



Bonjour. Le but de la leçon d'aujourd'hui c'est de donner une brève introduction sur la commande électronique du moteur asynchrone. Comme on pourrait faire un cours complet consacré uniquement à ce sujet, je n'ai vraiment pas la prétention de faire le tour du problème loin de là. L'idée de cette leçon c'est donc présenter uniquement les principes de base. Le principal défaut du moteur asynchrone, c'est que pour pouvoir régler efficacement sa vitesse on doit avoir une source de tension triphasé à fréquence variable. Aujourd'hui grâce à l'électronique de puissance on arrive relativement facilement à la réaliser, il nous reste malgré tout un problème, c'est que dans le cas du moteur asynchrone on a deux paramètres réglables qui influencent sa vitesse, la tension et la fréquence de l'alimentation. À titre de comparaison dans le cas du moteur synchrone la fréquence d'alimentation dépend directement de la vitesse du moteur et vice versa et ce n'est pas le cas pour le moteur asynchrone. On peut aussi remarquer que dans le moteur asynchrone le flux rotorique dépend de l'alimentation statorique qui ajoute encore à la complexité de la commande.

Notes

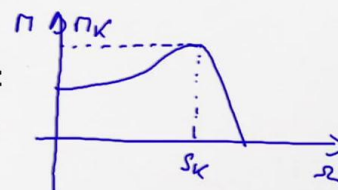
Summary



0m 04s

$$M_k = \frac{3R'_r \sigma_s^2 U_s^2}{\left[\left(R_e + \frac{R'_r}{s_k} \right)^2 + X_{cc}^2 \right] s_k \Omega_s}$$

$$s_k = \frac{R'_r}{\sqrt{R_e^2 + X_{cc}^2}}$$



Gros moteur

$$M_k = \frac{3\sigma_s^2 U_s^2}{2\Omega_s X_{cc}}$$

Malgré cela il y'a de nombreuses manières de résoudre ces problèmes, la première consiste à essayer de trouver une relation entre la tension et la fréquence d'alimentation. Cette relation on l'obtient en considérant le couple de décrochage du moteur asynchrone, alors qu'est-ce que c'est que le couple décrochage ? Petit rappel, j'ai la caractéristique de couple du moteur asynchrone de près cette allure-là, puis donc c'est le couple fonction de la vitesse et puis le couple de décrochage, eh bien on l'a ici. C'est le couple max qu'on a à fréquence fixe et puis ça correspond au glissement de décrochage ici. Je vous ai mis les équations de couple, c'est l'équation général de couple dans laquelle j'ai remplacé S par Sk. Et puis ça c'est l'équation du glissement décrochage qu'on a déjà calculé lors des leçons précédentes, et puis j'ai remplacé, puis j'ai fait encore une hypothèse c'est l'hypothèse gros moteur. Je la note qu'est-ce que c'est l'hypothèse gros moteur, c'est de dire que dans un gros moteur les pertes Joule, elle doit être minimale. Autrement ils chauffent beaucoup trop, l'échauffement est limité parce que la surface de dissipation est relativement petite par rapport au volume du moteur et donc que ce terme si va être beaucoup plus petit que le terme des réactances du moteur qu'elles peuvent être relativement grandes.

Notes

Summary

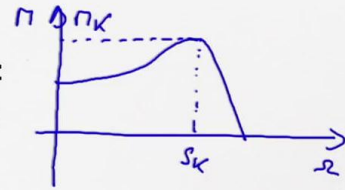


Variation tension/fréquence

$$M_k = \frac{3R'_r \sigma_s^2 U_s^2}{\left[\left(R_e + \frac{R'_r}{s_k} \right)^2 + X_{cc}^2 \right] s_k \Omega_s}$$

