





- Explication de la structure des moteurs BLDC
- Onduleur et commande
- Caractéristiques de couple en tension et en courant

Madame, monsieur, bonjour. Bienvenue dans ce module consacré au moteur synchrone à aimants permanents et plus spécifiquement ici vous présenter un film qui vous résumera tout ce qu'on a vu pendant les modules précédents en vous donnant même quelques exemples précis avec des expériences qui ont été filmées et qui me semble important que vous puissiez voir. Donc l'idée de vous donner des explications sur la structure des moteurs brushless DC, c'est pour ça qu'on a écrit BLDC, en français on va dire un moteur synchrone à aimant permanent ou moteurs à courant continu sans collecteur. On va voir aussi pour résumer ce qu'on a déjà vu ensemble comment fonctionne l'onduleur ? quelle est la commande en  $120^\circ$ ,  $180^\circ$  quelles sont les différences et le film va vous montrer un certain nombre d'éléments pour ceci. On va aussi parler de la caractéristique de couple en tension, en courant et on va voir aussi la cette similitude lorsqu'on est autocommuté avec le moteur DC, le moteur à courant continu classique, et en fait vu de l'extérieur il est difficile de voir la différence entre les deux moteurs ils se comportent de la même manière dont je vous propose maintenant de voir ce film qui dure 30 minutes et je vous retrouve juste après.

Notes

Summary



0m 04s

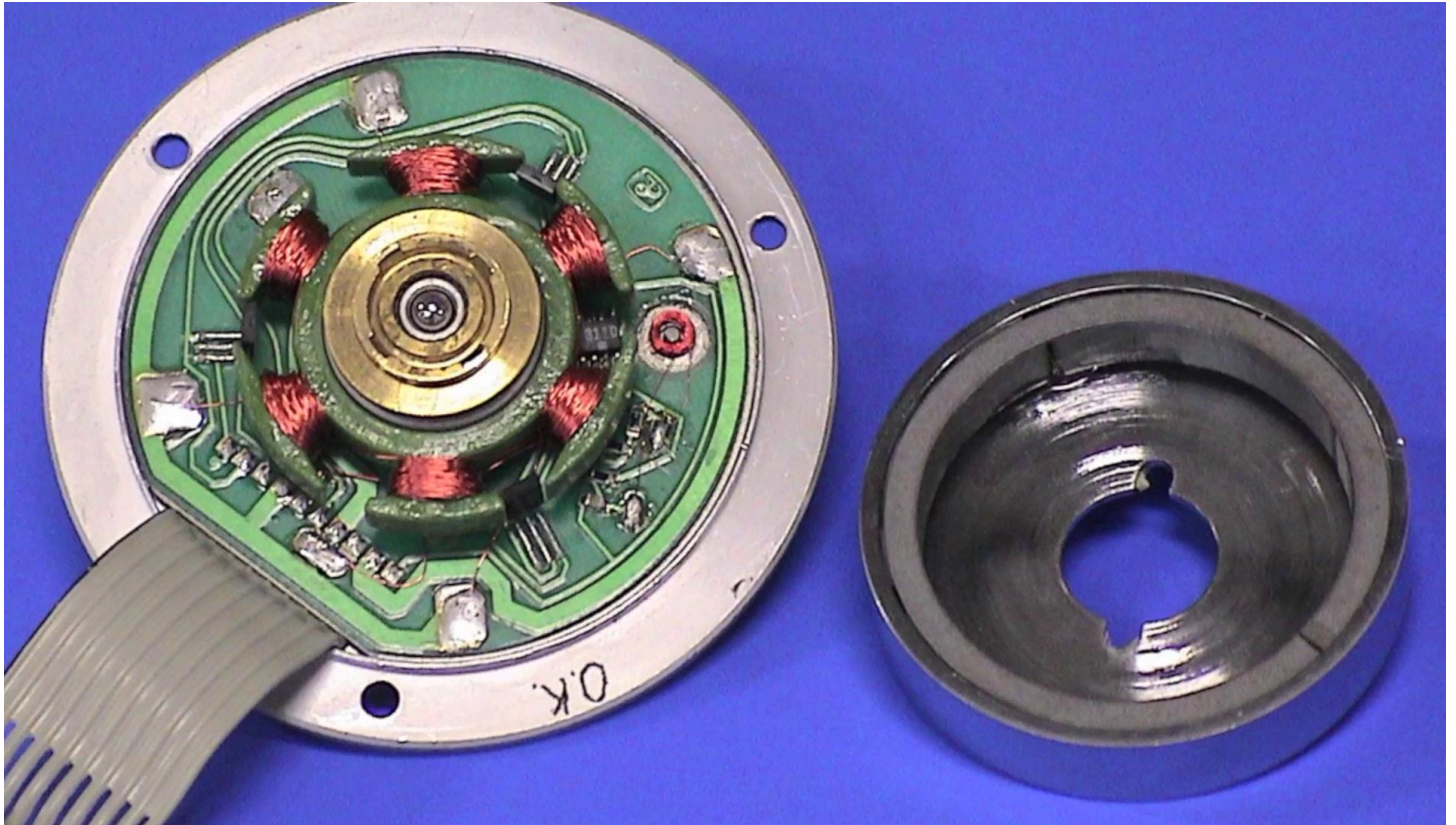
# Le moteur synchrone à aimants permanents

Notes

Summary

1m 24s





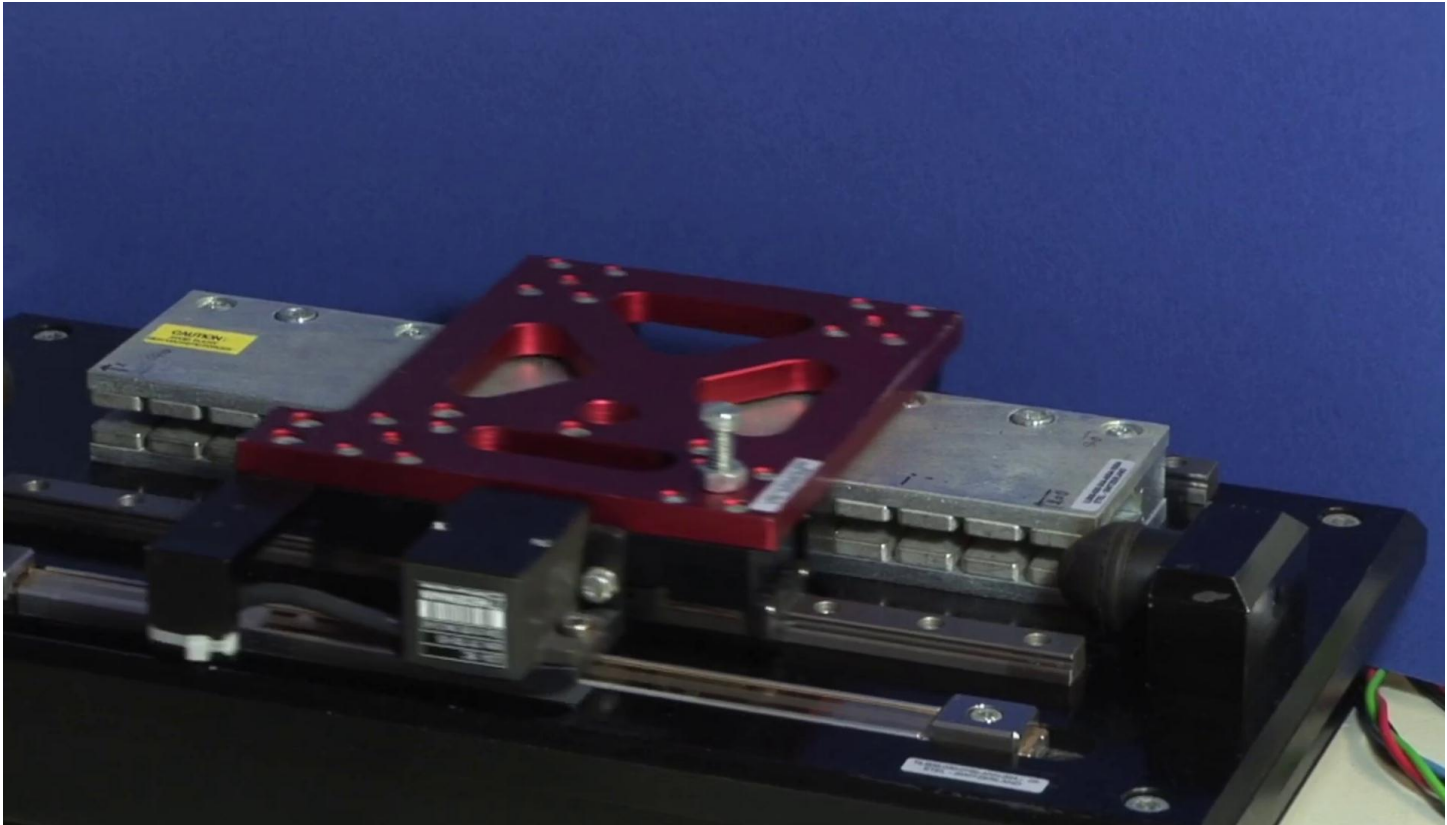
Aujourd'hui les moteurs synchrones à aimants permanents ou moteurs à courant continu sans collecteurs sont omniprésents leur succès vient principalement des progrès de miniaturisation des composants électroniques, on les trouve dans des applications aussi diverses que les disques durs, les satellites ou les véhicules électriques. Suivant l'application, le couple et la vitesse à fournir varient, ces moteurs prennent alors différentes tailles ou formes.

Notes

Summary

1m 40s





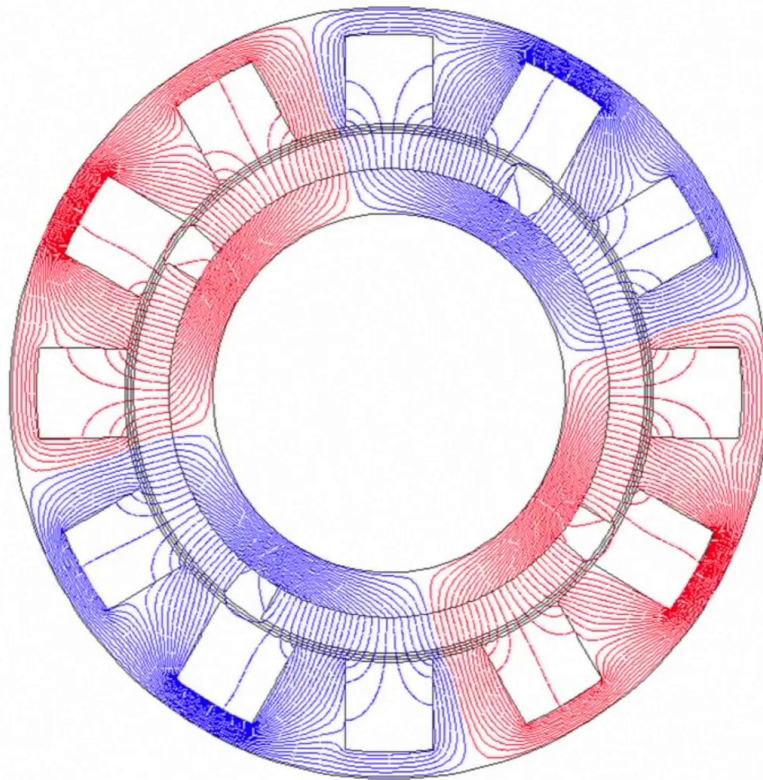
Le moteur synchrone à aimant permanent se compose d'un rotor extérieur ou intérieur sur lequel se trouve le ou les aimants permanents, chaque paire d'aimants, forme en général une paire de pôles, la culasse rotorique supporte les aimants et guide le flux magnétique. Le bobinage composé de fils de cuivre isolés entre eux forme les enroulements qui constituent les phases, il peut être autoporteur plat ou logé dans des encoches. Le stator formé d'un empilement de fines tôles ce qui limite les pertes par courant de Foucault supporte le bobinage, il peut se présenter sous la forme d'un disque ou d'un cylindre avec ou sans encoches. C'est essentiellement l'application du moteur qui déterminera sa configuration où sa taille, parfois le moteur peut être déroulé et mise à plat et devenir ainsi un moteur linéaire.

Notes

Summary

2m 27s





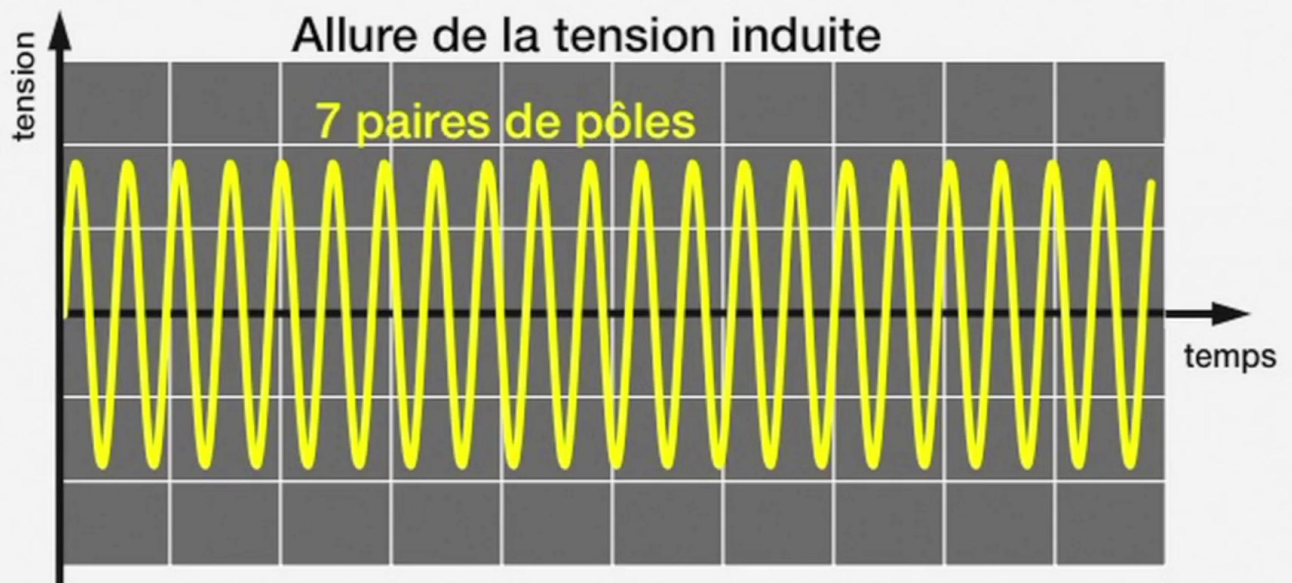
Quelle que soit la structure du moteur, le principe électromagnétique reste le même, le moteur triphasé présenté ici possède quatre paires de pôles et 12 encoches, un programme de modélisation par éléments finis permet de représenter par des lignes de flux le champ magnétique produit par les aimants, celles-ci ont des propriétés particulières, elle se referment sur elle-même, elle traverse les matériaux qui leur offre le moins de résistance magnétique c'est à dire le fer, elle quitte le fer avec un angle proche de 90 degrés sauf en cas de saturation de ce dernier. Voici comment elle se comporte lorsque le rotor tourne.

