

Conversion électromécanique II

12 Champ tournant et bobinage

Christian Koechli

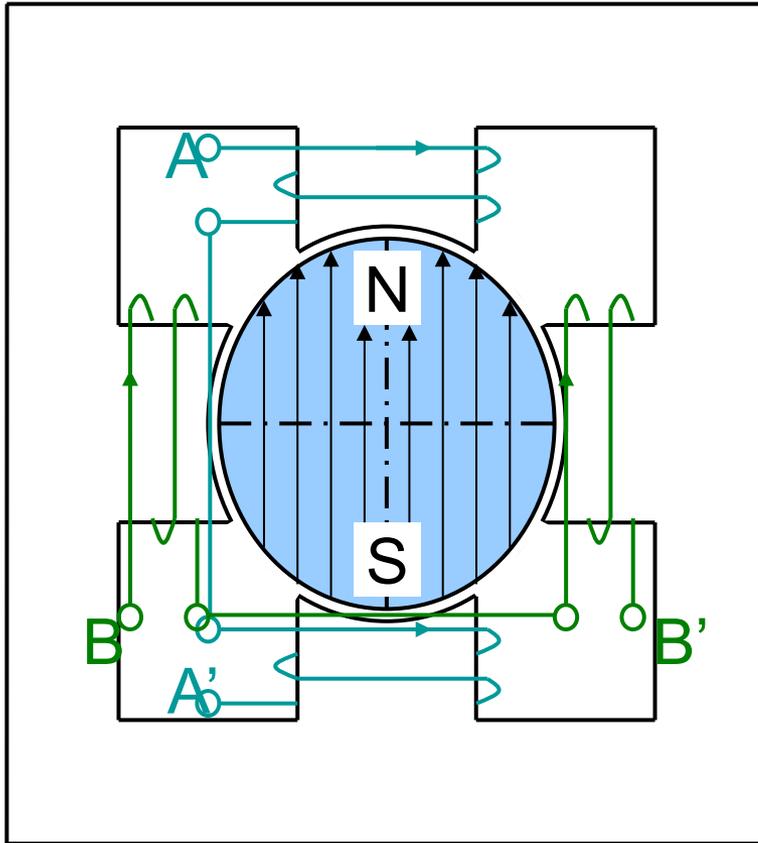
12. Champ tournant et bobinage

Objectifs du cours

- Notion de champ tournant et de champ pulsant
- Polarité, vitesse du champ tournant
- Grandeurs électriques associées au bobinage.
- Génération du couple