Gros moteur $X_{cc} \gg R_e$

$$s_k = \frac{R'_r}{\sqrt{R_e^2 + X_{cc}^2}}$$



$$M_k = \frac{3\sigma_s^2 U_s^2}{2\Omega_s X_{cc}}$$

\downarrow \downarrow
 ω ω

$$\sigma_s \approx \text{cte}$$

Ça c'est la somme des réactances de fuite X_{cc} et donc dans un gros moteur on a X_{cc} qui est beaucoup plus grand que R_e . Donc chaque fois qu'on a $R_e + X_{cc}$ essais ou $R_e^2 + X_{cc}^2$, on dit on néglige R_e , c'est ce que j'ai fait et lorsqu'on fait ça dans l'équation de couple de décrochage on obtient cette relation ici. Maintenant on va regarder ce qui dépend de la fréquence là-dedans, donc ce qu'il y'a de sur qui va dépendre la fréquence est la vitesse du champ tournant, ça c'est proportionnel à la fréquence de l'alimentation. Ce qui est sûr aussi c'est qu'une réactance c'est une inductance fois une pulsation, donc ça aussi c'est proportionnel à la fréquence d'alimentation. Et puis on va faire l'hypothèse que notre σ_s , lui ne dépend pas de la fréquence ce n'est pas tout à fait juste, mais on peut faire cette hypothèse parce que la dépendance n'est pas fondamentale, on peut dire ça comme ça. Ça c'est une constante $3/2$, ça ne dépend pas de la fréquence et ça nous reste U_s qui ne dépend pas non plus de la fréquence. Par contre on se rend compte que si on n'a U_s^2 au niveau du numérateur on a quelque chose qui est proportionnelle à F^2 au niveau du dénominateur.

Notes

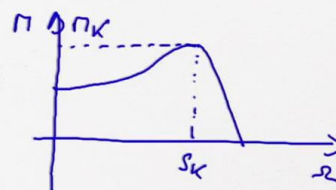
Summary



Variation tension/fréquence

$$M_k = \frac{3R'_r \sigma_s^2 U_s^2}{\left[\left(R_e + \frac{R'_r}{s_k} \right)^2 + X_{cc}^2 \right] s_k \Omega_s}$$

$$s_k = \frac{R'_r}{\sqrt{R_e^2 + X_{cc}^2}}$$

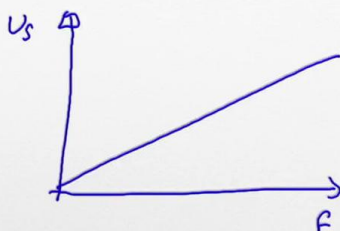


Gros moteur $X_{cc} \gg R_e$

$$M_k = \frac{3\sigma_s^2 U_s^2}{2\Omega_s X_{cc}}$$

\downarrow \downarrow
 $\propto f$ $\propto f$

$\sigma_s \approx \text{cte}$



$\sigma_s \approx \text{cte}$

Ah si on veut avoir une valeur constante du couple et décrochages et bien il suffit de faire en sorte que notre tension d'alimentation soit directement proportionnelle à la fréquence de l'alimentation comme ça. Si on fait ça on a U_s^2 sur quelque chose qui est multiplié par f^2 , à une constante fois f^2 et donc notre couple de décrochage va devenir environ constant. Donc ça c'est une manière de gérer cette variation de deux paramètres tension et fréquence en disant bah... ok je vais choisir une droite proportionnelle entre la tension d'alimentation et la fréquence d'alimentation. Ça me permet d'avoir un couple de décrochage qui est constant, qu'est-ce que ça a comme influence sur la caractéristique couple vitesse du moteur.