Notes

Summary



3m 51s



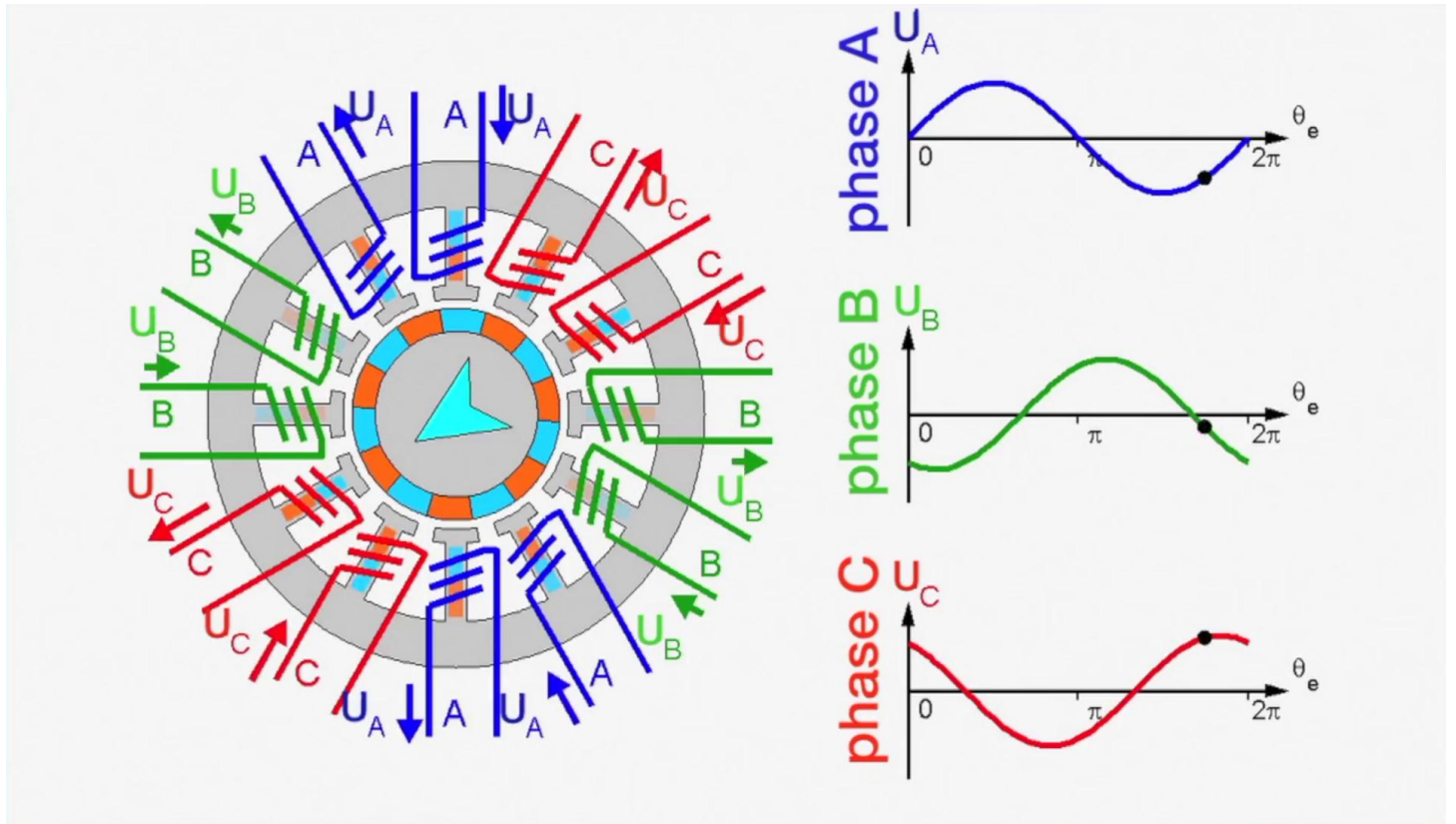
Lorsque l'on entraîne le moteur en génératrice les phases du moteur voient la variation du flux magnétique de l'aimant l'interaction de ce flux avec le bobinage génère une tension alternative aux bornes de ce dernier. C'est la tension induite de mouvement, son allure dépend de la distribution de l'induction dans l'entrefer et du type de bobinage, son amplitude et notamment proportionnelle à la vitesse de rotation du moteur. Le rapport entre la vitesse de rotation du moteur et la fréquence de la tension induite est proportionnel au nombre de paires de pôles du moteur, plus ce nombre est important plus le rapport des fréquences est élevé.

Notes

Summary



5m 00s



Ainsi, pour un moteur triphasé ayant 14 pôles rotoriques soit 7 paires de pôles, chaque fois que le rotor fait un tour, chaque phase du stator voit défiler sept pôles nord et sept pôle sud, la fréquence électriques et dans ce cas cette fois plus élevé que la fréquence mécanique. En fait la tension induite de mouvement donne une image de la position du rotor par rapport au stator.

Notes

Summary



# Couple

La mesure de l'amplitude ou de la fréquence de la tension induite permet de déterminer la vitesse de rotation, un tel moteur peut alors servir de capteur de vitesse.

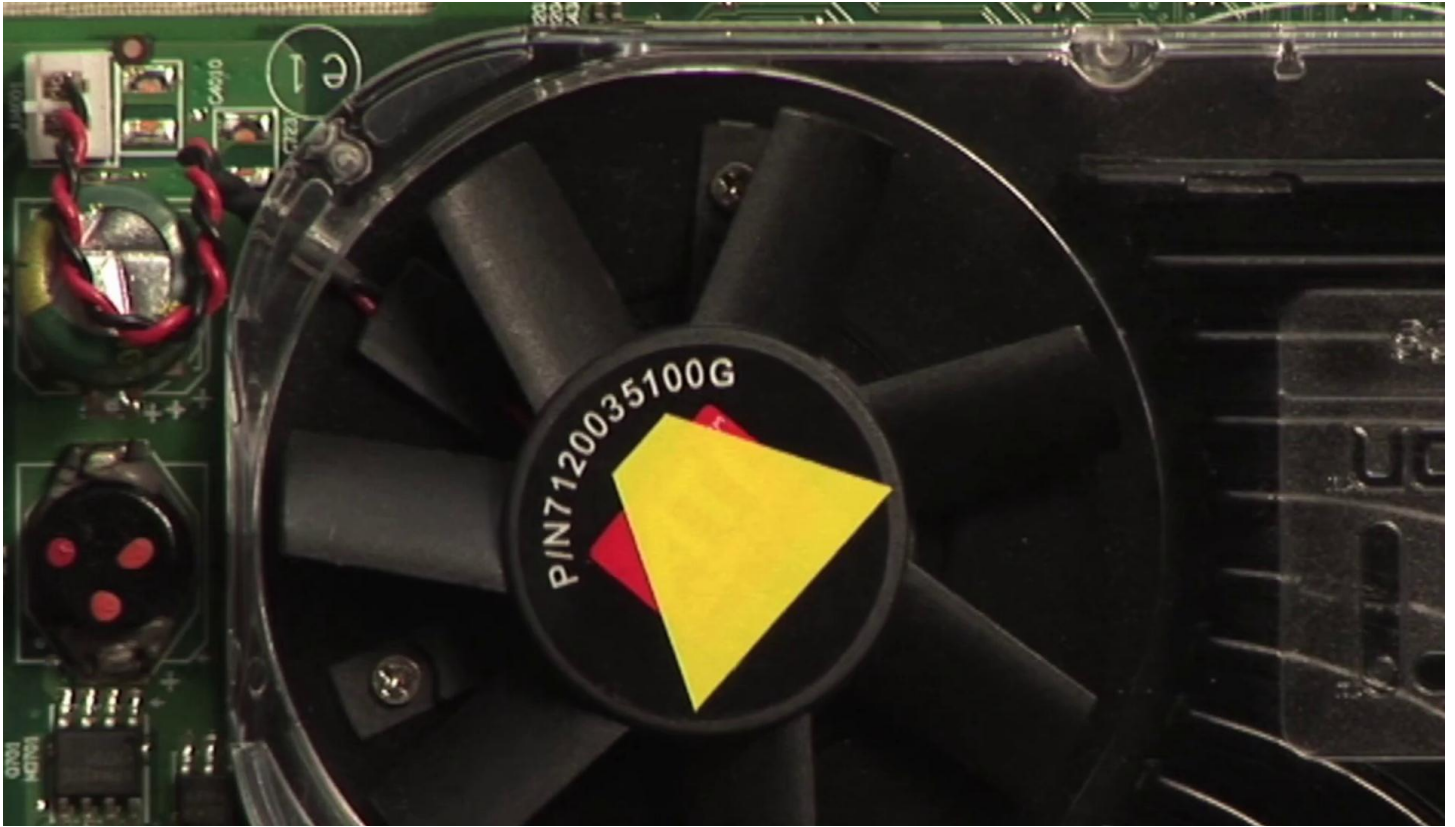
Notes

Summary

6m 28s







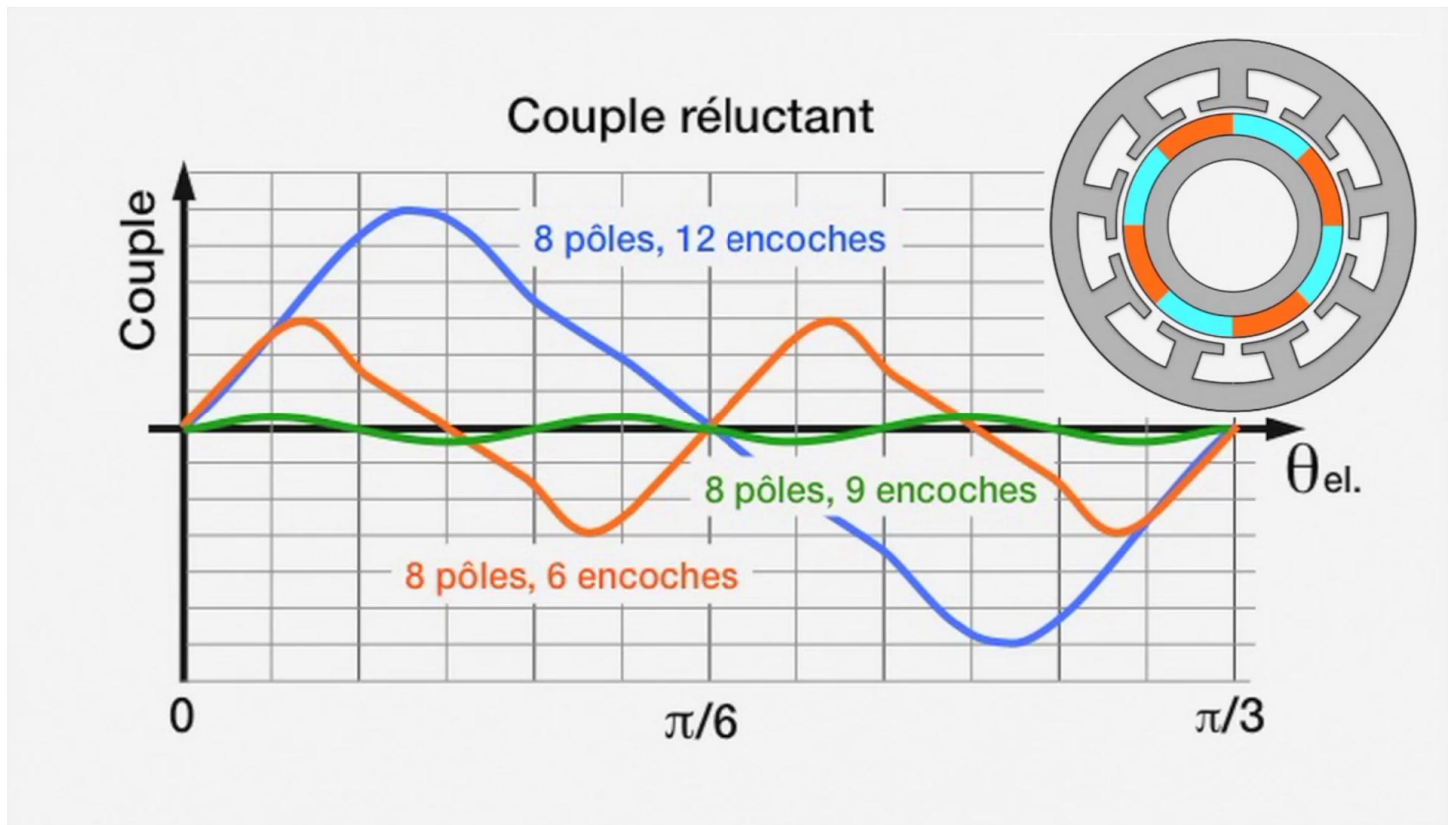
Le couple réactif est généré par l'interaction des aimants avec les dents statoriques, comme le circuit magnétique associé au moteur cherche toujours à minimiser son énergie il se place automatiquement dans une position d'équilibre. Tout écart de cet équilibre conduit à la création d'un couple, l'amplitude de ce couple est fonction de la forme géométrique des dents et de la distribution du champ magnétique dans l'entrefer, sur un tour complet du moteur sa moyenne est nul.

Notes

Summary

7m 00s





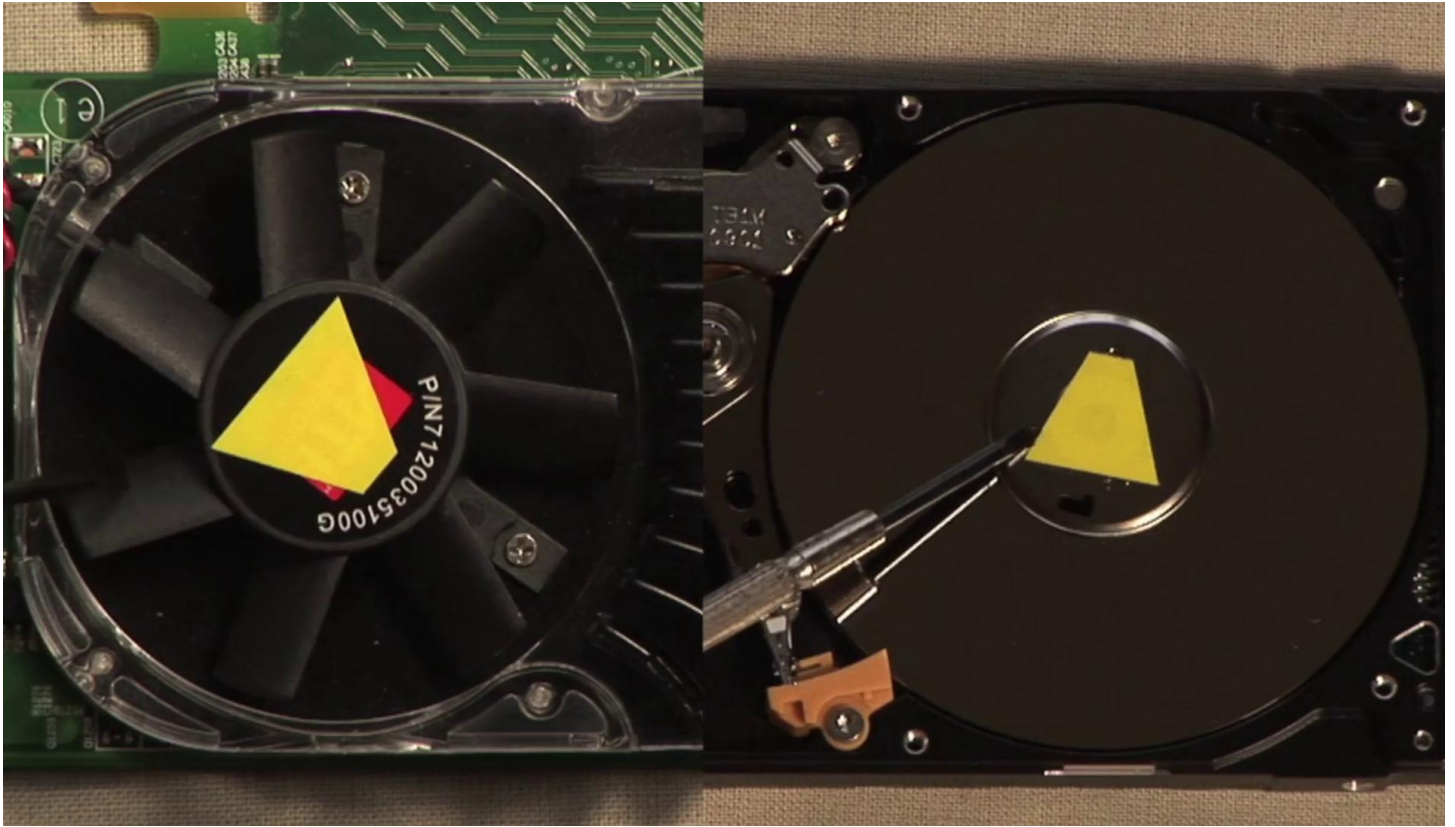
Suivant la configuration du moteur à savoir le nombre de pôles et d'encoches la valeur de ce couple peut être plus ou moins importante, par exemple, pour un même rotor le couple réluctant associé à la configuration 8 pôles, 12 encoches sera important.