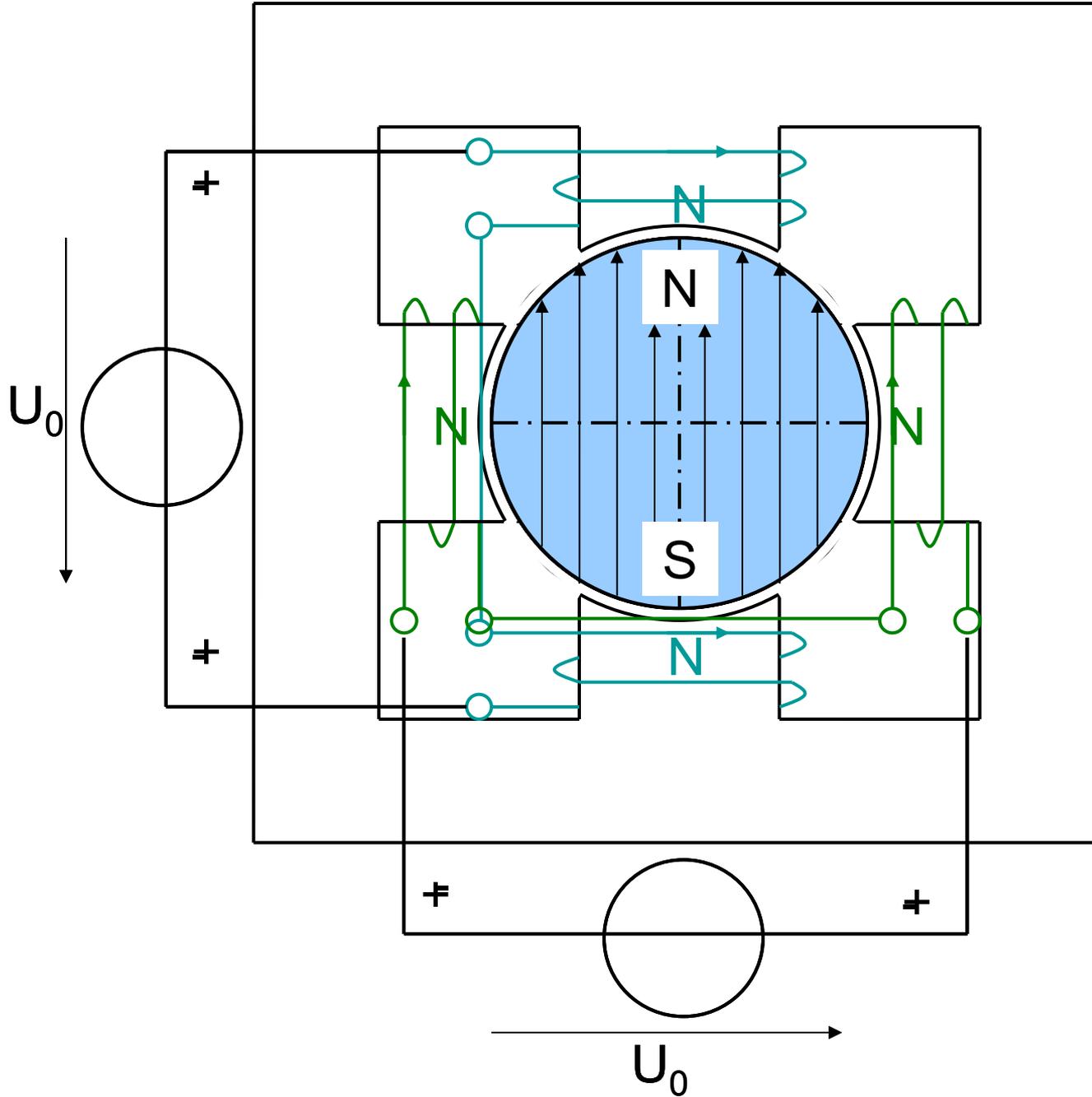
12. Champ tournant et bobinage

Exemple: nécessité d'un système de champ tournant



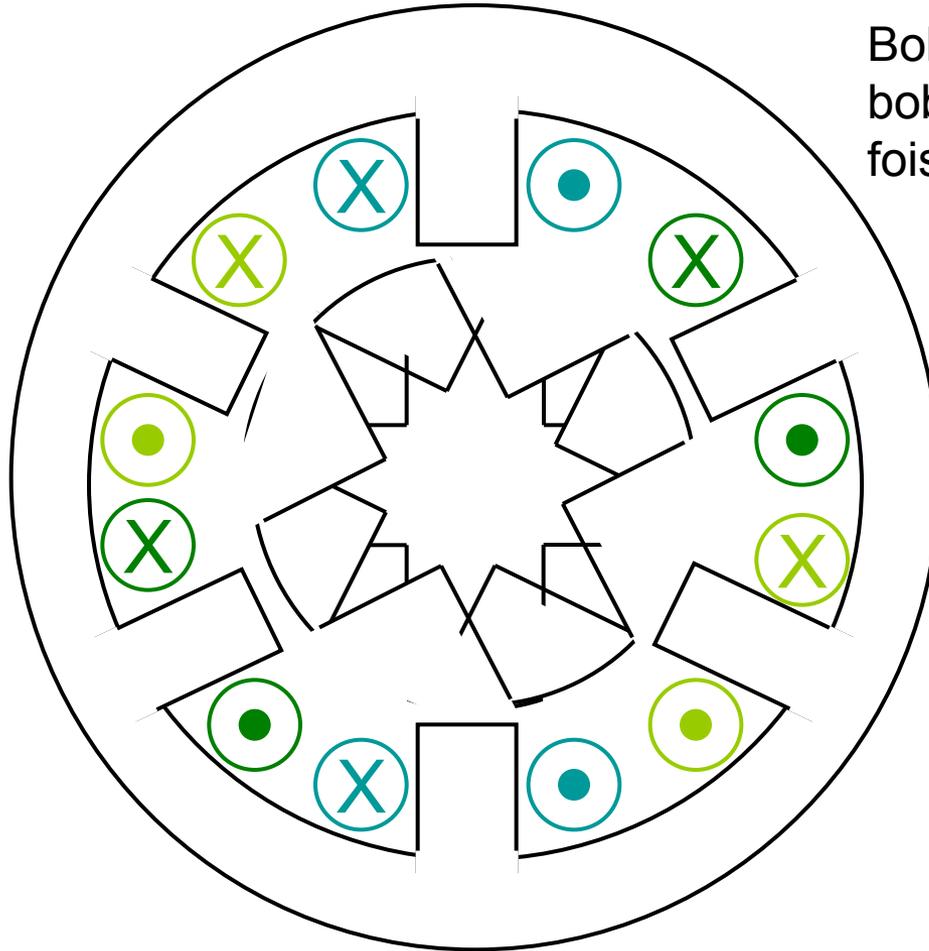
Actionneur électromagnétique
biphasé, une bobine alimentée à
la fois

