

Quelques compléments au TD "moteur"

1/ Courant alternatif TRIPHASE

La réalisation d'un champ magnétique tournant repose sur l'alimentation d'une alimentation triphasée, forme "industrielle" moderne d'alimentation électrique.

→ Voir le nombre de fils sur les pyllons électriques HT et THT.

Le triphasé est constitué de 4 fils, dont 3 un est appelé "neutre" et les trois autres

appelés "phases" et portés (vis-à-vis du neutre) à des tensions alternatives de même amplitude

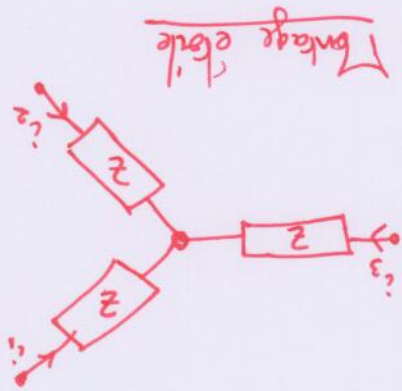
et de phases respectives  $(\beta_1 = 0, \beta_2 = 2\pi/3 \text{ et } \beta_3 = 4\pi/3 : v_p = V_0 \cos(\omega t - \beta_p))$ .

$V_{eff} = \frac{V_0}{\sqrt{2}} (= 220 \text{ V})$  est la tension efficace du secteur - en France

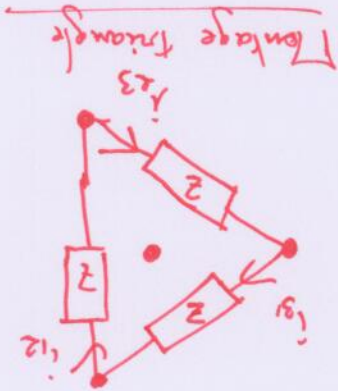
Un montage est dit "équilibré" lorsque l'on branche trois dipôles de même impédance

entre les phases et le neutre (montage étoile) ou bien

entre les phases deux à deux (montage triangle).



Montage étoile



Montage triangle

Rq: en montage triangle, la tension efficace entre les phases est de 380V environ.

On a alors des courants (si le montage est équilibré)  $I_p = I_s \cos(\omega t - \beta_p - \phi)$  ou  $\phi$  est l'argument de  $Z$ , et  $I_s = \frac{V_0}{\sqrt{3}|Z|}$  en étoile et  $I_s = \sqrt{3} \frac{V_0}{|Z|}$  en triangle.

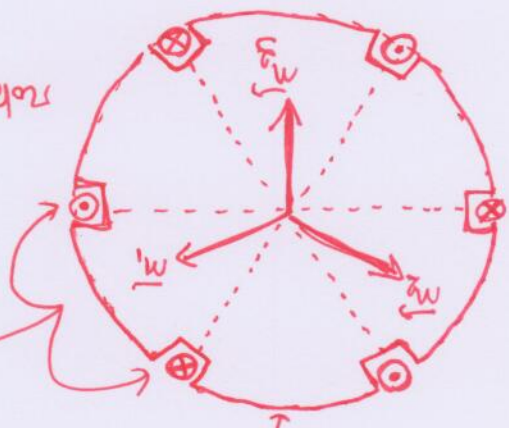
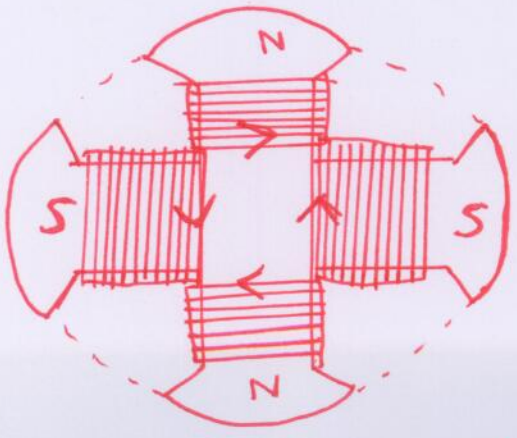
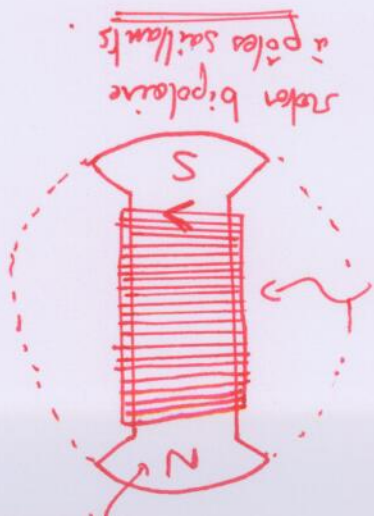
Il est important de noter que le courant total dans le neutre est nul dans un montage