Notes

Summary



7m 41s



Il sera diminué pour la variante 8 pôles, 6 encoches et sera nettement plus faible pour la version 8 pôles et 9 encoches, un moteur à stator plat c'est à dire sans encoches n'a pas de couple réluctant, pour certaines applications comme un moteur pas à pas on cherche à augmenter ce couple alors que pour d'autres comme un disque dur par exemple on cherche à le supprimer.

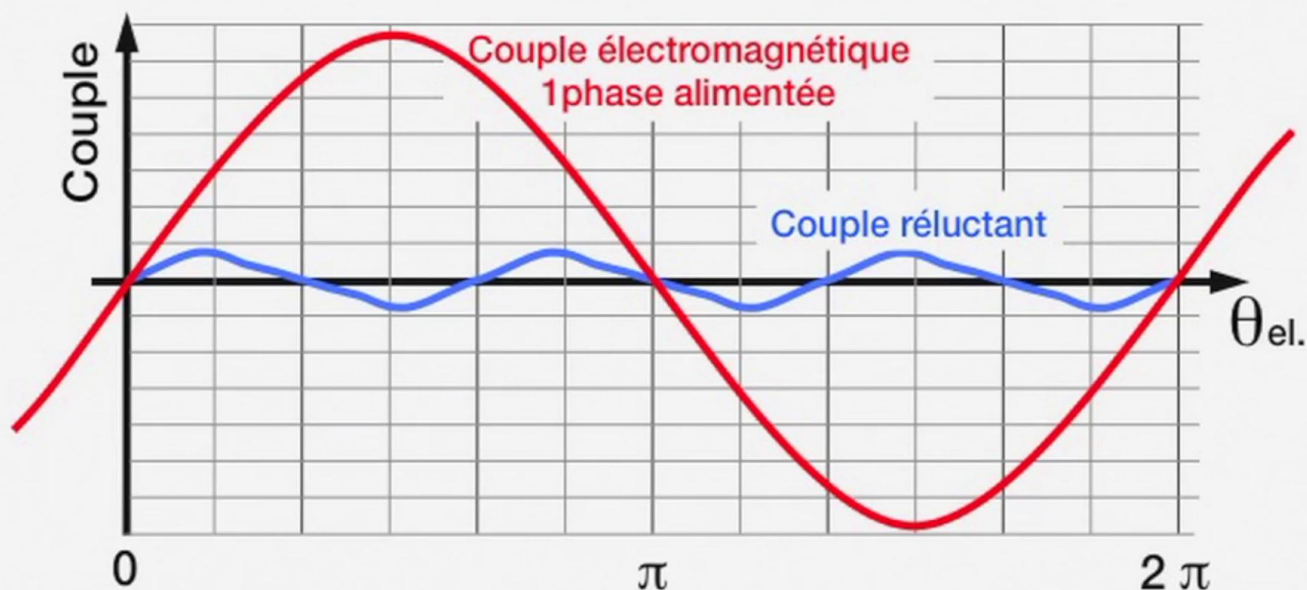
Notes

Summary



8m 14s

## Couple électromagnétique



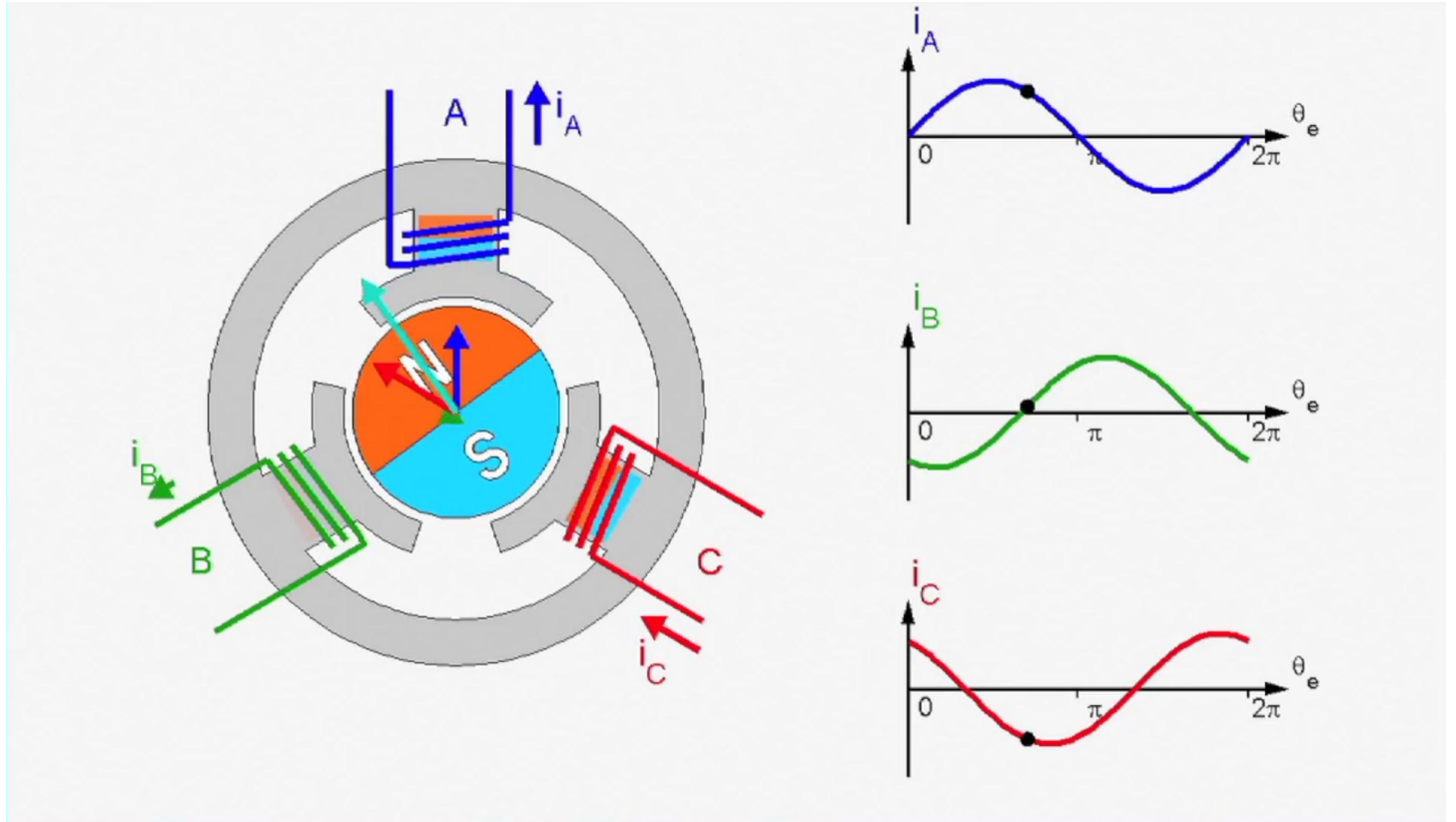
Le couple électromagnétique est créé par l'interaction du champ des aimants avec celui des bobines alimentées, sa valeur est nettement plus importante que celle du couple réluctant, pour un moteur composé de trois bobines une par phase et d'une paire de pôles magnétiques, l'alimentation de la bobine associée à la phase A génère un électroaimant associé à cette phase.

Notes

Summary



8m 37s

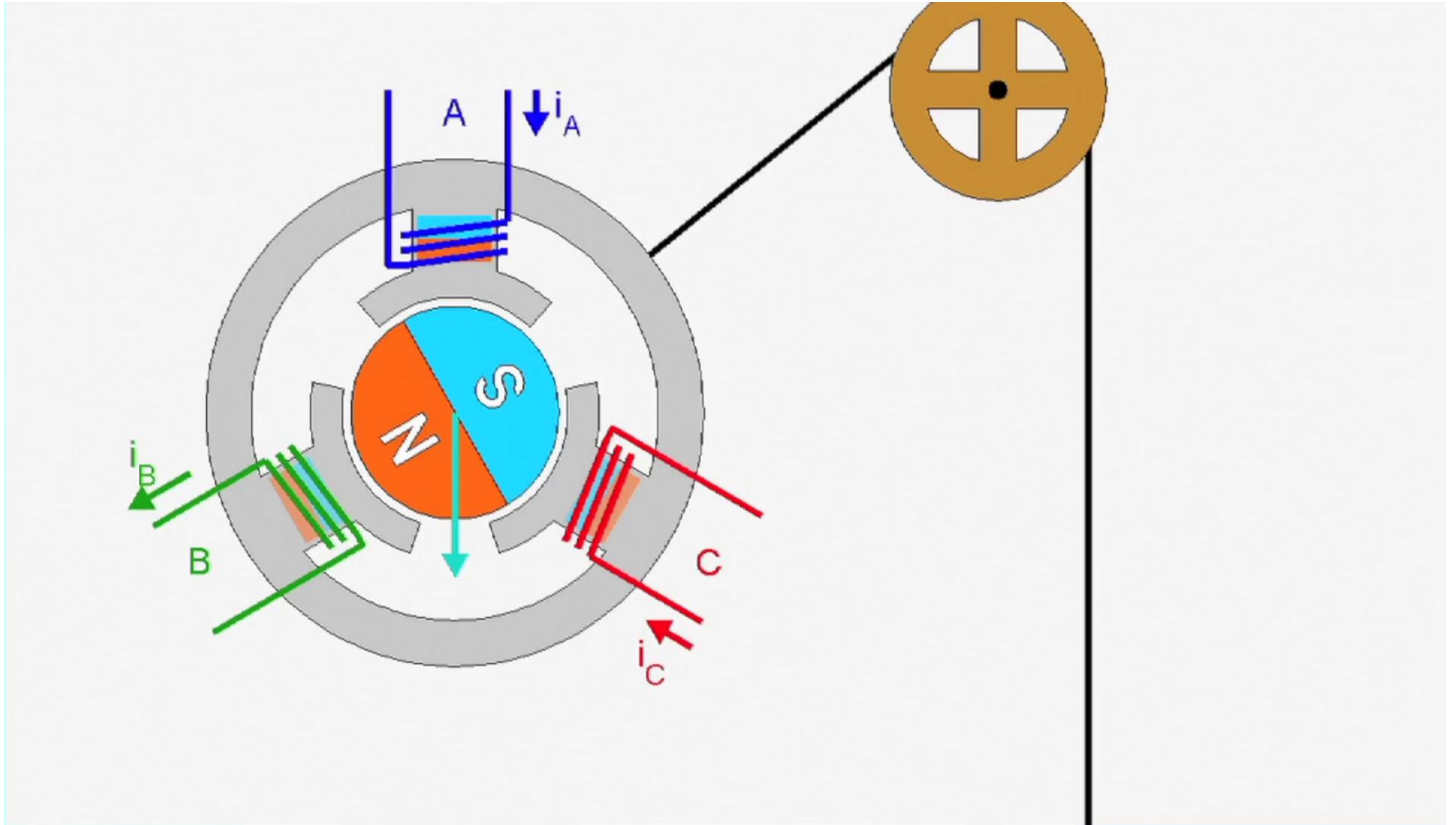


Sachant que des pôles magnétiques opposés s'attirent les pôles du rotor tendent à s'aligner avec le champ généré par la bobine, si l'on veut continuer le mouvement une fois que le pôle est en face de la bobine alimenté, il faut inverser le sens du courant dans la bobine afin d'inverser la polarité de l'électroaimant. Les deux pôles se repoussent alors et le rotor continue sa course. Dans le but de contrôler le sens de rotation du moteur est d'obtenir un couple aussi constant que possible on recourt aux deux autres phases. En alimentant la phase A avec un courant sinusoïdal, on produit ainsi un champ magnétique variant sinusoïdalement, en faisant de même pour les deux autres phases tout en déphasant chacune d'elles d'un tiers de période on obtient alors trois champs magnétiques sinusoïdaux déphasés. Une fois combinés ces trois champs magnétiques deviennent un champ tournant sur lequel l'aimant du rotor s'aligne, le couple que le moteur fournit est directement proportionnel au courant qui le traverse.