12. Champ tournant et bobinage



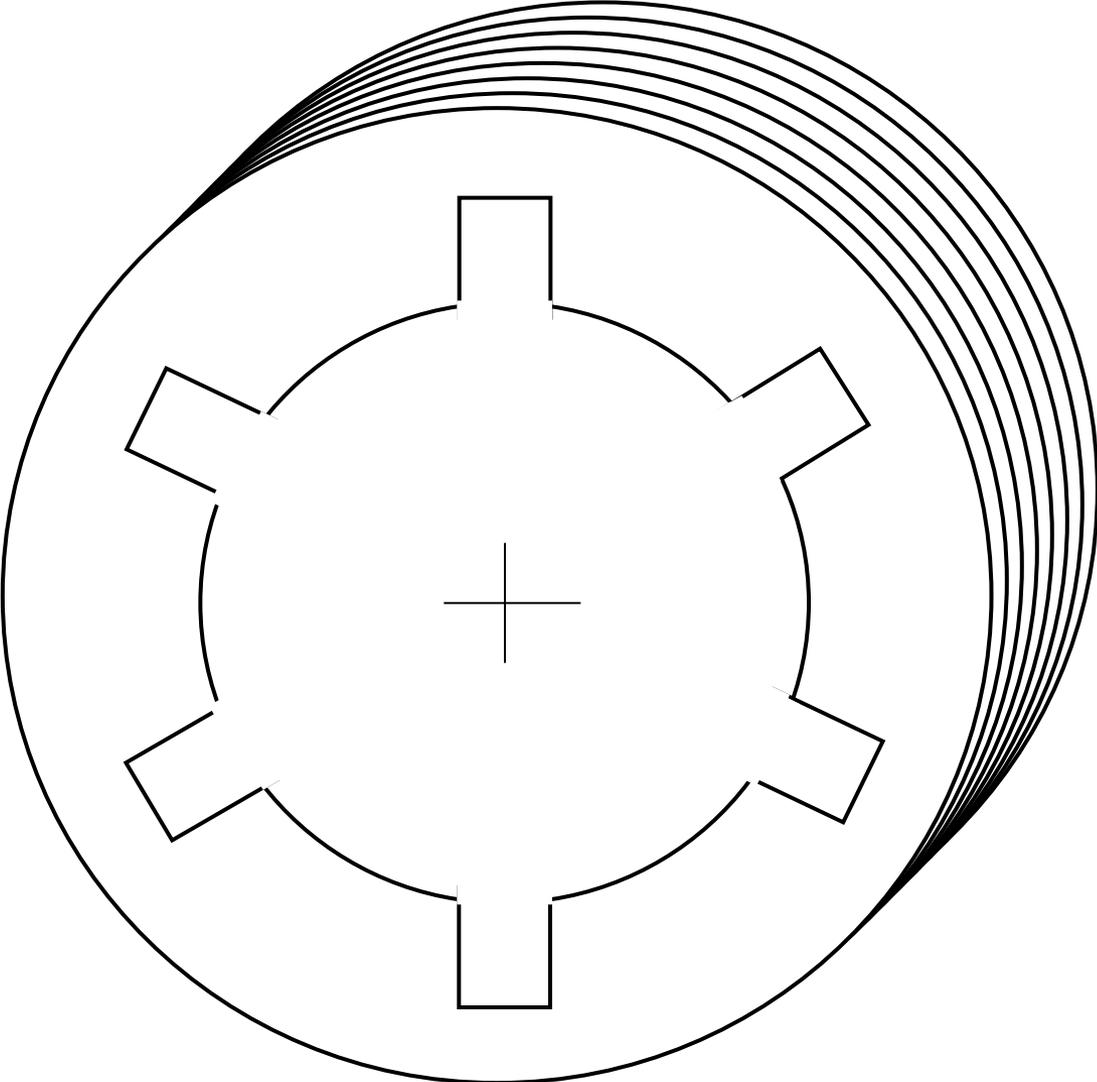
12. Champ tournant et bobinage

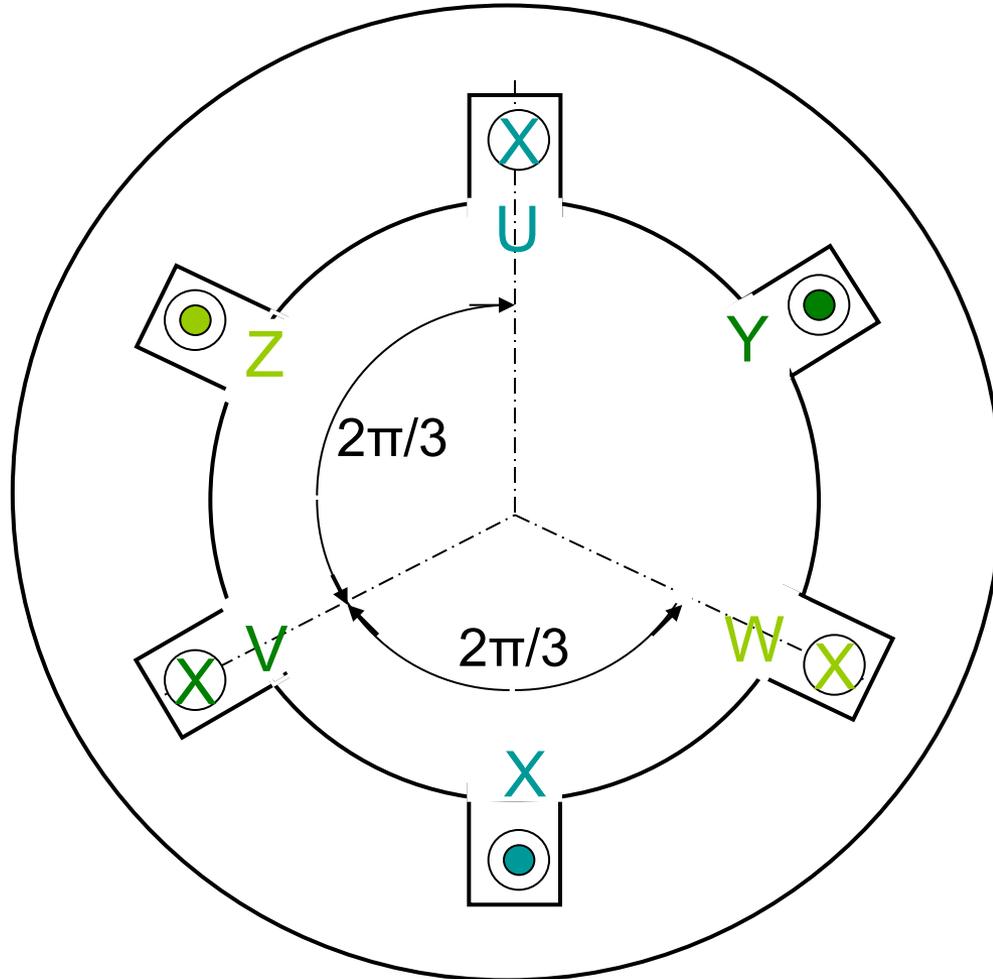