Notes

Summary



Variation tension / fréquence: résultat

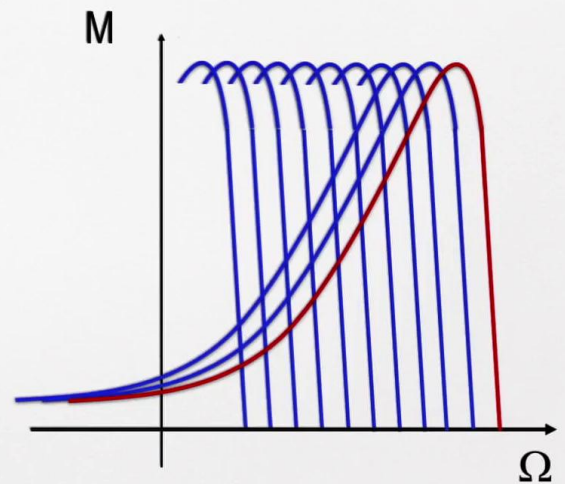
$$M = \frac{3\sigma_s^2 U_s^2 s}{R'_r \Omega_s} \text{ pour } s \rightarrow 0$$

$$s = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} = \frac{\Delta \Omega}{\Omega_s}$$

$$\Gamma = \frac{3\sigma_s^2 U_s^2}{R'_r \Omega_s^2} \Delta \Omega$$

$\rightarrow = \text{cte}$

$$\frac{\Gamma}{\Delta \Omega} = \text{cte}$$



Ça on va le voir ici, pour ça on a besoin de la partie linéaire de cette caractéristique, donc là je l'ai dessiné ici. La caractéristique coupe vitesse en rouge et puis on a une partie linéaire ici duquel on peut tirer enfin entre guillemets cette équation. Donc pour des petits glissements on est dans la partie linéaire et on a cette caractéristique-là. Quelle est la définition du glissement ? donc le glissement on se rappelle que ces oméga s - oméga sur oméga s et puis ça veut dire que c'est une différence de vitesse sur oméga s, si je remplace ça dans l'expression du couple. Je la réécris un peu différemment, j'ai trois sigma S² sur R'r et puis j'ai U_s² fois S, c'est à dire fois delta oméga sur oméga s au carré, un deuxième oméga s au carré. On se rend compte que ce terme ci, si on a notre relation tension fréquence qui est une droite, eh bien ces termes ci, ici là ça va être une constante. Qu'est-ce que ça veut dire ça veut dire, ça veut dire que lorsqu'on a cette relation tension fréquence qui est une droite et bien notre pente couple en fonction de delta oméga va être constante.

Notes

Summary



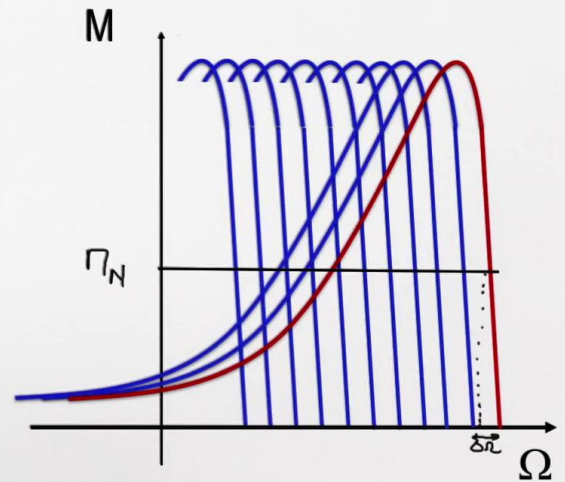
Variation tension / fréquence: résultat

$$M = \frac{3\sigma_s^2 U_s^2 s}{R'_r \Omega_s} \text{ pour } s \rightarrow 0$$

$$s = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} = \frac{\Delta \Omega}{\Omega_s}$$

