator, au centre, est constitué de 6 plots (2 par phase) et dont le rotor, extérieur, est une cloche dont la périphérie est couverte de quatre d'aimants permanents mélangés à de la poudre de ferrite, le tout étant plastifié. On est donc en présence d'un moteur à 4 pôles. La Figure 5-29 montre la structure de ce moteur.

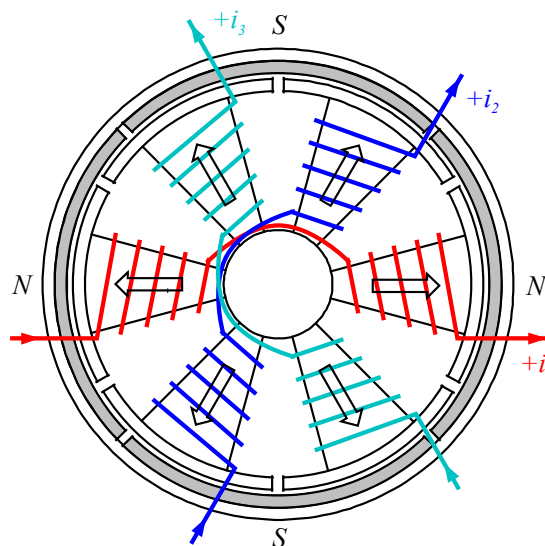


Figure 5-29 : Structure du moteur Variodrive

Les plots statoriques d'une même phase sont constitués de deux bobines dont le sens des enroulements est inversé. Pour un courant défini positif (voir Figure 5-29) les flux créés vont du moyeu à l'entrefer.

Les positions des capteurs Hall sont définies de manière à être en phase avec les tensions induites de mouvement des phases respectives. On voit sur la Figure 5-30 que les tensions induites de mouvement de chaque phase sont nulles lorsque l'axe magnétique d'un aimant

coïncide avec l'axe magnétique de la phase considérée. Par exemple pour la phase 1, les axes magnétiques rotor et stator sont alignés et par conséquent le capteur Hall doit se situer entre deux aimants (déphasage de 90° électrique ou 45° mécanique pour deux paires de pôles).

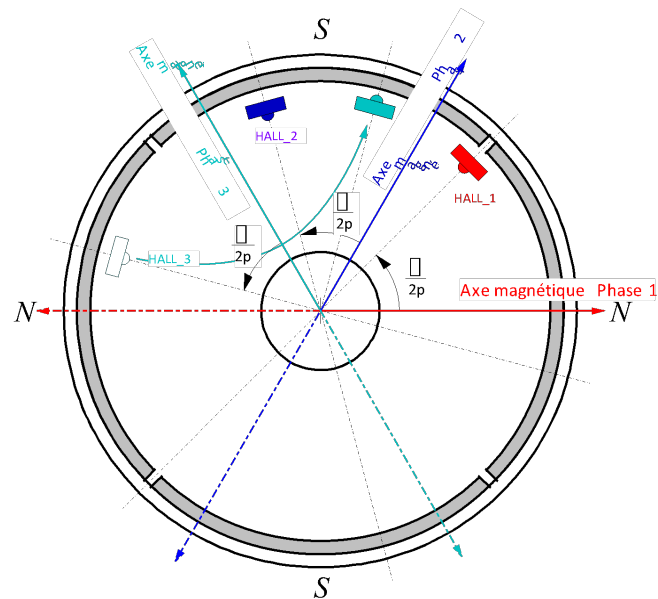


Figure 5-30 : Position des sondes de Hall

On voit sur la Figure 5-30 qu'il est possible de déplacer la sonde de Hall_3 de manière à regrouper les trois sondes dans une même zone de manière à réduire le circuit imprimé sur lequel ces sondes sont montées. Il est à remarquer que le capteur Hall_3 doit être retourné puisqu'il se trouve, après déplacement en face d'un aimant de polarité inversée.

5.5.2 Caractéristiques électriques.

On donne ici les caractéristiques électriques dont la connaissance est indispensable pour pouvoir contrôler le moteur de manière optimale.

5.5.2.1 Résistances de phases

Contrairement à un moteur DC à collecteur, la mesure de la résistance de phase peut se faire par une mesure DC à deux ou quatre fils.

$$R = 2.6 \text{ } [\Omega] \quad 5.35$$

5.5.2.2 Inductances de phases

La valeur de l'inductance est obtenue par une mesure AC au moyen d'un RLCmètre.

$$L = 1.6 \text{ } [mH] \quad 5.36$$

5.5.2.3 Tensions induites de phases

Les mesures des tensions induites de mouvement de phases sont illustrées à la Figure 5-31. La vitesse de rotation a été fixée arbitrairement à 2025 [t/min].