Notes

Summary





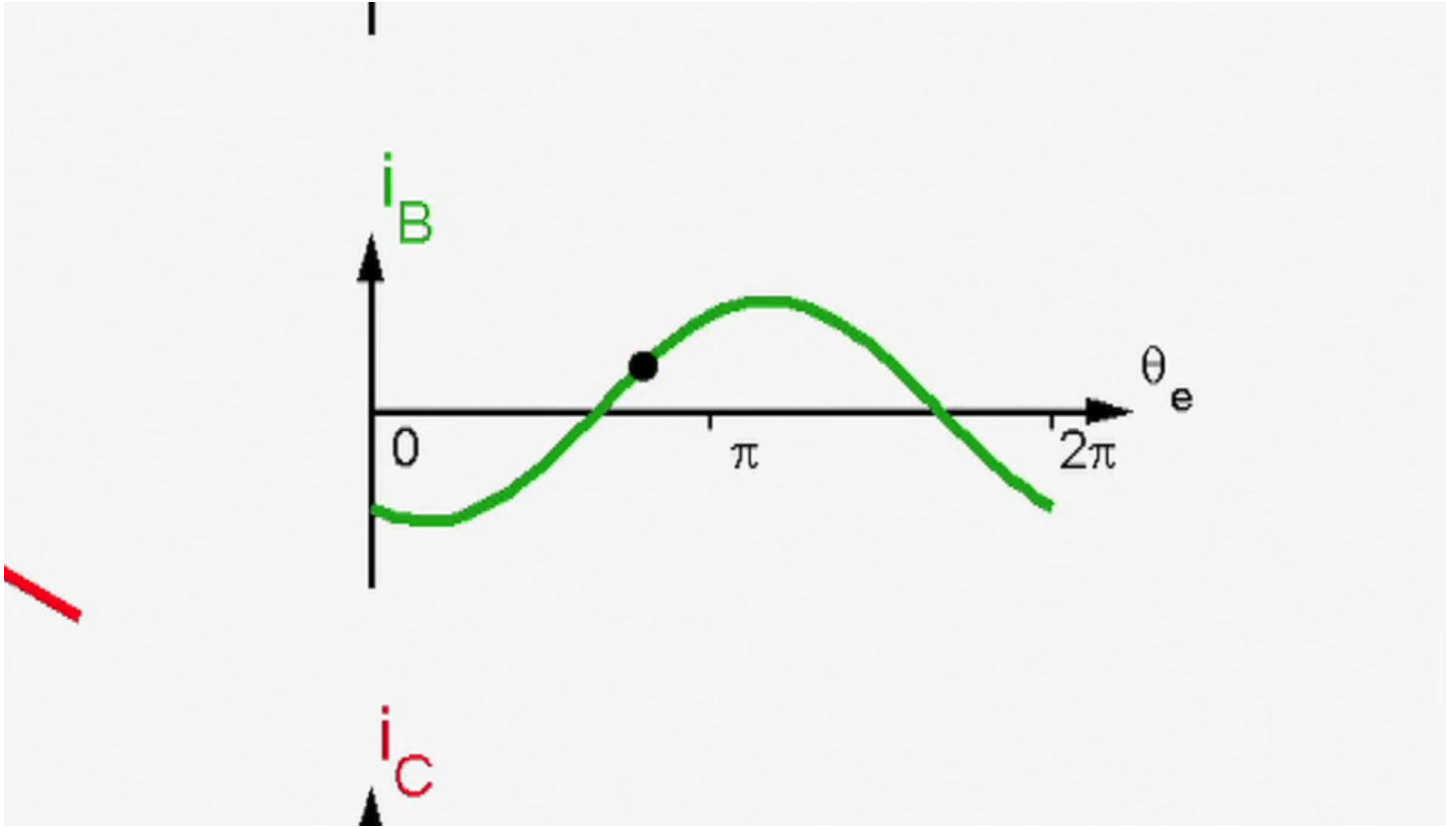
Si le champ tournant est en avance sur le rotor l'aimant est tirée par le champ magnétique le couple électromagnétiques ainsi créé permet alors de soulever une charge et l'énergie électrique est convertie en énergie mécanique via l'énergie magnétique. Par contre si le champ tournant est en retard sur le rotor, il agit comme un frein et sert à retenir une charge dans sa chute, ici le moteur fonctionne en mode générateur car il convertit de l'énergie mécanique en énergie électrique.

Notes

Summary



10m 42s

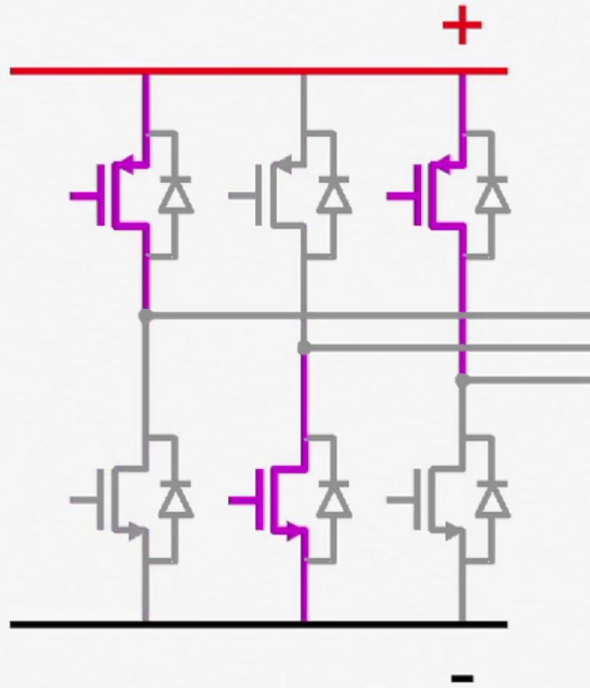


Dans la pratique, plutôt que d'utiliser deux complexes générateur sinusoïdaux pour alimenter les phases du moteur, on utilise de préférence un pont onduleurs composé de six transistors.

Notes

Summary





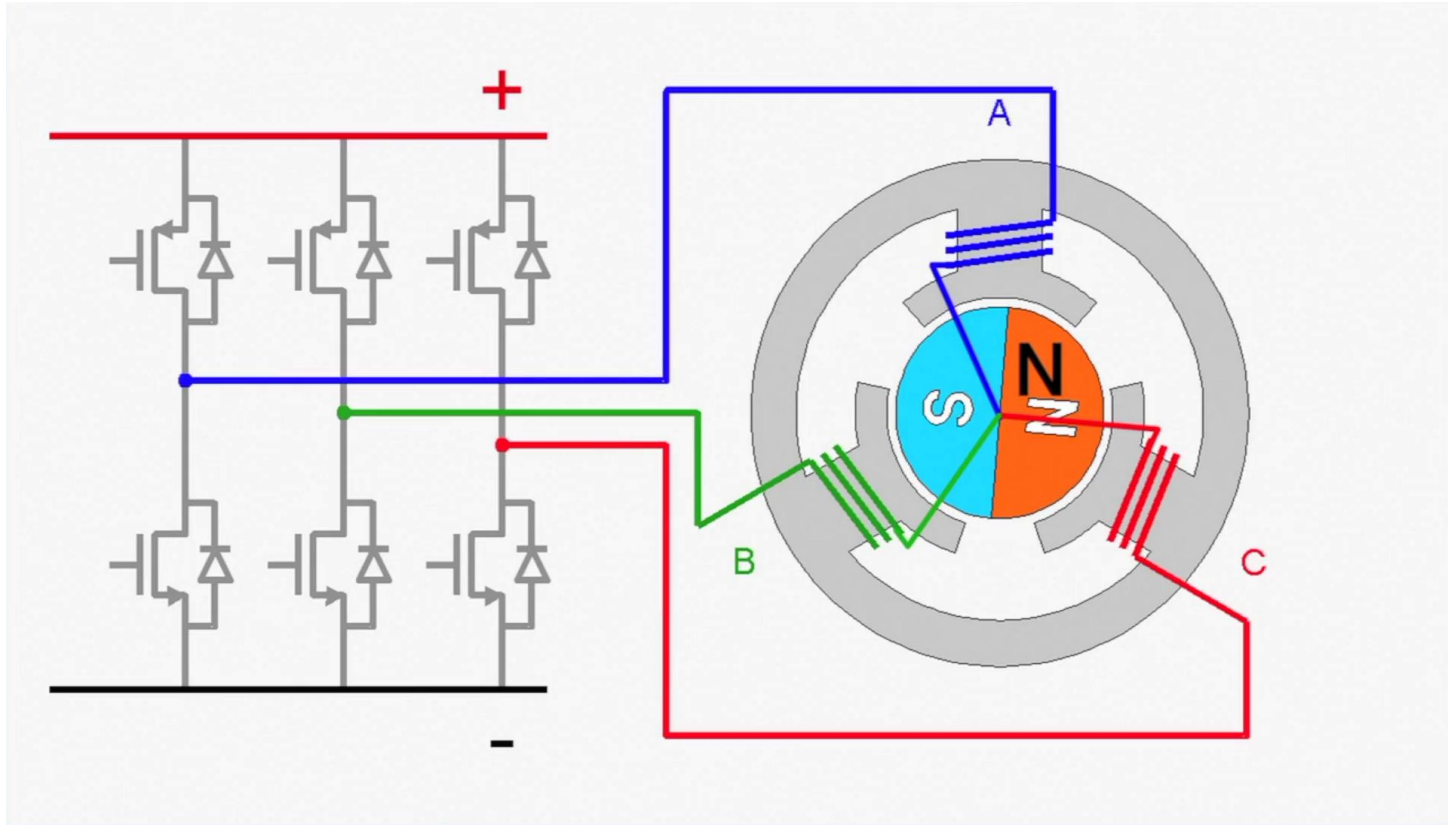
Chacun d'eux fonctionne soit en mode bloqué soit saturé ils peuvent être comparés à des interrupteurs. La diode de roue libre indispensable permet l'extinction du court de phase lorsque le transistor passe à l'état bloquant, pour éviter tout court-circuit 2 transistors d'une même branche ne peuvent conduire simultanément ce qui laisse toutefois plusieurs stratégies d'alimentation possible.

Notes

Summary

11m 36s





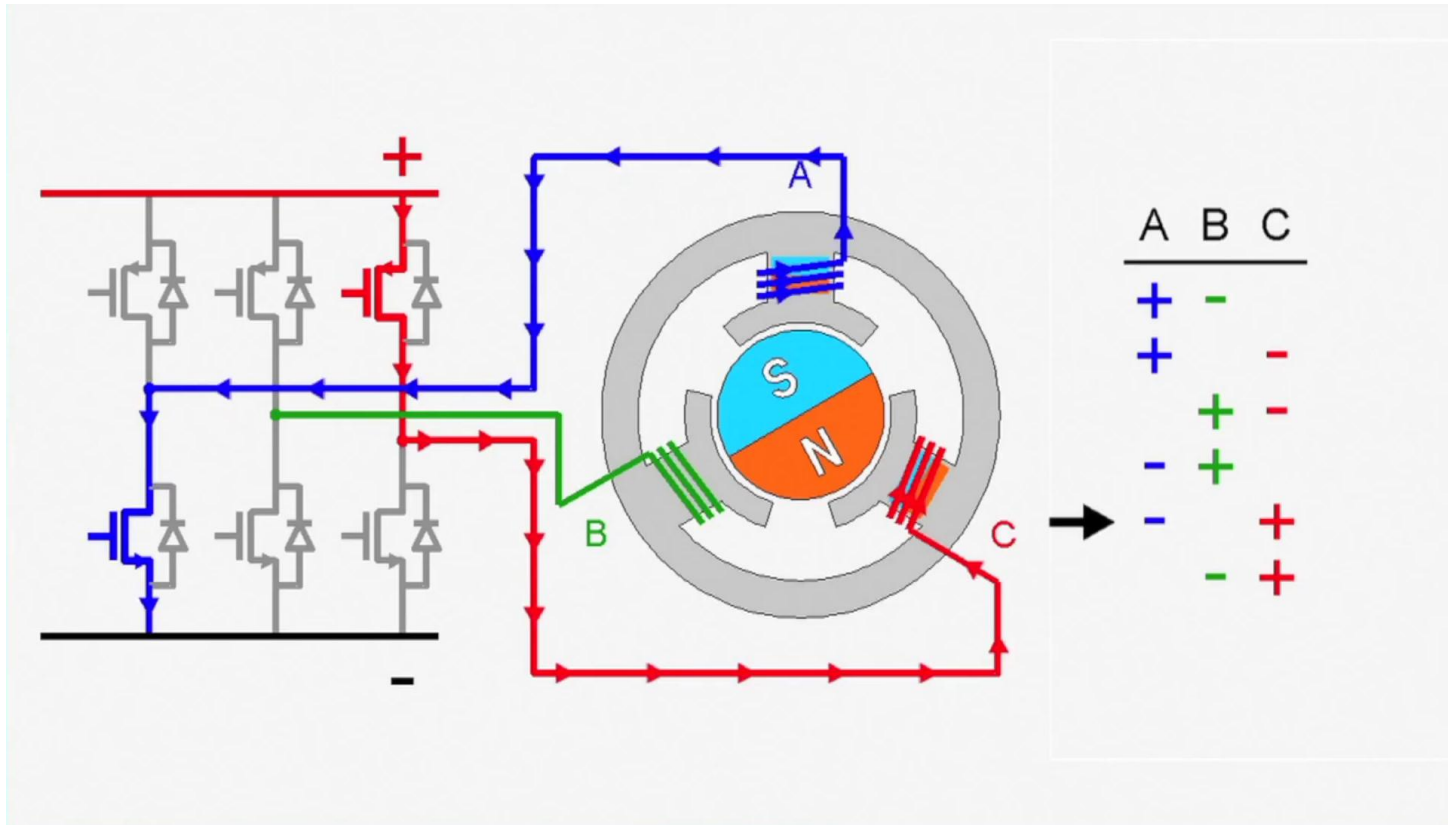
C'est le type de commande choisi qui va déterminer la séquence de conduction des transistors, pour un moteur dont les phases sont connectées en étoile la commande à 120 degrés est actuellement la plus courante.

Notes

Summary



12m 21s

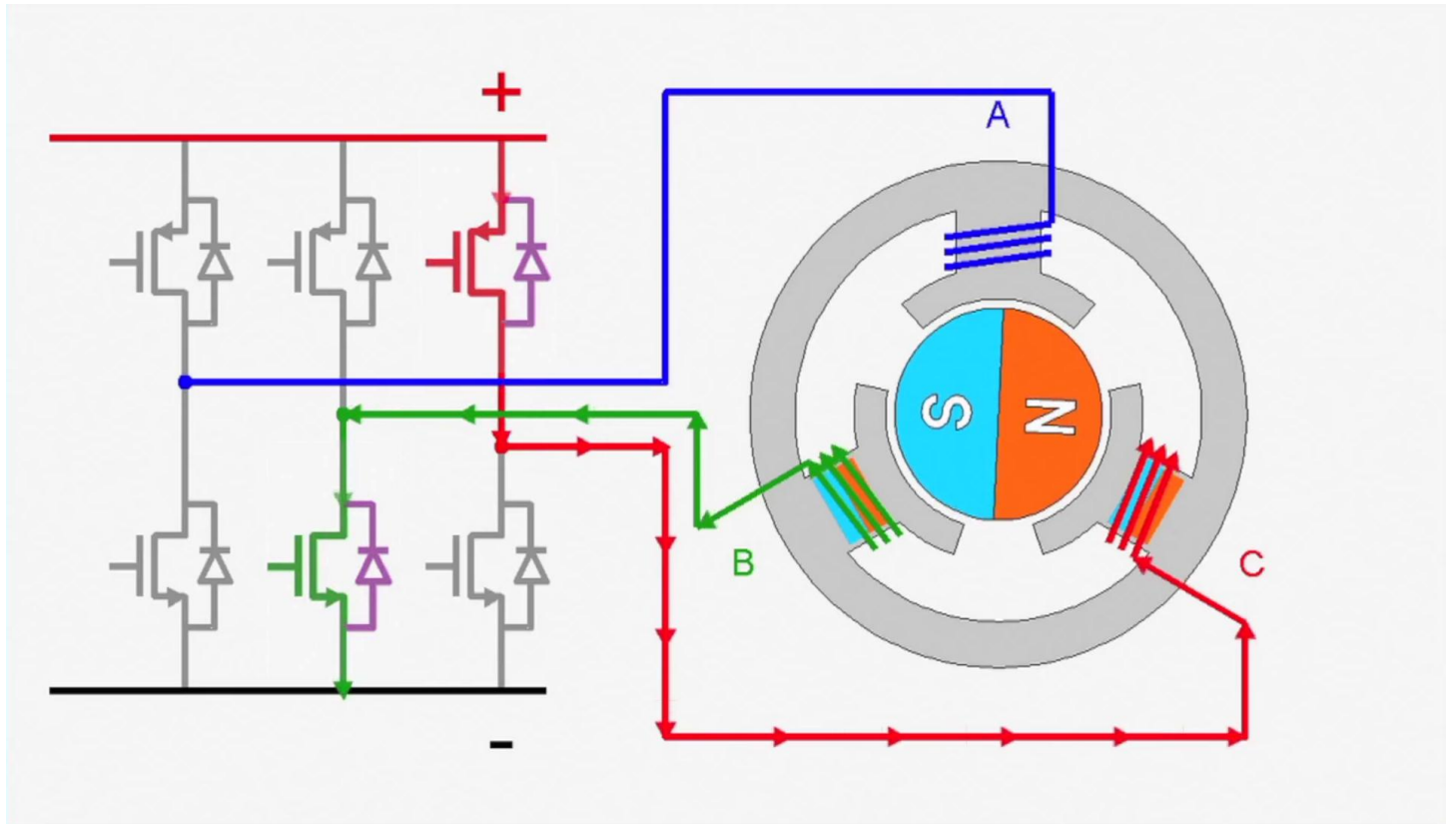


La commande à 120° où two phases on consiste à n'alimenter que deux phases du moteur à la fois et à laisser la troisième flottante, chaque phase est ainsi traversée pendant un tiers de période soit 120 degré électrique par un courant positif, un tiers de période par un courant négatif et est flottante le reste du temps. La table de commutation divisée en 6 prend la forme suivante, quelle que soit la position il n'y a toujours que deux transistors saturés 1 relié à la borne positive du bus d'alimentation transistors du haut et un à la borne négative transistor du bas. Le contrôle du moteur s'effectue en agissant soit sur la tension soit sur le courant, la régulation en tension consiste à contrôler la tension de phase du moteur en agissant sur la tension d'alimentation du pont, la régulation au courant s'effectue en contrôlant le court en deux phases par le hachage.