$$\Gamma = \frac{3\sigma_s^2 U_s^2}{R'_r \Omega_s^2} \Delta \Omega$$

$$\frac{\Gamma}{\Delta \Omega} = \sigma_c$$



Si on regarde graphiquement ce qui se passe on a un couple, à dire le couple nominal, à ce couple correspond delta oméga et le rapport entre le couple et delta oméga et bien il va être constant lorsque on varie l'attention ou la fréquence si on respecte cette condition de linéarité entre tensions et fréquences. Qu'est-ce que ça veut dire ? ça veut dire que la pente de la caractéristique ou de la partie linéaire de la caractéristique de couple va rester la même quel que soit le la fréquence qu'on va utiliser. Si on varie la fréquence on va changer la vitesse du chant tournant et donc on va se déplacer, on réduit la fréquence ou bien on augmente, la pente reste la même, le couple de décrochage reste le même et donc on va se retrouver à peu près au même point de fonctionnement à chaque fois. C'est une manière de réaliser la commande en fréquence variable de notre moteur asynchrone c'est à dire qu'on peut fixer une fréquence et puis en déduire la tension selon la courbe où la droite de proportionnalité et puis ça nous permet d'avoir un fonctionnement du moteur asynchrone un point de fonctionnement nominal sur toute la plage de vitesse du moteur.

Notes

Summary

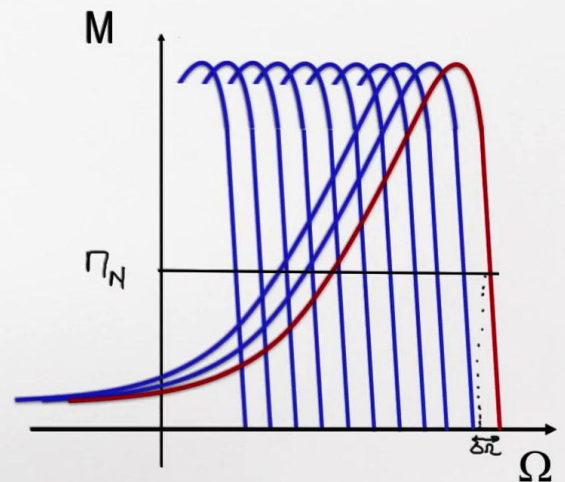


$$M = \frac{3\sigma_s^2 U_s^2 s}{R'_r \Omega_s} \text{ pour } s \rightarrow 0$$

$$s = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} = \frac{\Delta \Omega}{\Omega_s}$$

$$\Gamma = \frac{3\sigma_s^2 U_s^2}{R'_r \Omega_s^2} \Delta \Omega \rightarrow \sigma \tau_c$$

$$\frac{\Gamma}{\Delta \Omega} = \sigma \tau_c$$



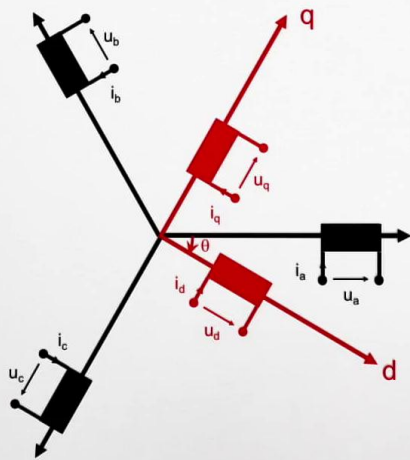
Alors ce n'est pas trop mal hein ça marche assez bien mais par contre ce n'est pas tout à fait optimale, on n'a pas un contrôle total de notre moteur asynchrone, donc ça pourrait être mieux. Comment est-ce qu'on peut faire mieux et bien en fait on est obligé de passer par du contrôle vectoriel, et puis pour pouvoir passer par du contrôle vectoriel on doit faire un petit peu de théorie sur une transformation géométrique des grandeurs électriques et magnétiques qu'on appelle la transformation de Park.