Exemple: moteur réluctant 6/4



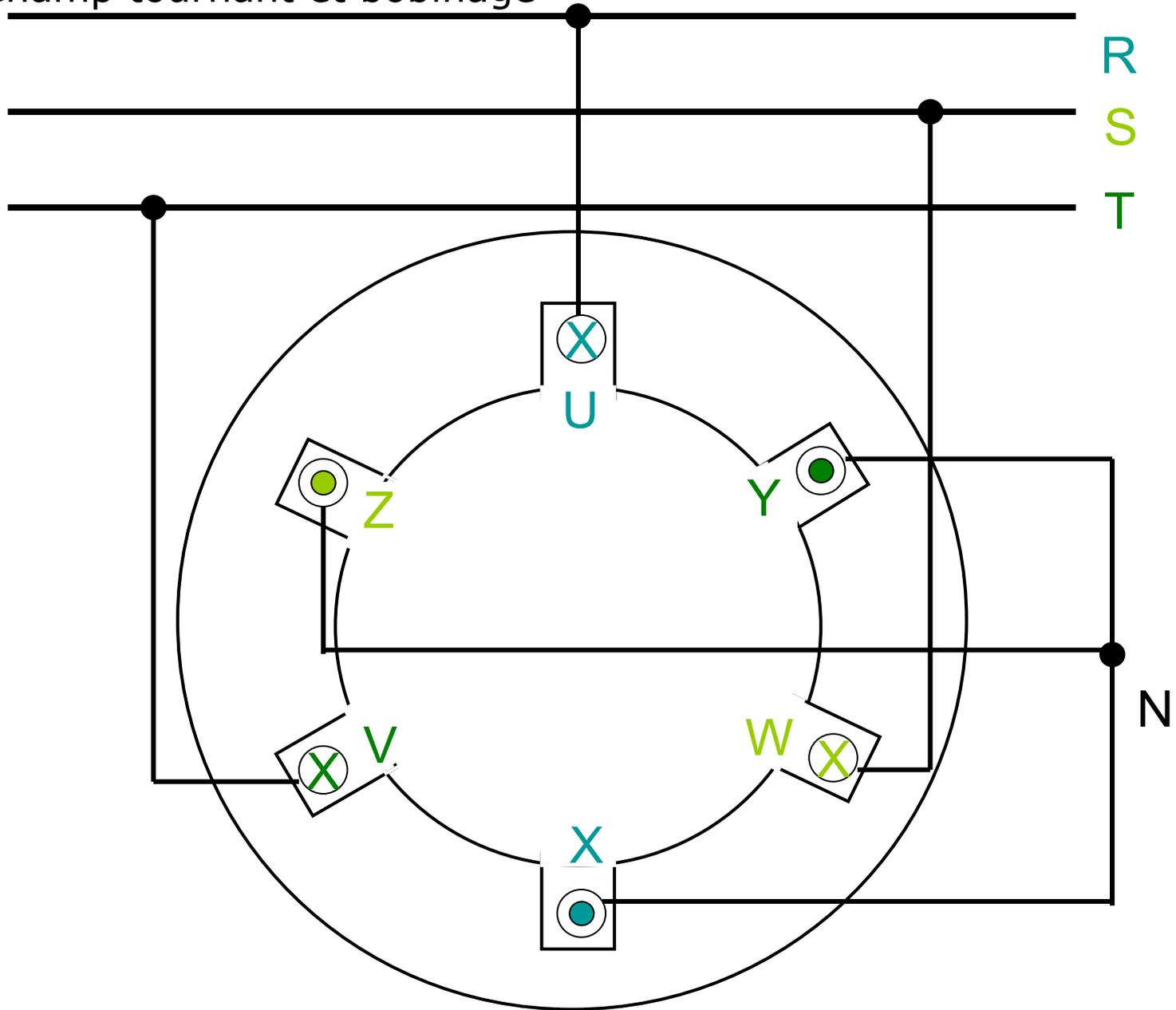
Bobinage triphasé, une bobine alimentée à la fois