équilibré, car la somme des trois courants est nulle. Ceci présente un grand intérêt

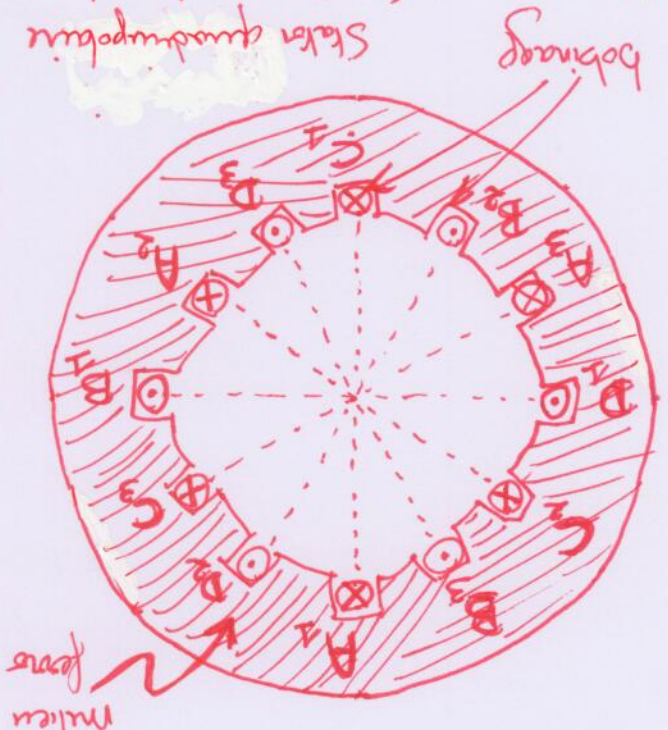
économique: les pertes dues à la résistance des lignes de transport sont réduites d'un facteur 3 en supprimant le courant de retour.



Type de rotors :



Stator "réels"

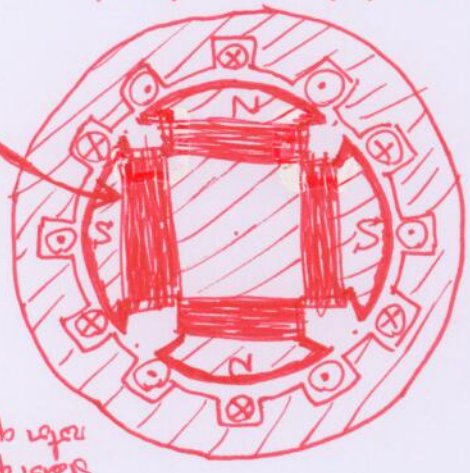


Il est constitué de 3 enroulements de type  $A_1 \rightarrow B_1 \rightarrow C_1 \rightarrow D_1$ , comparant chacun  $2p = 4$  conducteurs (3 enroulements au triphasé)

(2)

→ équi-induite, c'est le champ au milieu des bobinages

Les matériaux ferromagnétiques ont un  $\mu$  fort, par guidage des lignes de champ.