Notes

Summary



10m 02s

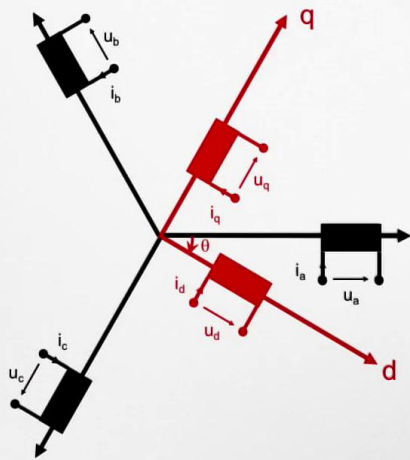


Transformation de Park, qu'est-ce que c'est ? alors il y'en a plein de transformations, il y'a la transformation de Parc il y'a la transformation T, il y'a la transformation à deux axes etc... Nous on va voir que celle qu'on appelle de Park, mais toutes ces transformations un point commun c'est qu'elle transforme un système de bobinage triphasé dans un référentiel dans un autre système de bobinage qui est biphasé ou triphasées dans un autre référentiel. Alors on va parler de Park pour le moment donc je vous ai dessiné le référentiel de base, c'est le référentiel statorique avec les trois tensions est les trois courants statoriques, un système triphasé déphasé de 120 degrés. On va utiliser une transformation géométrique pour le transformer dans un autre système triphasé, alors le troisième axe on ne le voit pas, il sort de l'écran en fait, et puis il nous rentre dans la figure. Donc l'axe O ou O polaire c'est le troisième axe il nous rentre dans la figure. On va voir qu'il n'est pas très important, les axes importants c'est l'accès direct et l'axe transverse des dq.

Notes

Summary





$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

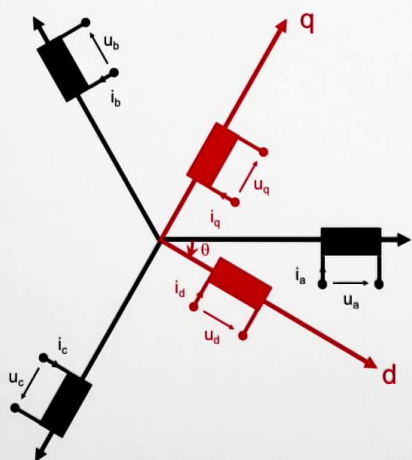
Ce référentiel est décalé d'un angle θ par rapport à mon référentiel original c'est la géométrie, et puis je vais pouvoir faire tourner ce référentiel et on va choisir souvent la vitesse du champ tournant pour faire tourner ce référentiel. Vous imaginez j'ai toutes les grandeurs magnétiques et électriques courant, tension, flux du stator et je vais toutes les transformer dans un référentiel tournant au niveau du rotor j'ai envie de dire qui va tourner à la vitesse du champ tournant et qui est D Q O, la transformation que j'ai c'est une, c'est une matrice j'ai bien dit c'était de la géométrie. Et puis on se rend compte assez vite que la composante O ne sert pas à grand-chose si on a un système triphasé symétrique, parce que là les trois courants et bien si c'est symétrique et puis qu'on n'a pas de neutre lié, la somme de une demi de I_a plus une demi de I_b plus une demi de I_c va faire zéro. Donc on n'a pas de composante homopolaire dans notre système, c'est pour ça que on va se contenter de l'axe direct et de l'axe transverses.

Notes

Summary



12m 07s



$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_o \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix}$$

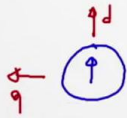
On peut aussi le faire pour les flux c'est des maths, donc pour simplifier les équations on transforme nos équations de tension et de courants qui sont sinusoïdales qui dépendent de la fréquence de la position du rotor ou plutôt de la position du phaser de tension et de courant en des équations qui vont elles être liées au champs tournant. Donc si on a un champ tournant qui est normal j'ai envie de dire eh bien dans l'axe d et dans l'axe q on va avoir des constantes, dans les trois bobinages statoriques, c'est des valeurs qui varient en fonction du temps. Mais si notre référentiel dq est à la vitesse du champ tournant, bien lui il va avoir des constantes au niveau des tensions et des courants dans ces phases. À quoi ça sert pour faire du contrôle de moteur ?