Notes

Summary



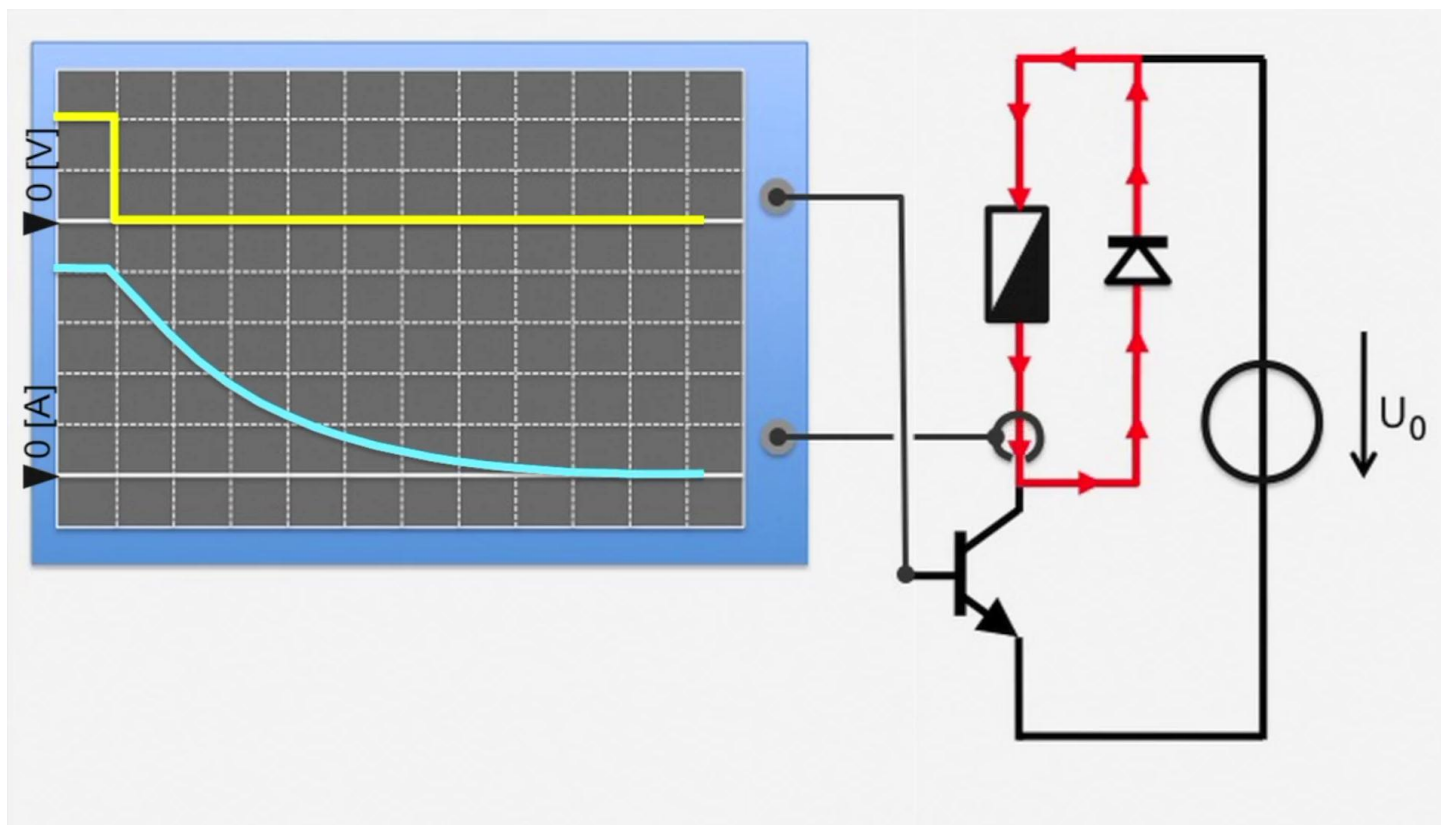


Le hachage consiste à limiter le courant dans une phase afin qu'ils n'atteignent pas des valeurs excessives pour cela on commute à haute fréquence les transistors correspondant à la séquence en cours, la fréquence de hachage des transistors est de plusieurs ordres de grandeurs supérieure à celle de la commande.

Notes

Summary





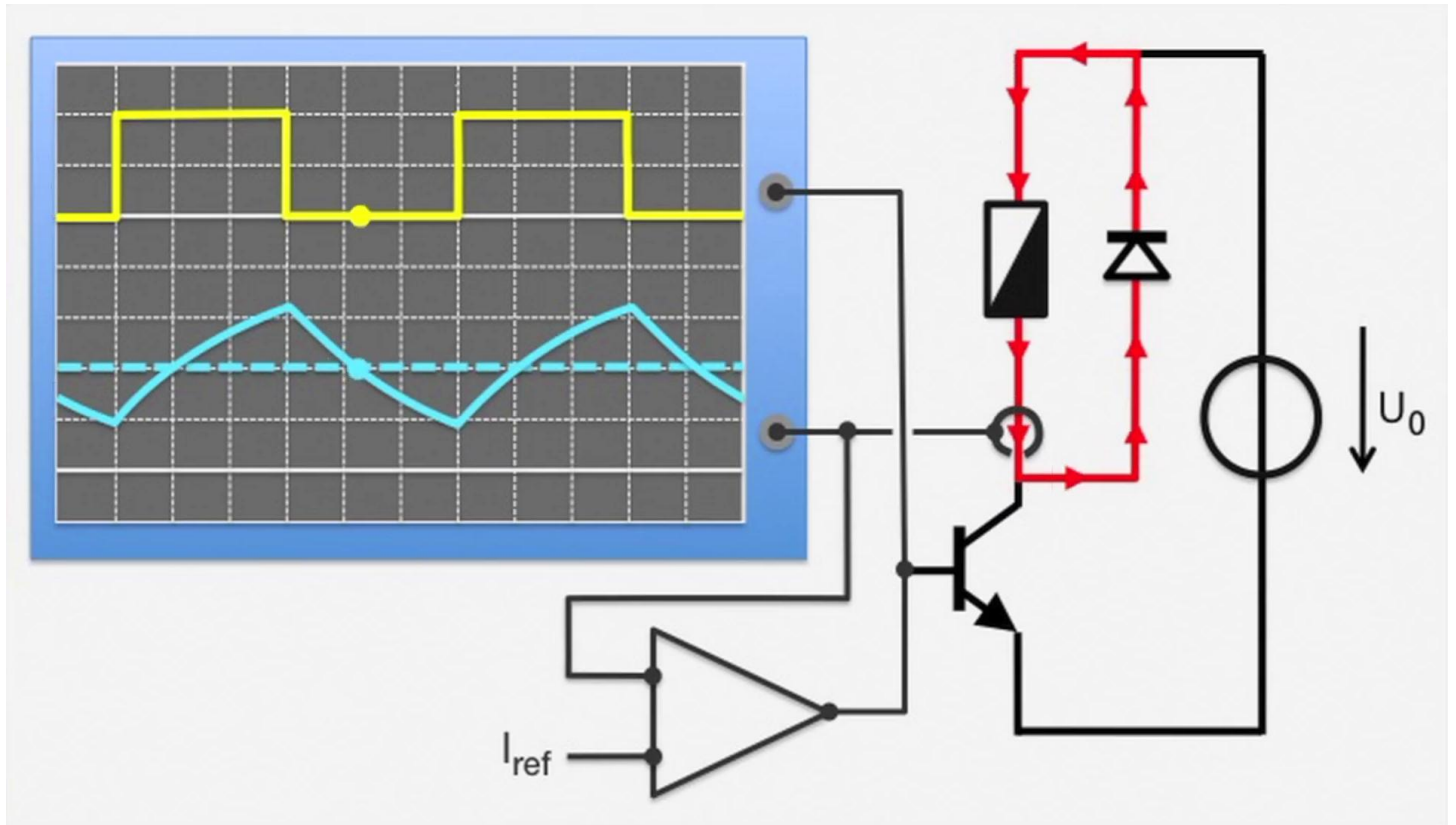
Dans un système électrique de type inductif comme celui représenté ici lors de l'enclenchement ou du déclenchement du transistor le courant évolue de la façon suivante.

Notes

Summary

14m 35s





Sa valeur moyenne dépend des caractéristiques du circuit électrique et du taux de hachage à savoir le rapport entre le temps de conduction et la période du signal. Un système de réglage basé sur la mesure du courant commute le transistor afin de respecter une valeur de consigne, la fréquence de hachage et généralement comprises entre 18 et 25 Kilohertz afin de ne pas être audible, appliquée au moteur synchrone à aimant permanent commandé à 120 degrés lors du hachage le courant et la tension de phase du moteur prennent la forme suivante.

Notes

Summary



# Angle de commutation

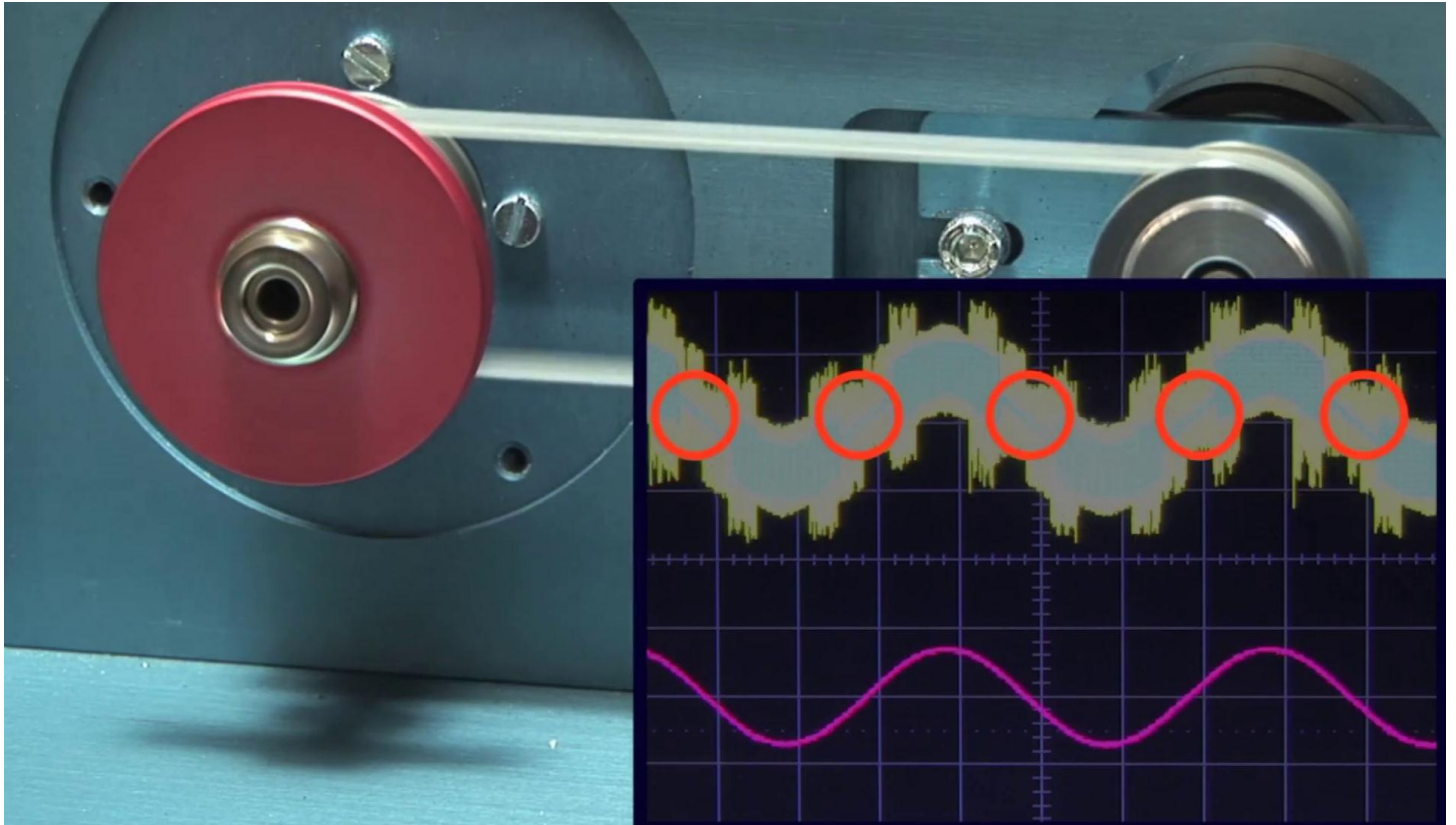
Ici pour mieux visualiser la tension deux phases qui est hachée on utilise un filtre mathématique, la valeur du courant est limitée et ne peut dépasser la valeur de consigne. Cette façon de réguler le courant du moteur permet de mieux contrôler le couple est la vitesse, de plus il permet d'optimiser les caractéristiques du moteur au régime nominale sans tenir compte des contraintes du démarrage. Par contre le moteur aura tendance à provoquer du bruit électromagnétiques, voir audible dans certains cas de plus son rendement sera légèrement diminué.

Notes

Summary

15m 46s





Si l'on mesure la tension aux bornes des phases du moteur lorsqu'on l'entraîne en génératrice on observe la tension induite de mouvement. Lorsque le moteur est entraîné par son alimentation on observe la tension de phase. Afin de visualiser simultanément la tension de phase et la tension induite correspondante, on accouple deux moteurs identiques, le premier fonctionne en moteur et entraîne le second en générateur ce montage permet de visualiser l'angle de commutation epsilon. Cet angle représente le déphasage entre la tension d'alimentation et la tension induite de mouvement, lorsque la tension induite est en phase avec celle de l'alimentation l'angle de commutation nul. Si la tension d'alimentation est en avance sur la tension induite l'angle epsilon est négatif, si au contraire elle est en retard sur la tension induite l'angle epsilon est positif. Pour une commande à 120 degrés en régime moteur la tension induite de mouvement n'est mesurable que lorsque la phase est laissée flottante c'est à dire qu'un tiers du temps.