En TD, on a raisonné en supposant que le champ magnétique crée par le stator était uniforme. Dans un stator réel, la structure du champ n'a de réelle importance que dans la région où sont localisés les courants, le reste de l'entrefer séparant le stator du rotor. Exemple dans un cas simple, stator quadripolaire



La propriété essentielle est alors la dépendance sinusoidale de la composante radiale du champ statique  $B_r = B_0 \cos(\theta - \omega t)$ . La composante orthoradiale donne une force radiale au contributeur pas au moment mécanique, ainsi que les portions de conducteurs perpendiculaires à l'axe, donnant lieu à des forces axiales.

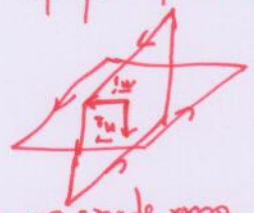
On utilise des machines dans lesquelles le stator et le rotor possèdent un nombre  $p > 1$  de paires de pôles magnétiques.

Exemples simples de rotor :

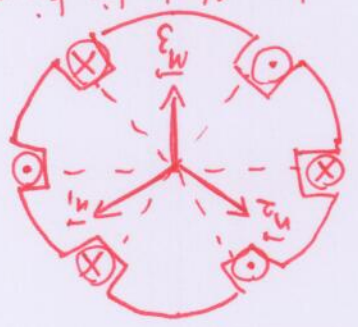
Une spire carrée : équivalente à un dipôle magnétique  $M = I \vec{S}$



deux spires carrées : un quadrupôle de directions  $\vec{m}_1$  et  $\vec{m}_2$  ("deux dipôles")



trois spires :



Un hexapôle de directions  $\vec{m}_1, \vec{m}_2, \vec{m}_3$  ("non dipôle").

Un stator 2p-polaire triphasé est constitué de trois enroulements identiques, décalés de  $2\pi/3$  et alimentés chacun par une phase.

Chaque enroulement compte 2p conducteurs (ou groupes de conducteurs) séparés de  $2\pi/p$  (le "pas pôle") et parcourus par des courants alternés.

Dans le cas le plus commun, chaque enroulement est constitué de p bobines alimentées en série, correspondant à 3p bobines au total.

Dans un stator à 2p pôles, le champ tournant s'écrit sous la forme (partie radiale) :

$$B_{r2p} = B_0 \cos(p\theta - \omega t)$$

à un instant t donne

Dans un tel stator, des conducteurs (parallèles à l'axe) placés dans l'entrefer sont soumis à des forces de Laplace orthoradiales. Leurs moments s'ajoutent en phase à tout instant si la distribution des courants les traversant est décrite par une loi angulaire (ICR) ou est le même dans le conducteur à l'instant  $t$  (à l'angle  $\theta$ ) de la même forme que le champ magnétique.

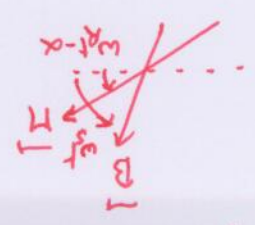
Une machine multipolaire sera donc généralement composée d'un rotor et d'un stator possédant le même nombre de pôles.

Dans une telle machine, la vitesse de synchronisme n'est plus la fréquence angulaire des courants statiques  $\omega_s$  mais celle à laquelle le profil le champ magnétique  $\omega_p = \omega_s/p$ . La vitesse de rotation du moteur ou de l'alternateur ainsi constituée se trouve donc réduite du même facteur.