Circuit magnétique et bobinage





12. Champ tournant et bobinage

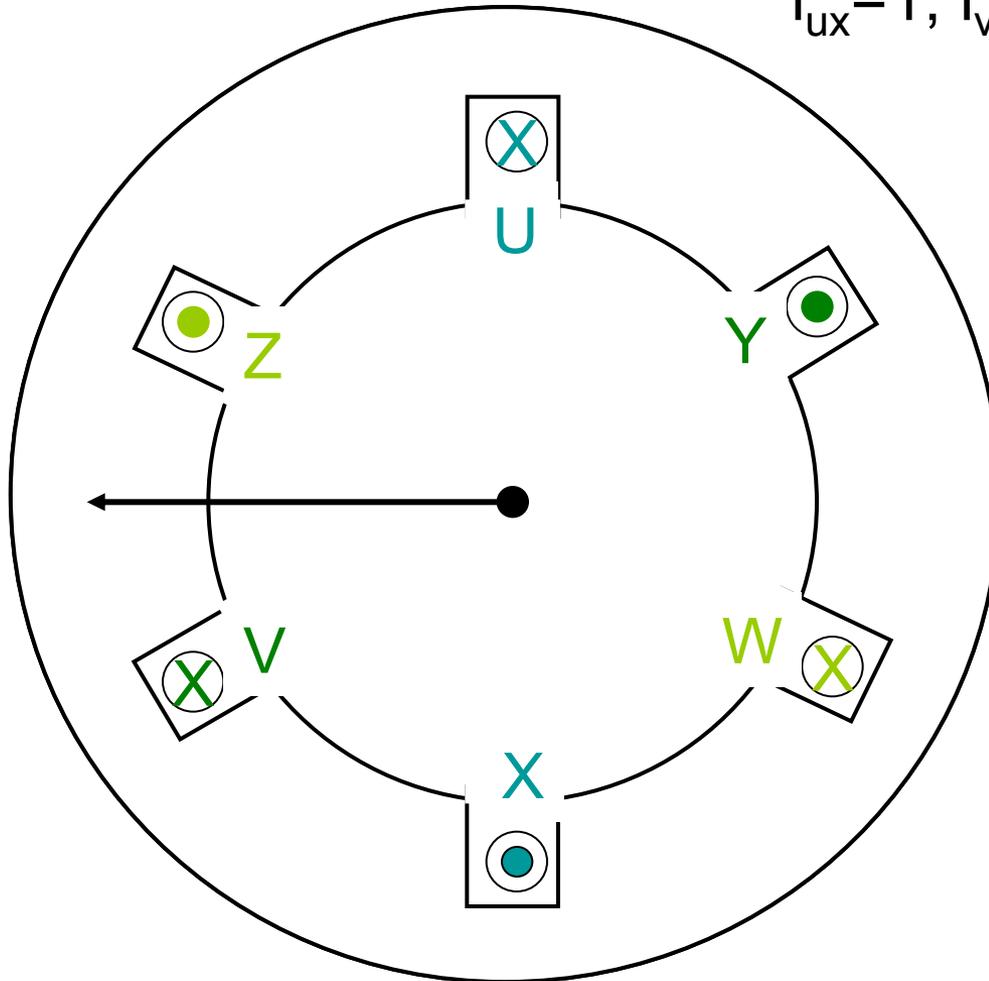


12. Champ tournant et bobinage

Champ résultant

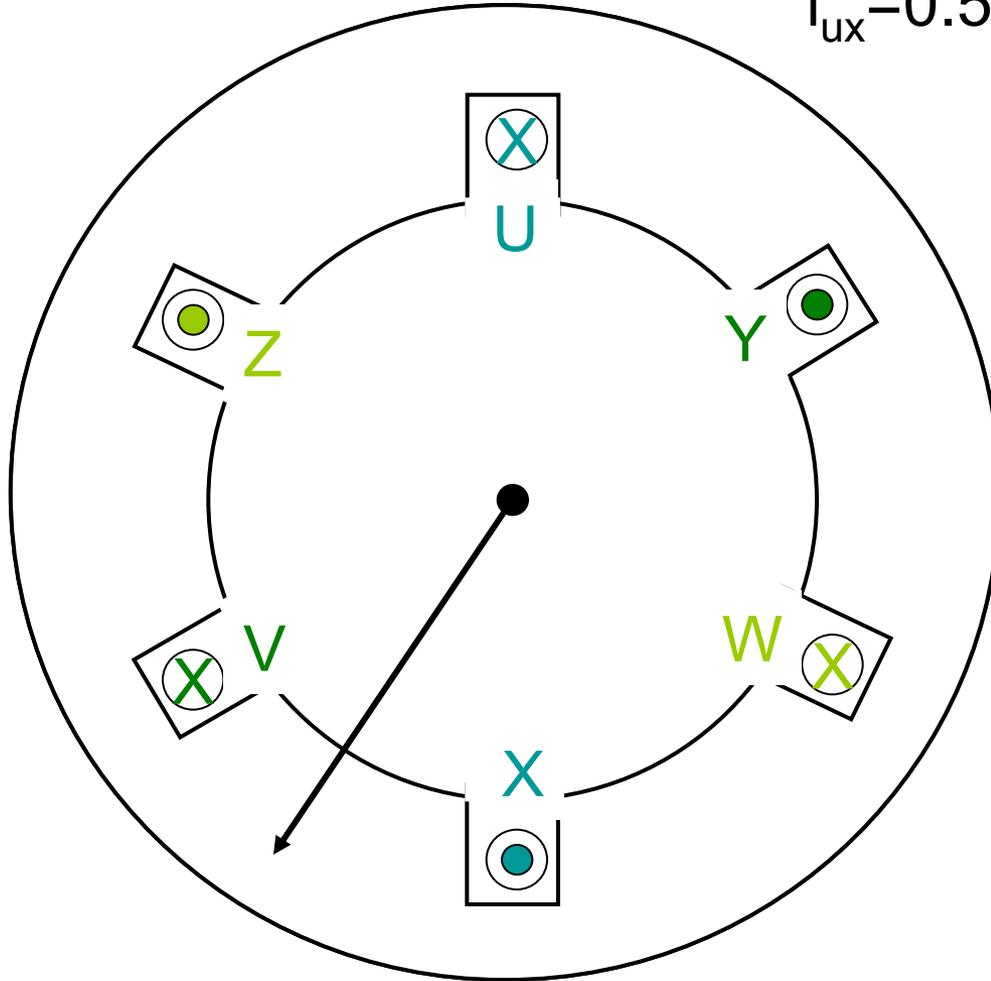
Bobinage triphasé, *trois*
bobines alimentées
simultanément