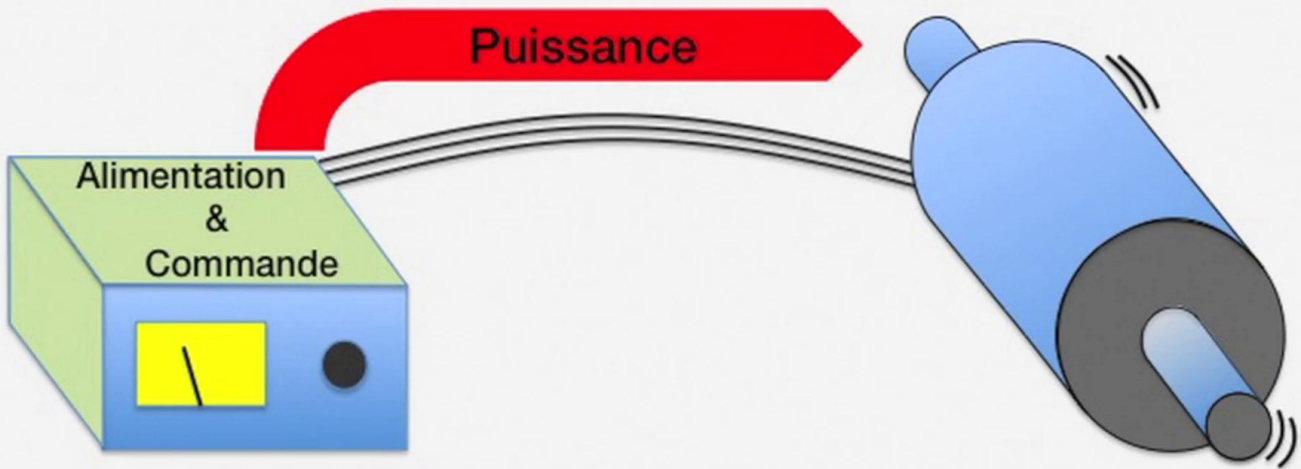
Notes

Summary

16m 35s



# Moteur en boucle ouverte

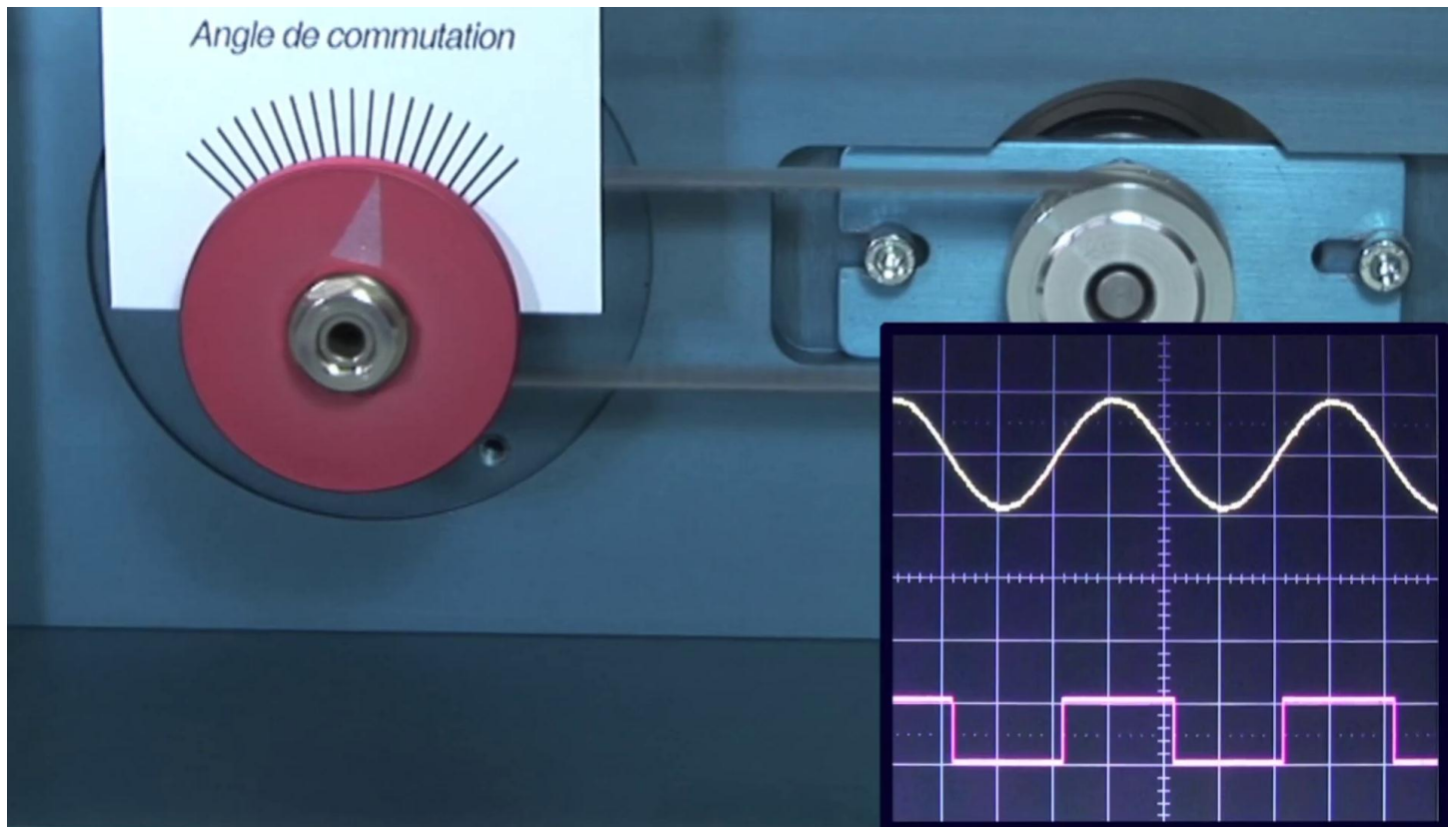


Lorsque l'on branche le moteur à une source de tension triphasé en laissant le rotor suivre le champ tournant on dit que le moteur est en boucle ouverte.

Notes

Summary





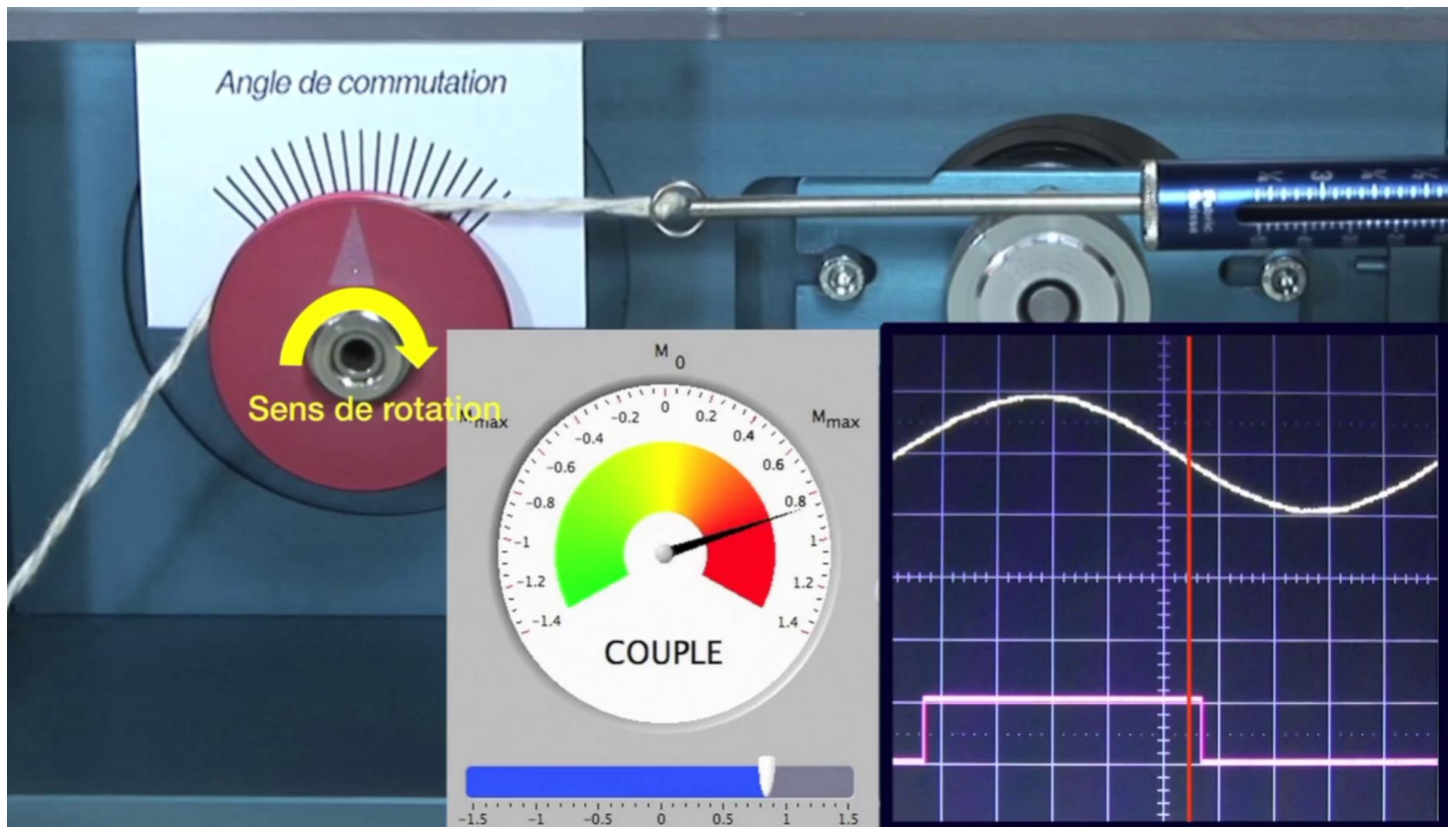
En fait le rotor suit le champ tournant sans le contrôler, pour faire démarrer le moteur lorsqu'il est en boucle ouverte on a plusieurs possibilités, on peut le faire démarrer en l'alimentant à fréquence variable. La trace jaune en haut montre la tension d'une des phases du moteur, la trace rose en bas indique la position du rotor. Dans le cas d'un démarrage en boucle ouverte à fréquence variable l'accélération du champ tournant doit être bien maîtrisée afin que le rotor puisse le suivre. Lorsque l'on ne dispose que d'une alimentation à fréquence fixe le 50 hertz du secteur par exemple on est alors obligé de le faire démarrer avec un moteur auxiliaire. Lorsque le rotor du moteur atteint une vitesse proche de celle du champ tournant il se synchronise avec celui-ci, voilà il est synchronisé. Le stroboscope permet de se déplacer avec le champ tournant.

Notes

Summary



18m 34s



Pour charger le moteur synchrone à aimant permanent on utilise un frein à cabestan, celui-ci est constitué d'une ficelle qui frotte sur la roue accouplée au moteur, une extrémité de la ficelle est reliée à un point fixe et l'autre à un dynamomètre, plus on tire plus le frottement sur la roue augmente et charges ainsi le moteur. Lorsque l'on charge le moteur lorsqu'il est en boucle ouverte on remarque que la flèche marquée sur le rotor se déplace dans le sens opposé à celui de rotation ce déphasage est visible au niveau des traces de l'oscilloscope, autrement dit pour pouvoir fournir le couple demandé le moteur adapte son angle epsilon en se décalant par rapport au champ tournant. Dans ce cas la tension induite se retrouve en retard sur la tension d'alimentation, l'angle epsilon est négatif. L'angle epsilon est déterminé par l'intersection de la caractéristique de couple du moteur et le couple résistant.

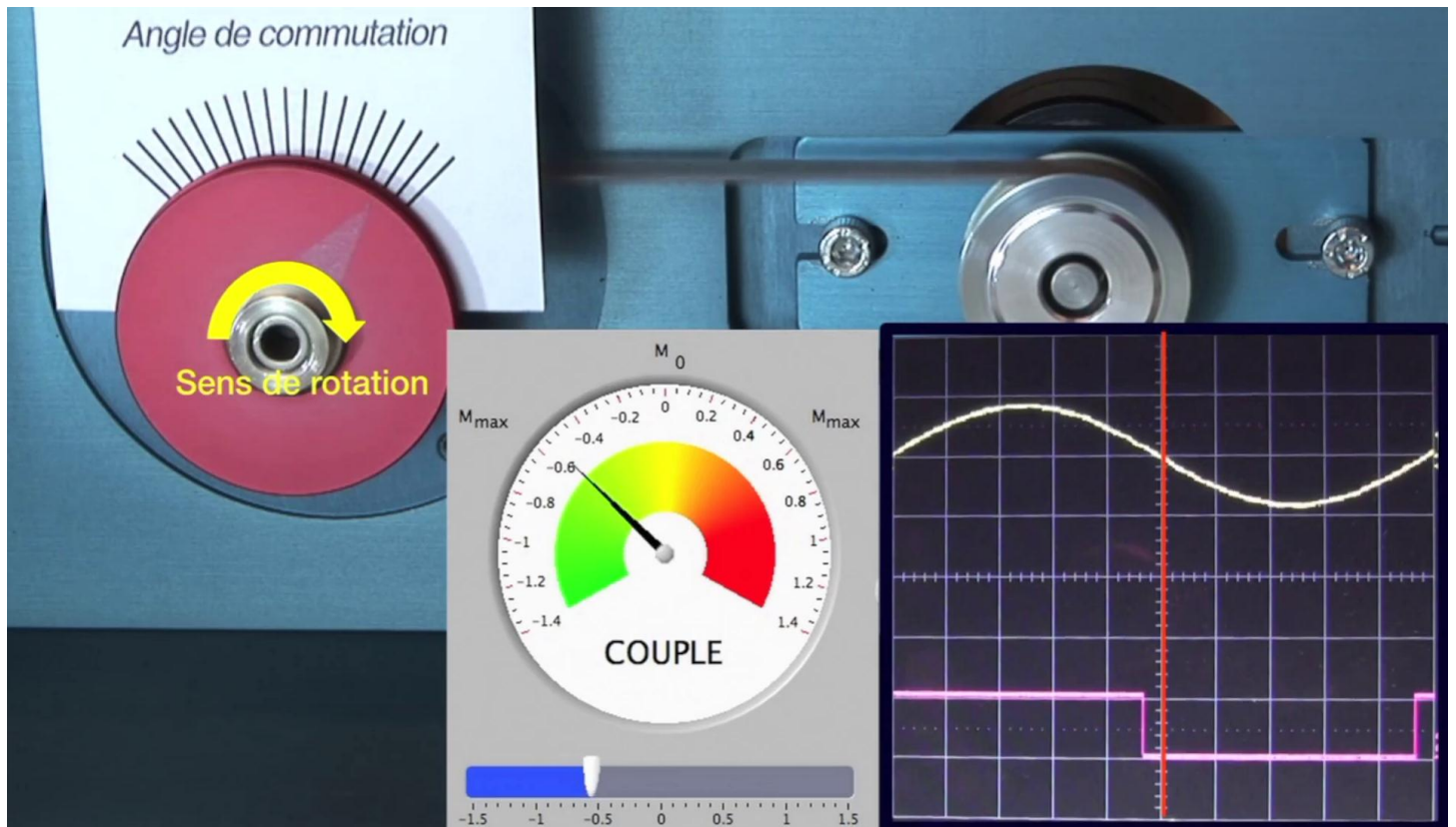
Notes

Summary

19m 51s







Ainsi si l'on charge le moteur négativement c'est à dire qu'on l'entraîne en génératrice l'angle epsilon augmente afin de s'opposer à toute variation de vitesse. Dans ce cas l'angle epsilon devient positif.