Rq : la réduction de la vitesse de rotation est inévitable d'un point de vue technique car elle diminue les exigences mécaniques sur le rotor (force centrifuge en  $\omega_r^2$ ). (3)



3/ Le moteur synchrone (résumé)



Modèle : moment magnétique permanent  $\Psi_r$  tournant à  $\omega_R$  avec un retard de phase  $\alpha$  par rapport au champ  $B$  tournant à  $\omega_S$

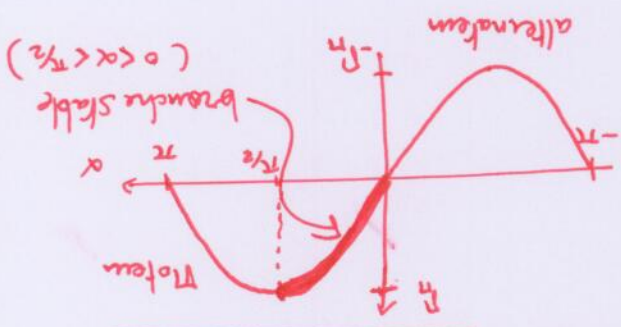
Couple mécanique instantané : 
$$T_z = \frac{3B_r \Psi_r}{2} \sin((\omega_S - \omega_R)t + \alpha)$$

où  $z$  est l'axe de rotation.

Couple moyen non nul s'il y a synchronisme ( $\omega_R = \omega_S$ ), alors  $\langle T_z \rangle = \frac{3}{2} B_r \Psi_r \sin \alpha$

$T_z > 0$  si  $\alpha > 0$  (retard)  $\Rightarrow$  fonctionnement moteur  
 $T_z < 0$  si  $\alpha < 0$  (avance)  $\Rightarrow$  fonctionnement alternateur

Fig: Oscillations autour de la position d'équilibre : oscillations de "pompe" à  $\Omega = \sqrt{H \cos \alpha_0 / J}$  où  $J$  est le moment d'inertie du rotor.



Applications des moteurs synchrones :

- la principale application des machines synchrones est, de loin, celle des alternateurs qui équipent toutes les centrales électriques.
- ils sont généralement réservés aux installations industrielles de puissance ( $1 \rightarrow 100 MW$ ), fonctionnant en continu : condensateurs, convergents, laminiers, ...
- la rampe de TV de 2<sup>de</sup> génération (TRAH) a utilisé pour ses moteurs des moteurs auto synchrones : ce sont des moteurs synchrones alimentés par des onduleurs de fréquence variable (accrédés sur la fréquence des moteurs).

On utilise de petits moteurs synchrones dans les servo-mécanismes : ils permettent de réaliser des déplacements à vitesse constante, bénéficiaire de la grande stabilité de la fréquence du rotor.

Dans certaines machines de moyennes puissances, on diminue les moteurs synchrones en monophasé. Un champ oscillant selon une seule direction peut se décomposer en deux champs tournants en sens opposés : une fois la machine lancée, la composante rétrograde du champ magnétique exerce sur le rotor un couple de valeur moyennement nulle (complètement au contraire : on utilise en général un condensateur pour dépasser le courant envoyé dans un entrefer, statorique secondaire pour dépasser le courant de créer un déséquilibre entre les deux composantes tournantes).



Démarrage d'un moteur synchrone

La principale difficulté du moteur synchrone tient à ce qu'il doit être "démarré" à l'aide d'un moteur auxiliaire / de façon à atteindre la vitesse du synchronisme -  
 Cela est généralement réalisé à l'aide d'un moteur asynchrone couple, ou même intégré, au moteur principal.

(Complément au complément : la plage d'accrochage est difficile à évaluer mais on peut montrer avec des raisonnements "simples" que  $\Delta \omega \sim \sqrt{\frac{T_n}{J}}$  en  $T_n$  est le moment mécanique maximal -)

- Avantages du moteur synchrone :
- rendement élevé
  - vitesse constante
  - simplicité de construction
- Inconvénients du moteur synchrone :
- problème du démarrage
  - vitesse constante

4/ Le moteur asynchrone (résu)

→ champ tournant  $B = \text{stat} \rightarrow \omega_s$   
 → bobine, siège d'un phénomène d'induction : moment magnétique induit  $\vec{M}(t)$   
 $\equiv$  rotor à  $\omega_r$