Notes

Summary



Moteur synchrone, référentiel lié au champ tournant / rotor



alors je prends l'exemple d'un moteur synchrone, un moteur synchrone qui est extrêmement simple, dans le moteur synchrone avec un référentiel lié aux champs tournant donc au rotor, bien on a dans le cas extrêmement simple, le plus simple un aimant démagnétisé donc ainsi, et puis on peut choisir ou on met nos axes dq en fonction de la position de notre rotor. C'est que notre référentiel va tourner à la vitesse du champ tournant et ont choisi de mettre l'axe d dans le sens du max du champ magnétique et puis l'axe q lui va se trouver en quadrature. Donc en fait on se rappelle de la leçon sur la condition de l'obtention d'un couple et de celle sur le calcul du couple, si on veut avoir le maximum du couple dans une machine électrique. Et bien on doit avoir un champ magnétique statorique qui est exactement en quadrature avec le champ magnétique rotorique. Donc en fait on doit se trouver dans l'axe q donc tous qui toutes les grandeurs magnétiques donc le courant statorique et l'afflux statorique.

Notes

Summary



Moteur synchrone, référentiel lié au champ tournant / rotor



Moteur asynchrone
estimation (i , U , R , A)

Et bien si on est dans ce cas-là vont avoir que des composantes au niveau de l'axe q eu et rien dans l'axe d au niveau du stator, et avec le courant direct et bien qui est dans l'axe d et on va pouvoir par exemple affaiblir le flux c'est ce qu'ont fait typiquement lorsqu'on trouve qu'on a trop de tensions induites et que on veut aller à des vitesses supérieures dans le cas du moteur synchrone. On fait de l'affaiblissement du flux et on contrôle flux avec le courant direct puis avec le courant transverses dans l'axe q on va contrôler le couple. Dans le cas du moteur asynchrone c'est un petit peu différent il y'a toujours ce découplage qu'on arrive à faire mais la différence c'est que on a un référentiel qui est lié un champ tournant et on ne peut pas mesurer le flux rotorique, il va falloir l'estimer, on doit faire une estimation du flux. Dans le moteur synchrone c'est facile on mesure la position c'est quel flux en a qui est créé par les mains et puis on est bon. Dans le cas du moteur asynchrone on doit estimer le flux en fonction des grandeurs électriques et mécanique qu'on a. Et la démarche est à peu près la même c'est à dire qu'on va avoir ce découplage entre le flux et le couple avec nos axes dq et puis ça va nous permettre de faire un réglage beaucoup plus fin.

Notes

Summary



Moteur synchrone, référentiel lié au champ tournant / rotor



Moteur asynchrone
estimation (i , U , R , A)

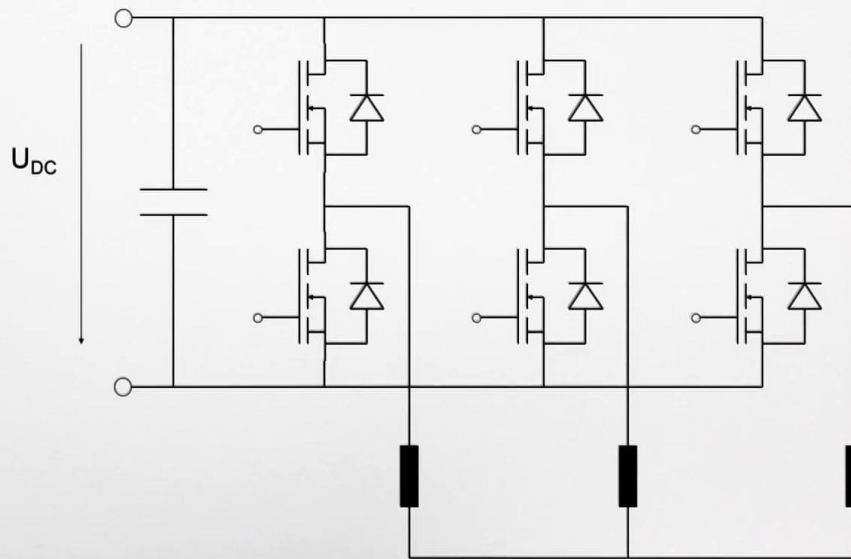
mesure $\rightarrow d, q \rightarrow$ réglage $\rightarrow dq^{-1} \rightarrow$ commandes