Notes

Summary

21m 30s





Lorsque le moteur fonctionne en boucle ouverte:

- Pour le faire démarrer il faut:
  - L'alimenter à fréquence variable;
  - Si la fréquence est fixe, le lancer à l'aide d'un moteur auxiliaire.
- Pour une morphologie donnée, sa vitesse dépend uniquement de la fréquence d'alimentation;
- Le moteur adapte automatiquement l'angle Epsilon en fonction du couple à fournir;
- Si la charge est trop élevée, il décroche.

Si l'on augmente trop la charge du moteur celui-ci finit par décrocher car l'angle epsilon ne peut s'adapter indéfiniment pour conserver la vitesse du champ tournant. On peut nettement améliorer les performances du moteur en asservissant la commutation des phases sur la position du rotor, le moteur fonctionne alors en boucle fermée.

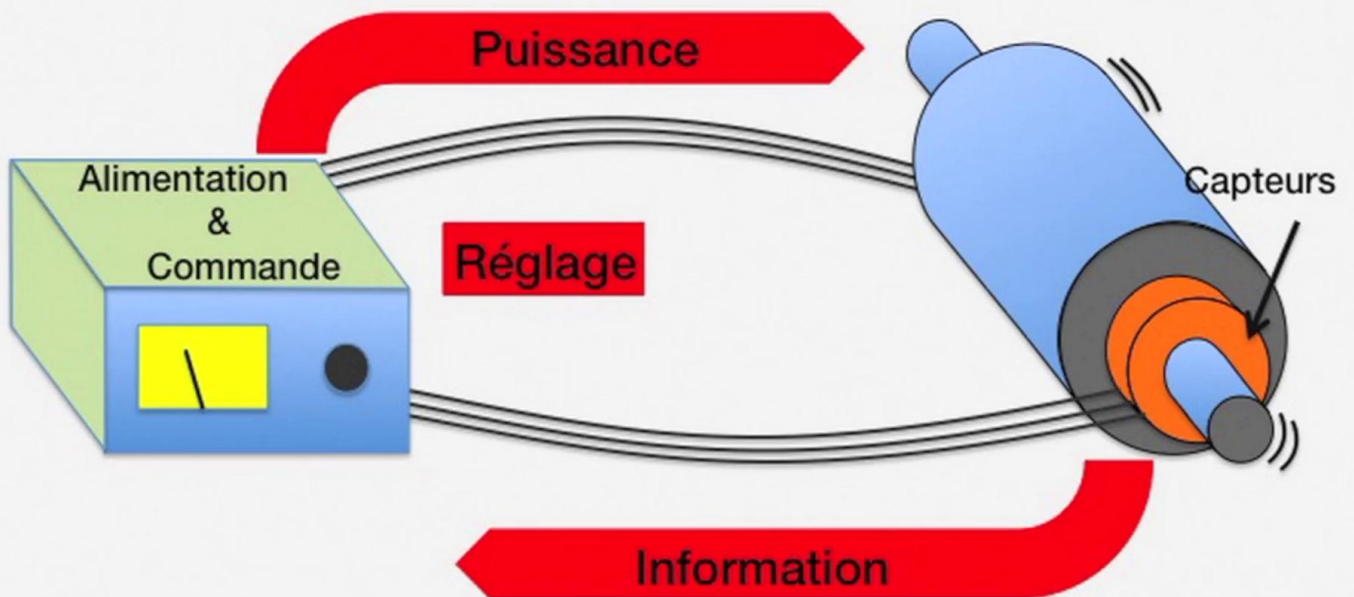
Notes

Summary

22m 05s



# Moteur en boucle fermée



Le but est de produire un couple optimal en minimisant au mieux en supprimant le déphasage entre le courant de phase et la tension induite.

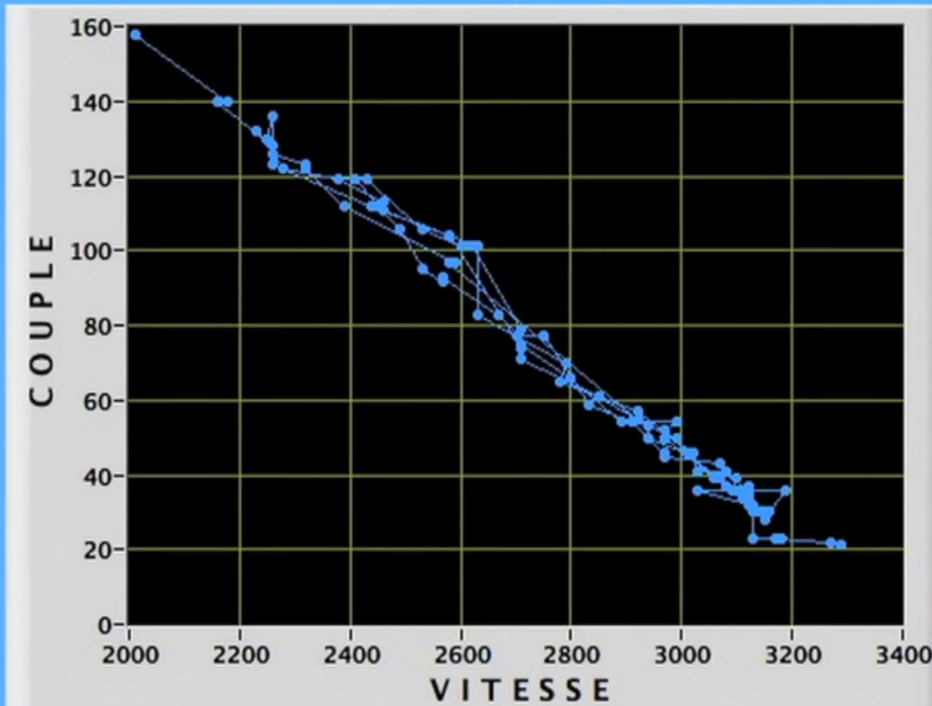
Notes

Summary



22m 59s

## Caractéristique COUPLE - VITESSE



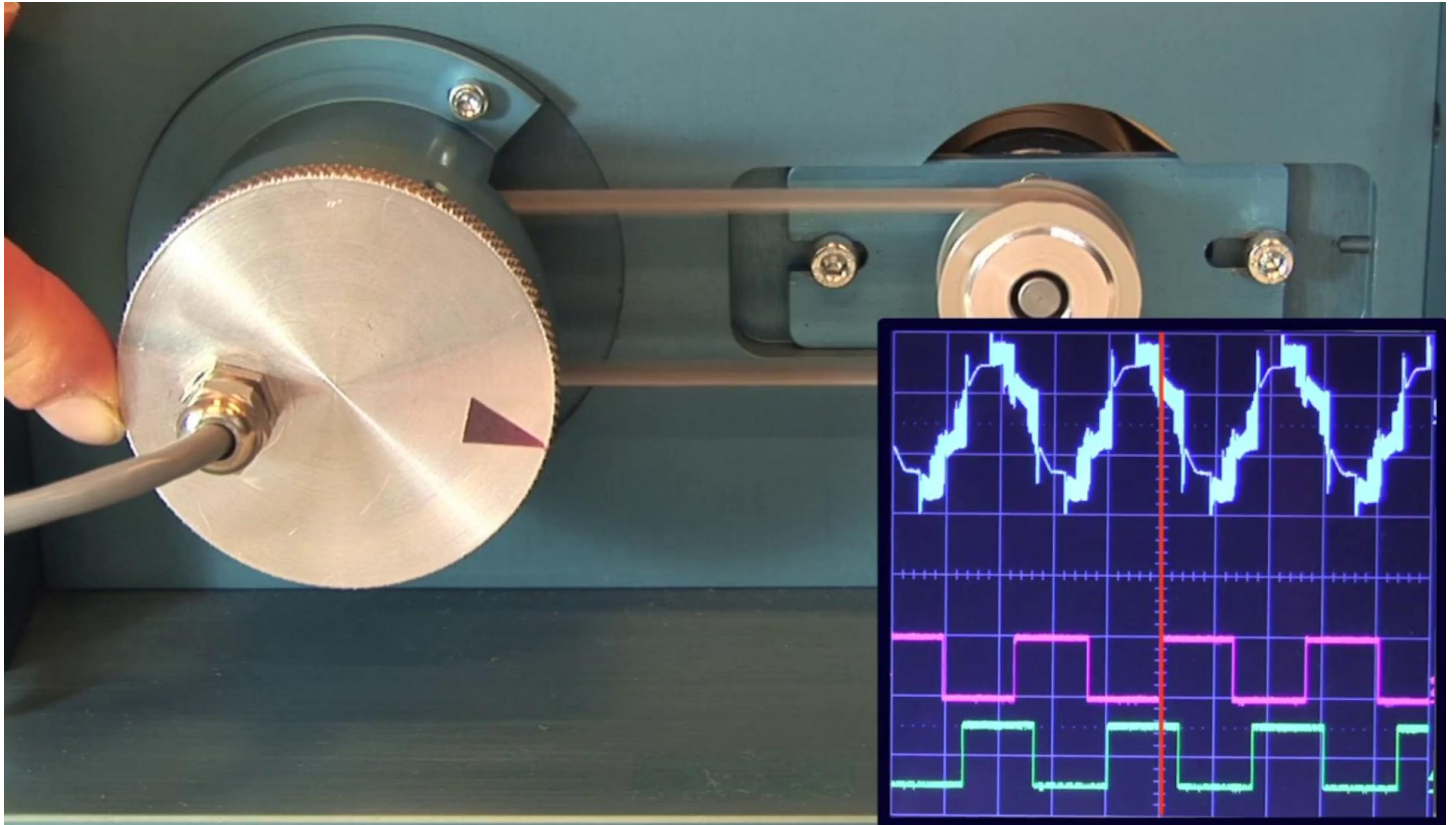
En boucle fermée le moteur peut démarrer seul car la commutation des phases du moteur s'effectue toujours au bon moment grâce au capteur matérialisé par des sondes de Hall. Pour des questions de visibilité la tension de phase du moteur haché et filtrée, sa vitesse est proportionnelle à la tension d'alimentation de ces phases. À l'aide du stroboscope on peut mettre en évidence l'angle de commutation, on constate que si la tension d'alimentation dont la vitesse augmente l'angle epsilon lui ne varie pas. Maintenant que le moteur tourne à vitesse constante déterminée par la tension d'alimentation on va le charger, plus on augmente la charge plus il ralentit par contre son angle de commutation reste constant.

Notes

Summary





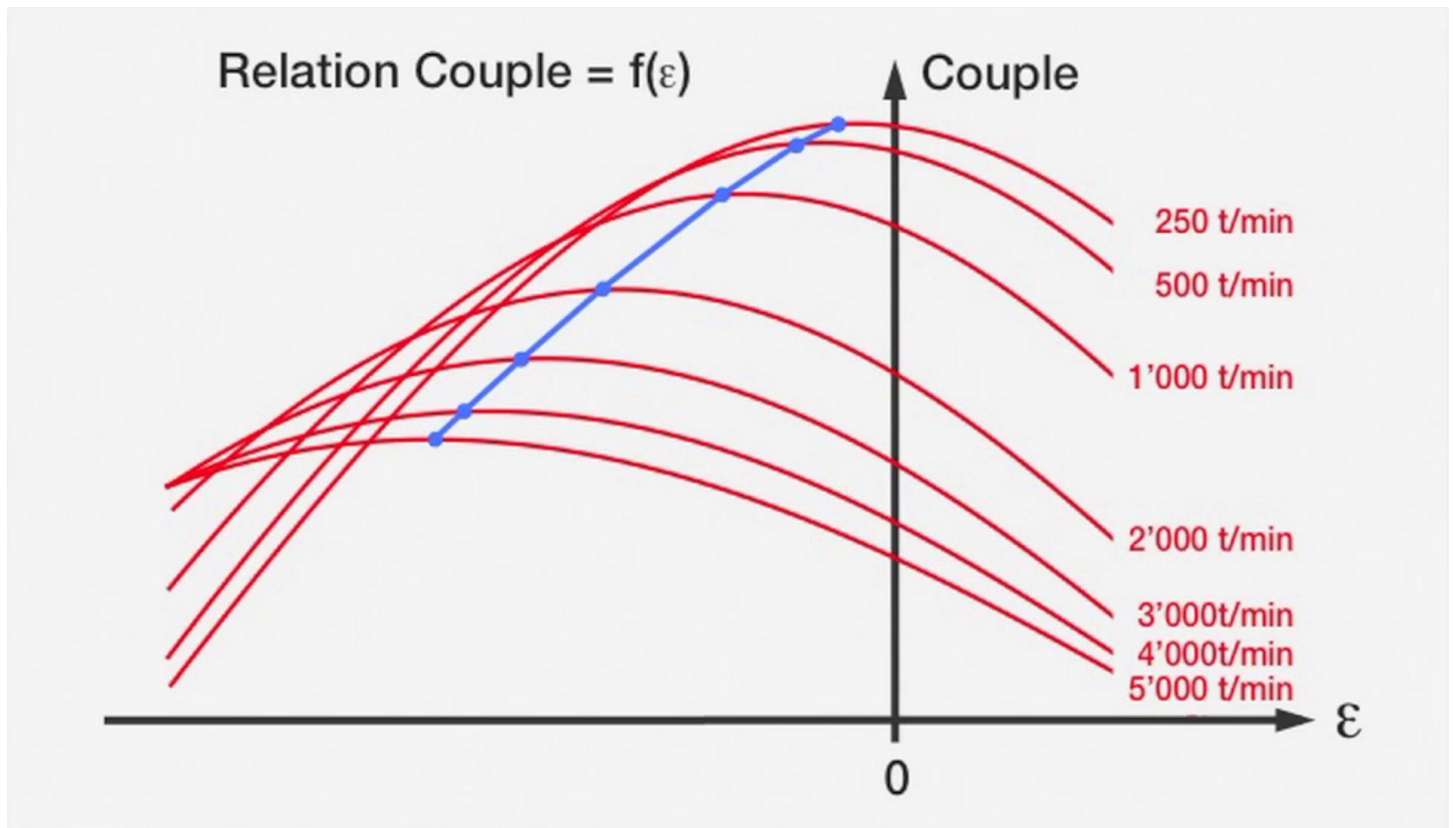


En gardant une même tension d'alimentation on peut sensiblement modifier les performances du moteur en modifiant l'angle de commutation, dans le montage suivant on a remplacé les capteurs internes du moteur par des capteurs externes dont on peut faire varier la position on peut ainsi modifier l'angle de commutation du moteur. Si l'on augmente l'avance à la commutation la vitesse du moteur augmente, on passe alors par un optimum où la vitesse est maximale au-delà elle diminue. Si par contre on applique du retard à la commutation, les performances du moteur se dégradent cela va jusqu'à l'arrêt complet et même le départ en sens contraire.