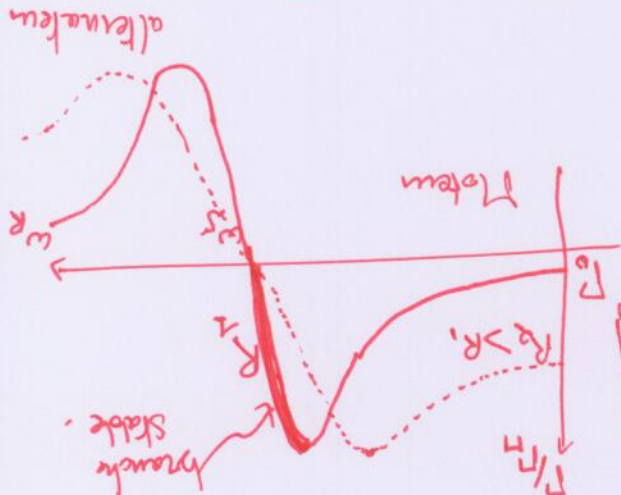


$\vec{u}_R$  direction de  $\vec{M}$  (du rotor),  $S_R$  surface de la bobine rotative,  $Z = |Z| e^{i\varphi}$  l'impédance électrique du rotor,  $\phi_0$  flux maximal à travers la bobine et  $\omega_g = \omega_s - \omega_r$  vitesse de glissement.

$Z = R + iL\omega_g$ . Le glissement  $g = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$  s'exprime en pourcentage.

Equation mécanique :  $T_z = \frac{\phi_0^2 \omega_g \sin(\omega_g t - \varphi) \sin(\omega_g t)}{|Z|}$

en valeur moyenne :  $\langle T_z \rangle = \frac{\phi_0^2 R \omega_g}{R^2 + L^2 \omega_g^2}$



$T_n = \frac{\phi_0^2}{4L}$  couple maximal  
 $g_n = \frac{\omega_g}{\omega_s} = \frac{L\omega_s}{R}$  glissement à  $T_n$

Couple au démarrage :  $\langle T_z \rangle_{\omega_g=0} = T_0 = \frac{\phi_0^2}{R} = \frac{2}{R} \frac{\phi_0^2}{R^2 + L^2 \omega_g^2} \approx \frac{2}{R} \frac{\phi_0^2}{R}$

car  $L\omega_s \gg R$  pour une bobine bien conçue - On augmente  $T_0$  en augmentant  $R$  la résistance du bobinage.



démarrage d'un moteur synchrone :

■ le couple de démarrage est généralement très faible pour un rotor bien optimisé (résistance inerte faible), correspondant à un faible glissement optimal (en pratique q 2,5 à 5%)  
Ce faible couple rend a priori impossible le démarrage "en charge", et peut même être nuisible au couple résistant des profils

La méthode généralement utilisée pour remédier à ce problème consiste à insérer dans le circuit rotorique une résistance additionnelle, qui permet d'obtenir un couple de démarrage

nettement plus important.

Une fois le moteur démarré, cette résistance est retirée pour ne pas de grader le rendement énergétique -

Ceci peut être réalisé manuellement avec un rhéostat extérieur, ou bien (sur les moteurs de moyenne puissance) avec un système rhéostatique intégré au rotor, commandé par force centrifuge, ou bien à l'aide d'interlocks commandés de puissance.

■ Le démarrage d'un moteur synchrone de faible résistance rotorique est analogue à la mise en service d'un transformateur dont le secondaire est en court-circuit :

le courant statique  $I_s$  appelé est extrêmement élevé :

Le système rhéostatique évite plus haut permet donc un démarrage moins brutal et un pic de courant réduit -

Il est également utile de réduire la tension d'alimentation lors du démarrage soit à l'aide d'un gradateur, soit en utilisant temporairement un coupleur étoile pour le démarrage.

Utilisations :

■ ils sont les plus largement utilisés, grâce à leur rapport coût/puissance le plus faible - On les trouve dans toutes les applications industrielles et domestiques de moyenne puissance.

■ Ex : machines outils, congélateurs, machines à laver, pompes, ...