Phase U-X maximum
 $i_{ux}=1, i_{vy}=-0.5, i_{wz}=-0.5$



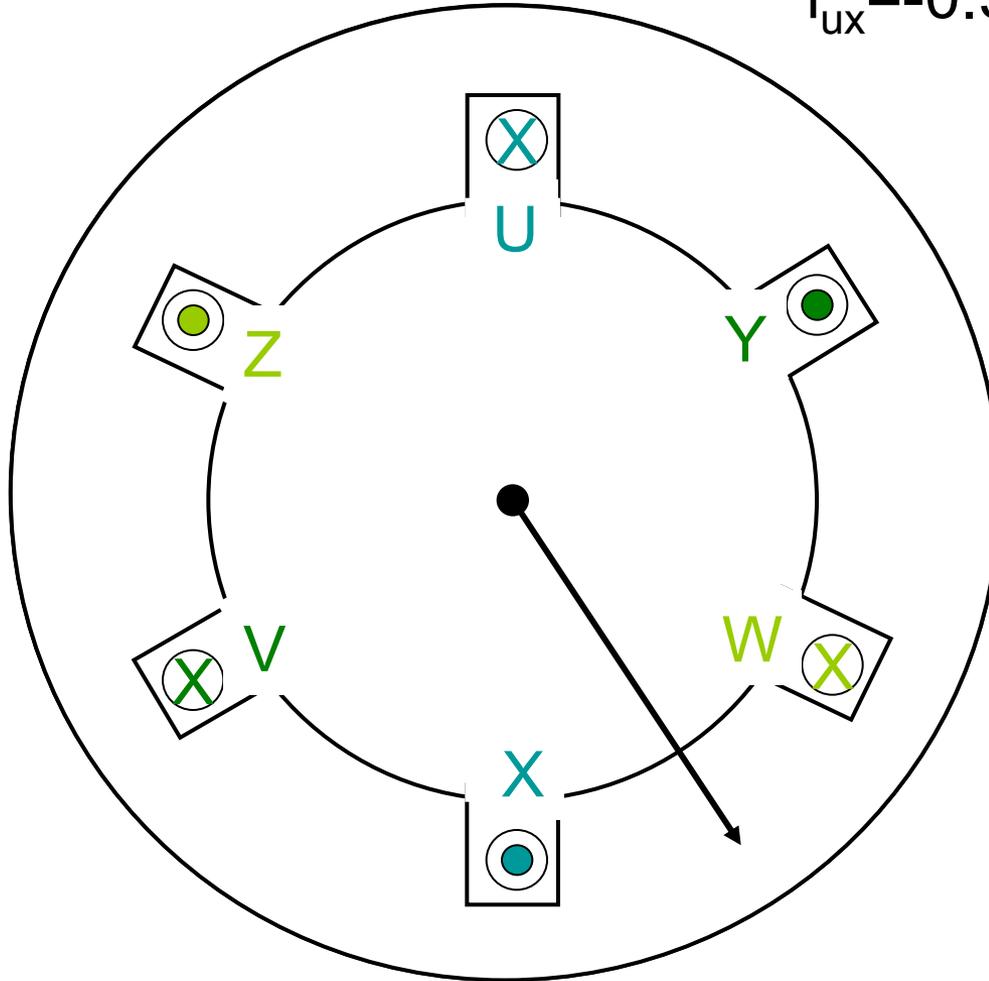
12. Champ tournant et bobinage

Champ résultant
Phase W-Z minimum
 $i_{ux}=0.5, i_{vy}=0.5, i_{wz}=-1$



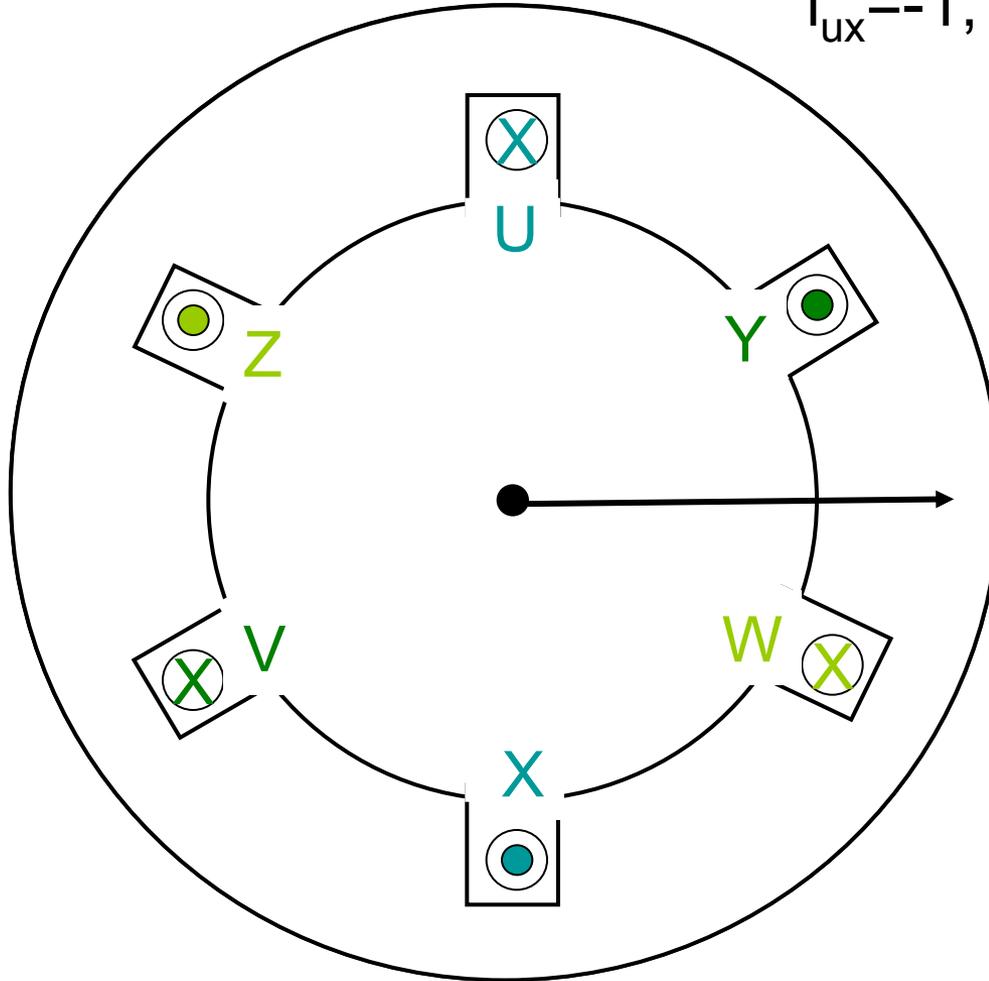
12. Champ tournant et bobinage

Champ résultant
Phase V-Y maximum
 $i_{ux} = -0.5, i_{vy} = 1, i_{wz} = -0.5$



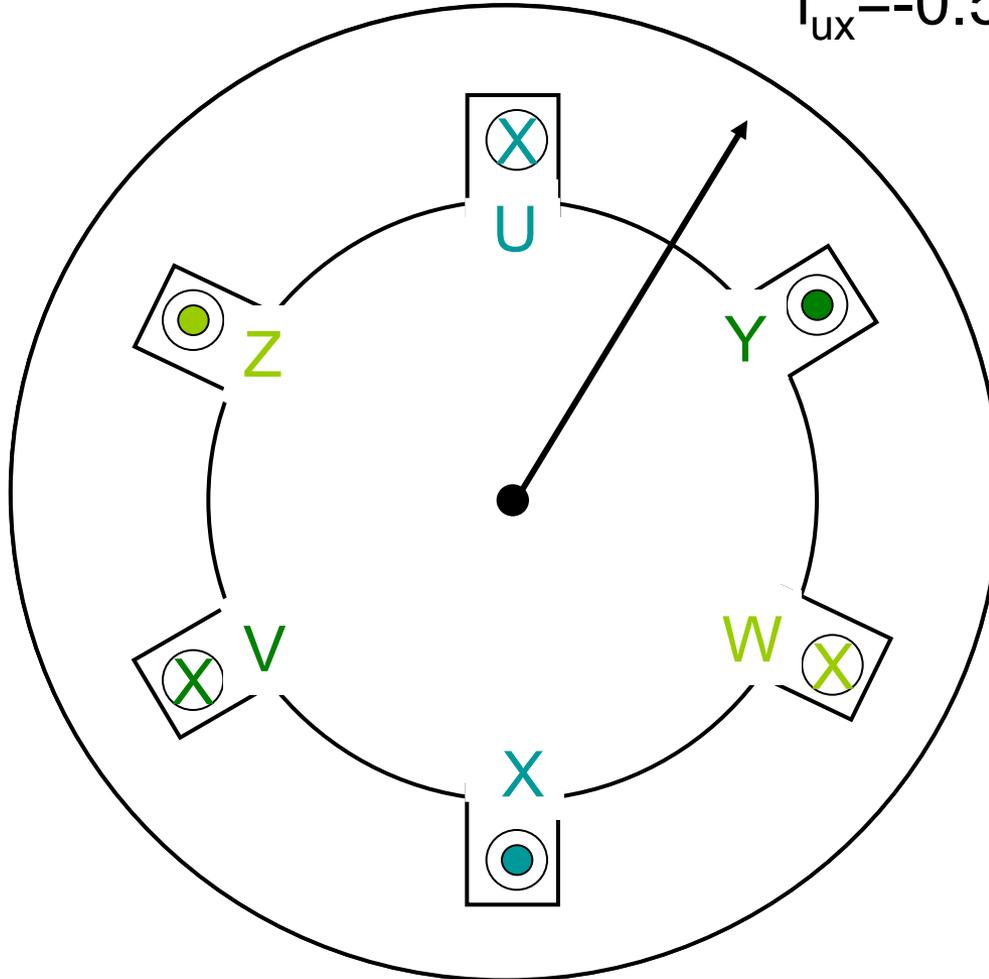
12. Champ tournant et bobinage

Champ résultant
Phase U-X minimum
 $i_{ux}=-1, i_{vy}=0.5, i_{wz}=0.5$



12. Champ tournant et bobinage

Champ résultant
Phase W-Z maximum
 $i_{ux} = -0.5$, $i_{vy} = -0.5$, $i_{wz} = 1$