Notes

Summary





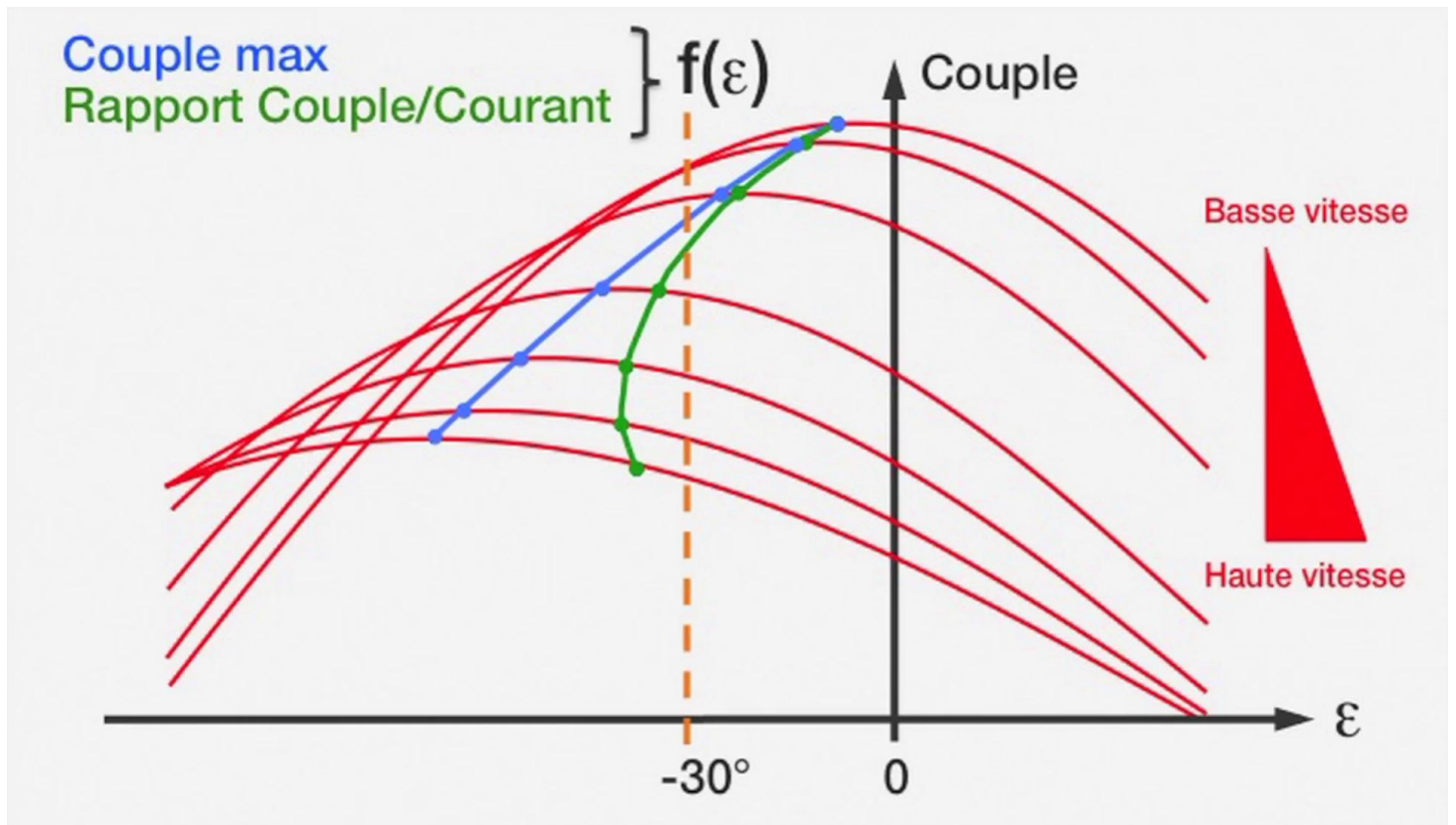
On peut très bien sur une courbe représenter l'évolution de cet angle pour différentes vitesses, plus on veut aller vite plus il faut introduire d'avance à la commutation.

Notes

Summary

26m 48s





L'angle de commutation a également une influence sur le courant consommé, là aussi on passe par un optimum qui correspond à un angle légèrement négatif. En effectuant une série de mesures à différentes vitesses on peut encore déterminer l'angle de commutation optimum pour avoir le meilleur rapport couple sur courant, on remarque que cette fois la valeur d'epsilon varie sur une plage beaucoup plus restreinte que lors de la recherche de la vitesse maximale.

Notes

Summary



27m 01s

Lorsque le moteur fonctionne en boucle fermée:

- Lorsque son angle  $\varepsilon$  est fixe, il se comporte comme un moteur à courant continu classique:
  - Il démarre seul;
  - Sa vitesse est proportionnelle à la tension d'alimentation;
  - Pour une tension donnée, son couple est inversement proportionnel à la vitesse;
  - Son couple est proportionnel au courant de phase.
- La variation de l'angle  $\varepsilon$  modifie sensiblement les performances du moteur, comme la vitesse et la consommation. Une valeur  $\varepsilon$  de  $-30^\circ$  est un optimum.

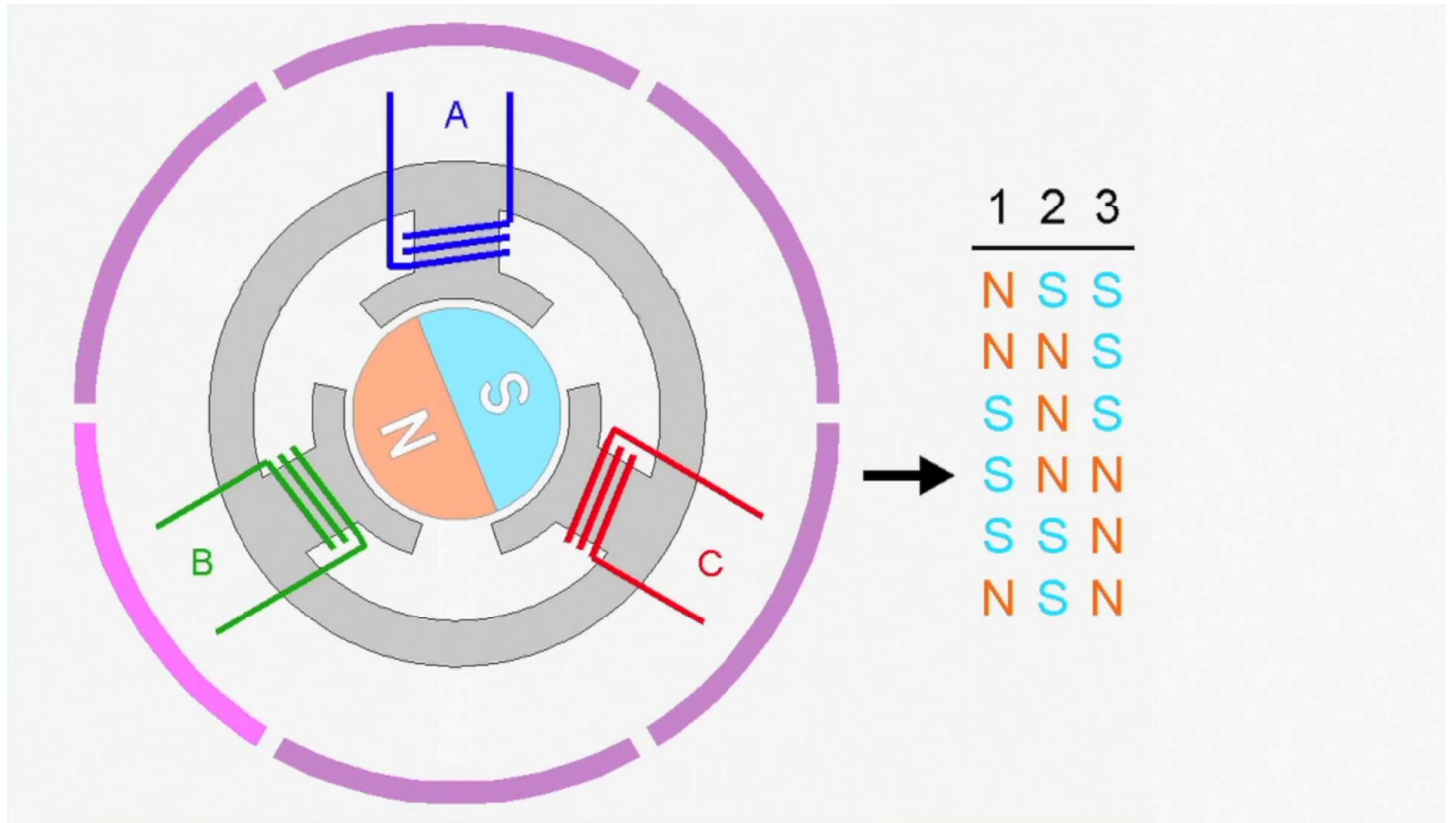
Pour ces raisons la plupart des fabricants de moteurs fixent cet angle de commutation à 30 degrés ce qui correspond au meilleur compromis performances/consommation.

Notes

Summary



28m 04s



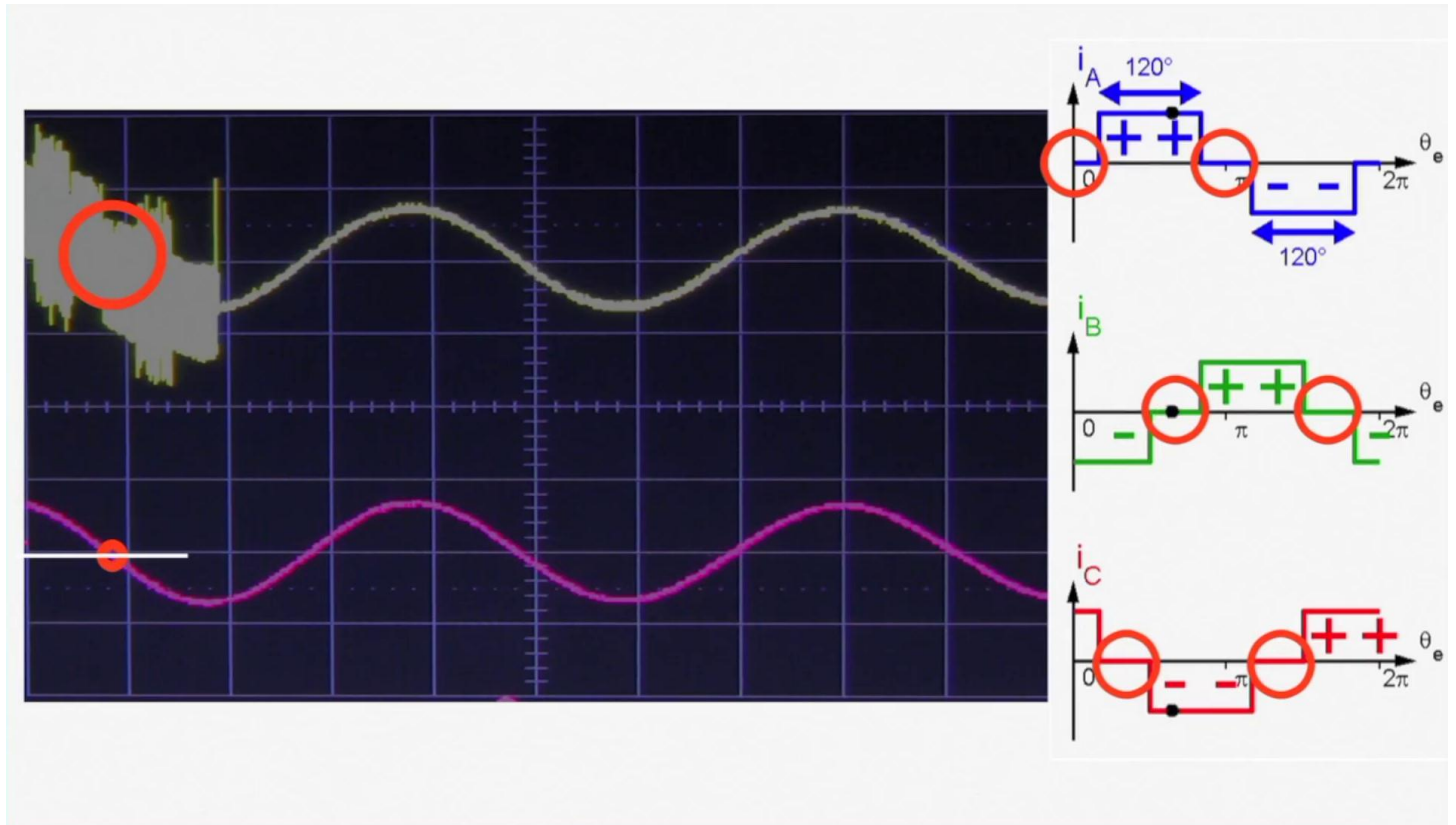
Dans la pratique, pour déterminer la position du rotor on utilise généralement des sondes de Hall, ces sondes renvoient un signal binaire indiquant la polarité du champ magnétique qu'elles voient. En recoupant les signaux obtenus à partir de trois sondes de Hall décalées entre elles de 120 degrés on peut savoir dans quel 6e de période électrique est orienté le rotor. Selon les applications les capteurs sont gênants car ils requièrent de la place, coûtent et peuvent compromettre tout le système si l'un d'eux tombe en panne. Une alternative de plus en plus en vogue consiste à détecter la position du rotor en se passant de capteurs directs ou plutôt en se servant du moteur lui-même comme capteur.

Notes

Summary







On peut alors repérer les passages par zéro de la tension induite et en déduire la position du rotor, cette méthode n'est pas utilisable à basse vitesse car la tension induite proportionnelle à la vitesse est trop faible pour être distingué du bruit, de même le démarrage du moteur s'effectue souvent en boucle ouverte avec toutes sortes de procédures pour le faire démarrer directement dans le sens voulu.

Notes

Summary

29m 59s



## Le moteur synchrone à aimants permanents:

- est très simple de construction;
- peut prendre des formes très diverses;
- nécessite une électronique de commande plus ou moins sophistiquée.

## Son fonctionnement...

- En boucle ouverte, il présente un risque de décrochage et est peu utilisé dans des applications de faible puissance.
- En boucle fermée, il produit des caractéristiques analogues au moteur DC.

Cette méthode de pilotage est parfaitement adaptée à la majorité des applications de ces moteurs.

Notes

Summary

30m 29s





- Une grande variété de possibilités constructives
- Le moteur auto-commuté se comporte comme un moteur DC mais sans balais
- Il existe des solutions pour supprimer les sondes de Hall et utiliser le moteur comme capteur

Madame, monsieur nous voilà arrivés à la fin de ce film, vous avez pu voir une grande variété de possibilités constructive, vous avez pu voir aussi que ce moteur synchrone lorsqu'il est commandé ou alimenté lorsqu'on impose sa fréquence ou lorsqu'on impose son angle de commutation epsilon on obtient finalement des comportements du moteur complètement différents et donc on va finalement appeler ce moteur quand il est en boucle ouverte un moteur synchrone et quand il est en boucle fermée un moteur auto-commuté. Il existe aussi des solutions comme vous avez pu le voir pour supprimer les sondes de Hall et utiliser le moteur comme capteurs lui-même et je vous donne rendez-vous pour d'autres modules sur l'électromécanique dans le futur. Merci.

Notes

Summary