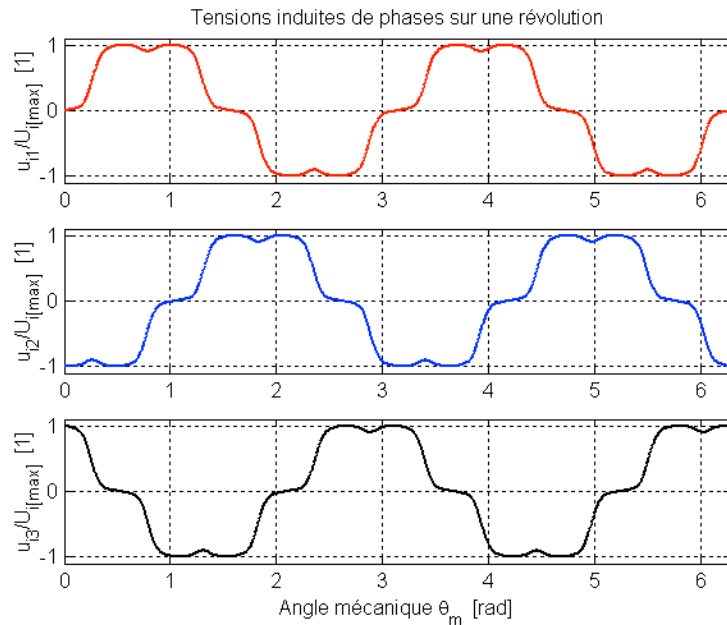


Figure 5-31 : Tension induite de mouvement

Rang des harmoniques	1	5	7	11	13	17
Amplitude normalisée	1.0540	0.1832	0.0665	0.0401	0.0139	0.0088

Tableau 5-1: Amplitudes des harmoniques des tensions induites de phases

Ce moteur étant prévu pour un couplage triangle, il n'y a pas d'harmoniques de rang 3, 9, 15, 21 En effet si les tensions induites de mouvement possèdent de telles harmoniques, celles-ci provoquent des courants de circulation dans le moteur puisque la composante homopolaire des tensions induite de mouvement n'est pas nulle. Ce courant de circulation, invisible de l'extérieur provoque des ondulations de couple ainsi que des pertes ohmiques et fer supplémentaires

5.5.3 Relation entre signaux du capteur Hall et tensions induites

La Figure 5-32 montre la relation angulaire existant entre les tensions induites de phases et les signaux issus du capteur Hall. La position relative des signaux Hall par rapport aux tensions induites de mouvement de phases permet d'affirmer ce moteur est prévu pour une commutation à 180°, quelque soit le type de couplage. La commutation à 120° reste néanmoins possible. En contrôle en tension le capteur ainsi placé permet une avance de phase ce qui est favorable pour les vitesses élevées. Par contre en contrôle de courant, l'ondulation de couple sera plus grande que pour le cas d'un calage correct.

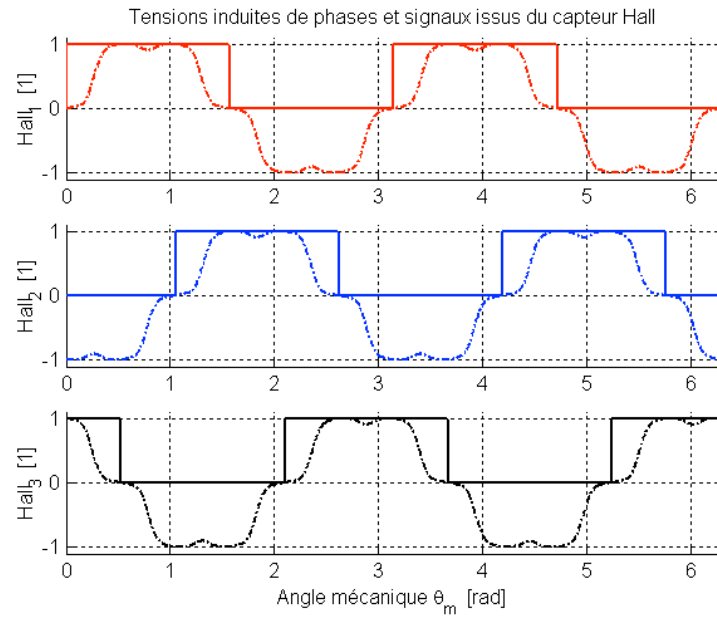


Figure 5-32 : Relation entre signaux du capteur Hall et tensions induites de phases

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 Jr and Tje Miller
ISBN 1-881855-03-1

- [3] **OXFORD UNIVERSITY PRESS**
STEPPING MOTORS AND THEIR MICROPROCESSOR CONTROLS
Auteurs : Takashi Kenjo and Akira Sugawara
ISBN 0-19-859385-6

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