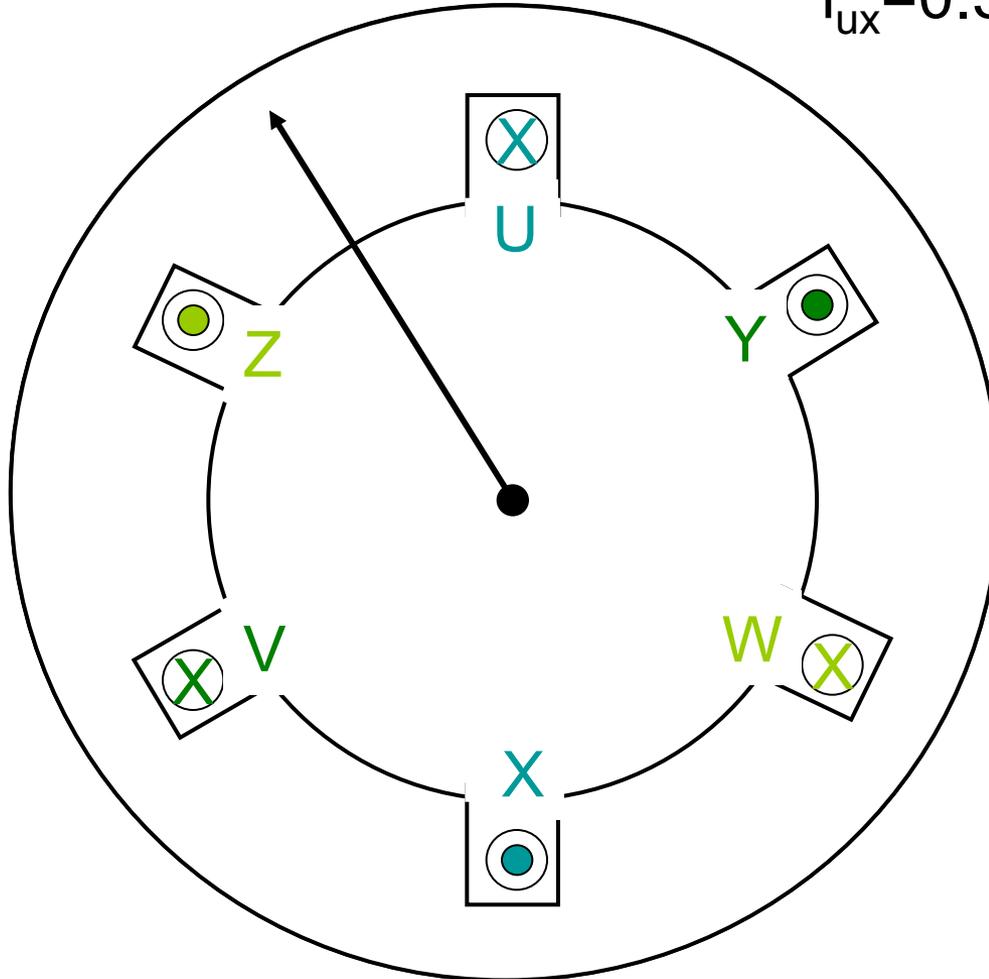


12. Champ tournant et bobinage

Champ résultant

Phase V-Y minimum

$$i_{ux}=0.5, i_{vy}=-1, i_{wz}=0.5$$

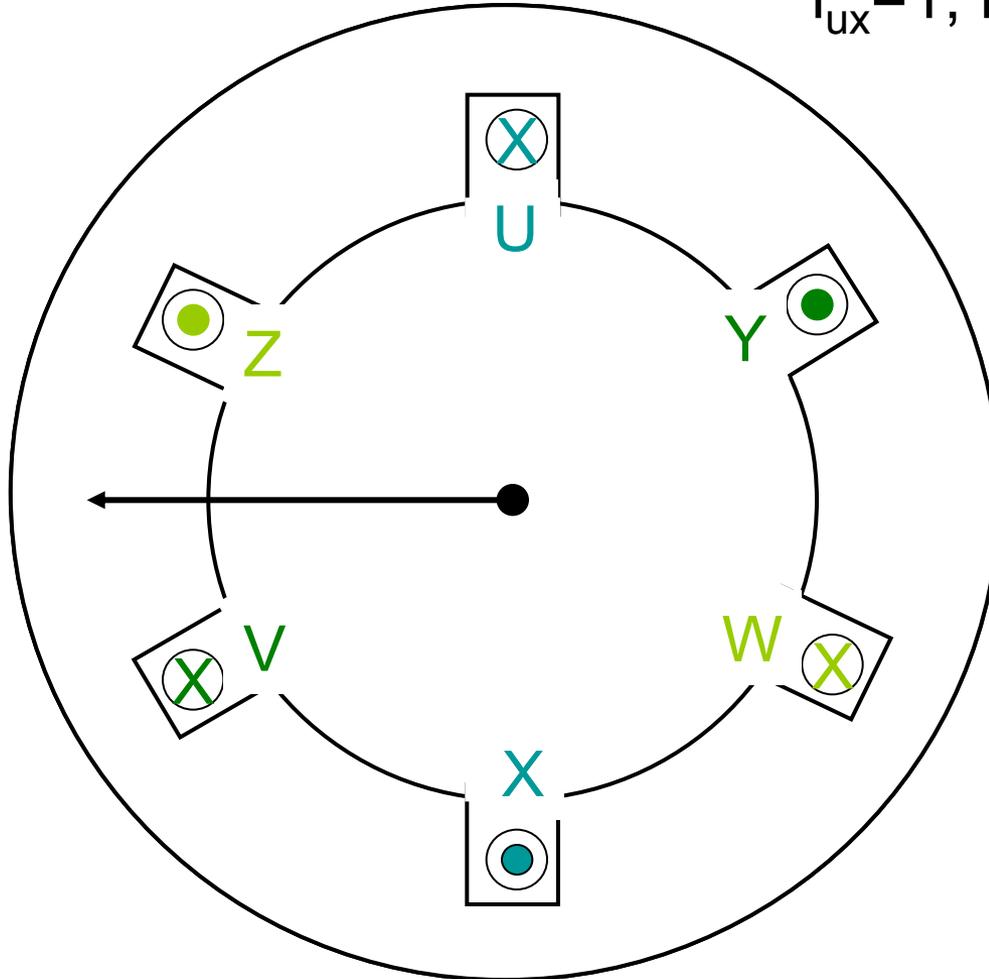


12. Champ tournant et bobinage

Champ résultant

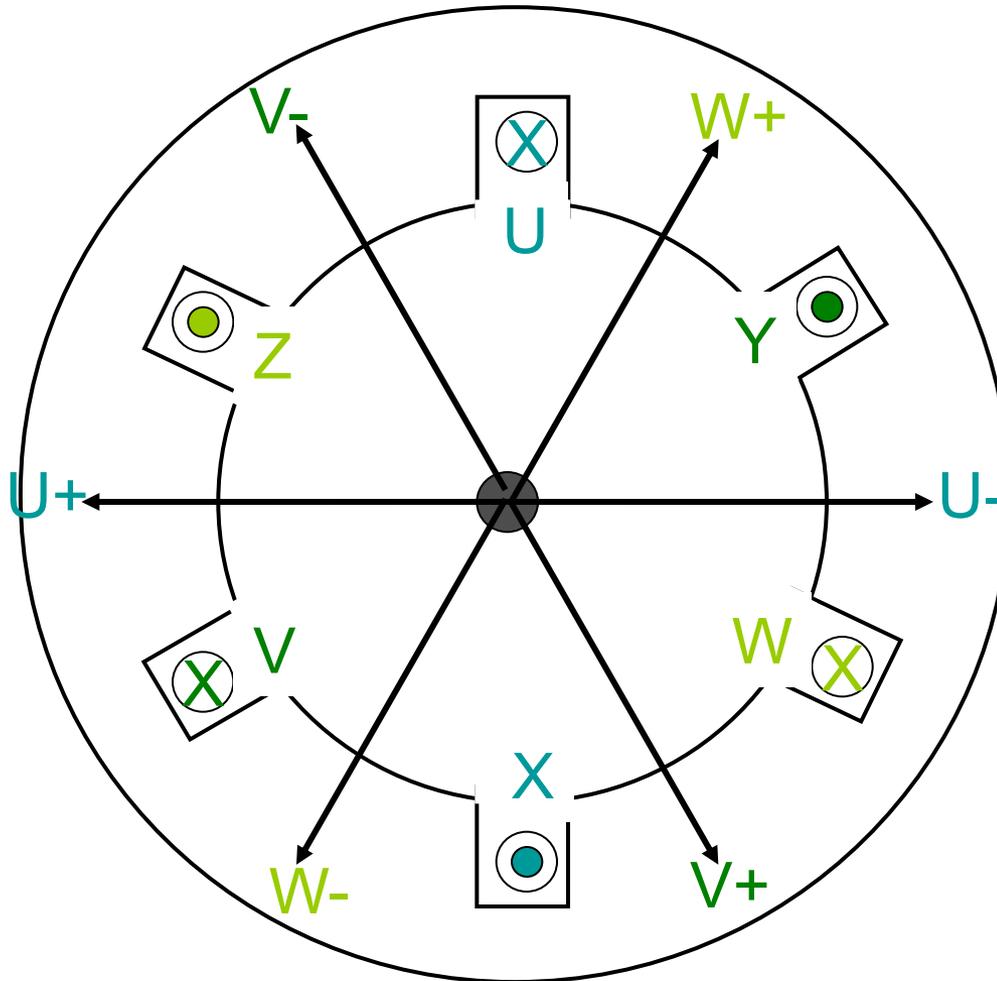
Phase U-X maximum

$$i_{ux}=1, i_{vy}=-0.5, i_{wz}=-0.5$$