Comment est-ce qu'on fait ? on fait une mesure de nos grandeurs électriques, on va les convertir dans notre modèle dq de notre référentiel tournant. On va faire le réglage, on va avoir le régulateur à cet endroit-là, ça va nous donner des consignes dans notre référentiel dq, on repasse au niveau réel, et puis on a des signaux de commande qui vont nous permettre de régler la tension et la fréquence de notre alimentation de moteur. Voilà on s'arrête là parce que on sait déjà bien au-delà du cadre de secours mais en gros c'est le principe du contrôle vectoriel, or il y'a tout plein de variantes de ce contrôle vectorielle je ne vais pas rentrer dans tous les détails. Comment est-ce que on convertit les commandes en des vraies tensions qu'on va pouvoir appliquer sur le moteur ?

Notes

Summary





bien on le fait de la même manière qu'on le faisait pour le moteur synchrone c'est à dire qu'on a un pont de puissance triphasé avec 6 transistors et en fait on va moduler la tension simplement en enclenchant les transistors d'une même branche alternativement. Plus j'enclenche ceux du haut plus ma tension sera élevée et plus j'enclenche ceux du bas plus ma tension sera faible à cet endroit. Et puis je peux varier le rapport cyclique d'enclenchement de manière sinusoïdale de telle manière à pouvoir créer une tension à ce point qui est sinusoïdale. La même chose décalée de 120° électriques, ici est la même chose encore décalée. Donc ça c'est la manière de réaliser une alimentation triphasée à fréquence variable est là non plus on ne va pas rentrer dans les détails.

Notes

Summary



20m 03s



- Variation de vitesse
- Variation tension/fréquence
- Contrôle vectoriel (FOC,DTC,...)
- Implémentation: électronique de puissance

Voilà pour cette brève introduction à la problématique de la commande électronique du moteur asynchrone. Ce qu'il faut retenir c'est qu'on a besoin de commande électronique pour pouvoir régler la vitesse du moteur asynchrone de manière efficace. Cette commande similaire en tout cas au niveau du matériel à celle du moteur synchrone puisqu'on utilise le même genre de pont triphasé. Par contre au niveau du réglage proprement dit c'est un peu plus compliqué, nous avons survolé deux variantes de solution. La première consiste à faire varier la tension d'alimentation de manière linéaire fonction de sa fréquence et on a vu que cette manière de faire permettait de rester plus ou moins au même endroit sur la caractéristique de couple du moteur. En fait on décale cette caractéristique en fonction de la vitesse. Cette manière de faire si elle est facile à implémenter n'est pas forcément idéal pour obtenir de meilleures performances du moteur on peut utiliser des techniques qu'on regroupe sous le nom de contrôle vectoriel et qui s'appuie sur un changement de référentiel des grandeurs électriques et magnétiques du moteur.

Notes

Summary





- Variation de vitesse
- Variation tension/fréquence
- Contrôle vectoriel (FOC,DTC,...)
- Implémentation: électronique de puissance

Dans ce cas on ne règle plus directement les tensions courant d'alimentation mais bien leur valeur dans le référentiel transformé, ça permet un découplage entre le réglage du flux et celui du couple délivré par le moteur et on obtient de bien meilleures performances ont pris d'une plus grande complexité du réglage. Et je m'arrête là parce que comme je l'ai dit en introduction, c'est un sujet de cours à part entière.

Notes

Summary



22m 13s