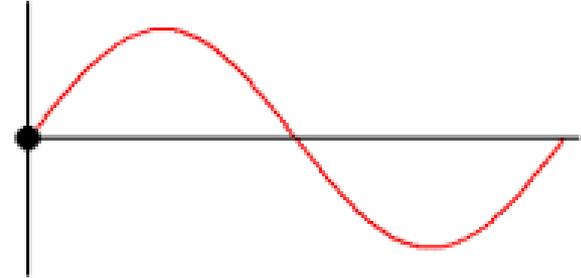
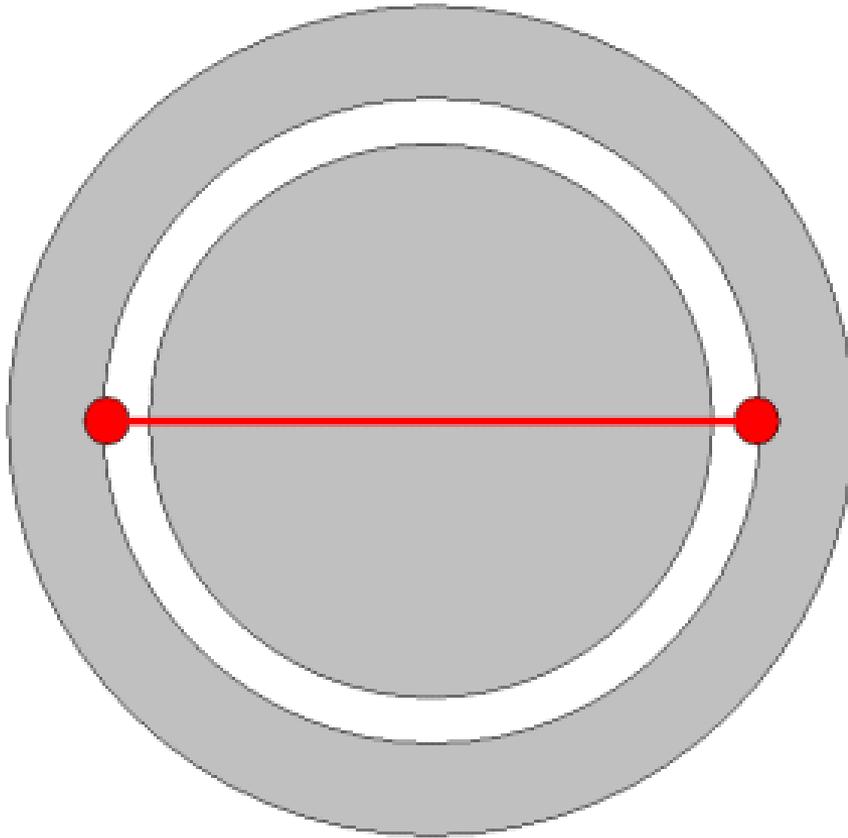
12. Champ tournant et bobinage

Champ tournant



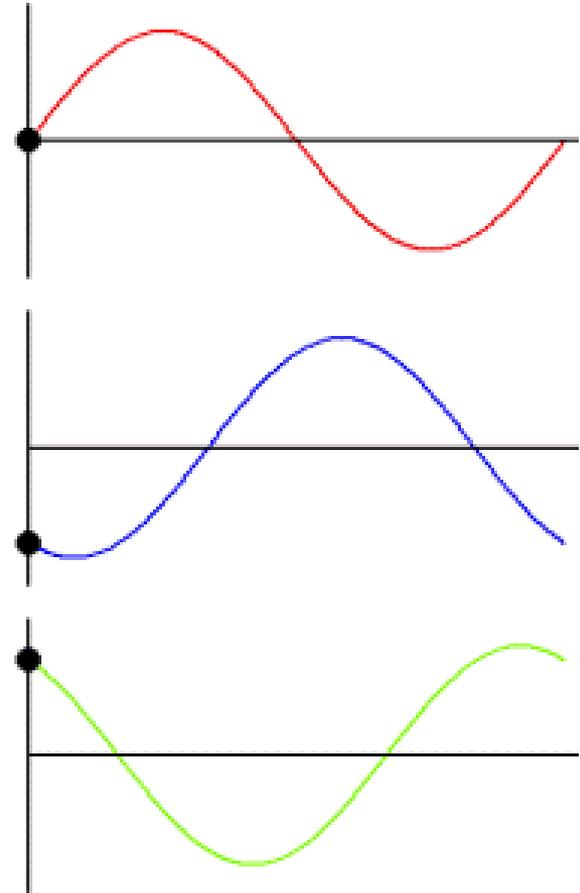
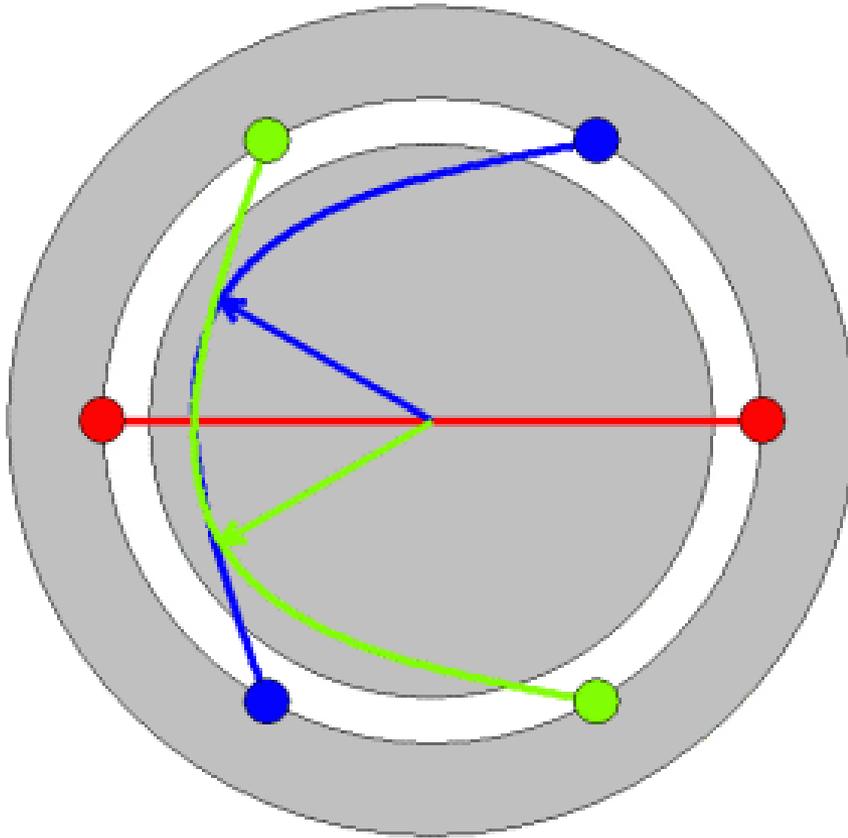
12. Champ tournant et bobinage

Champ pulsant résultant de l'alimentation d'une spire diamétrale par un courant alternatif



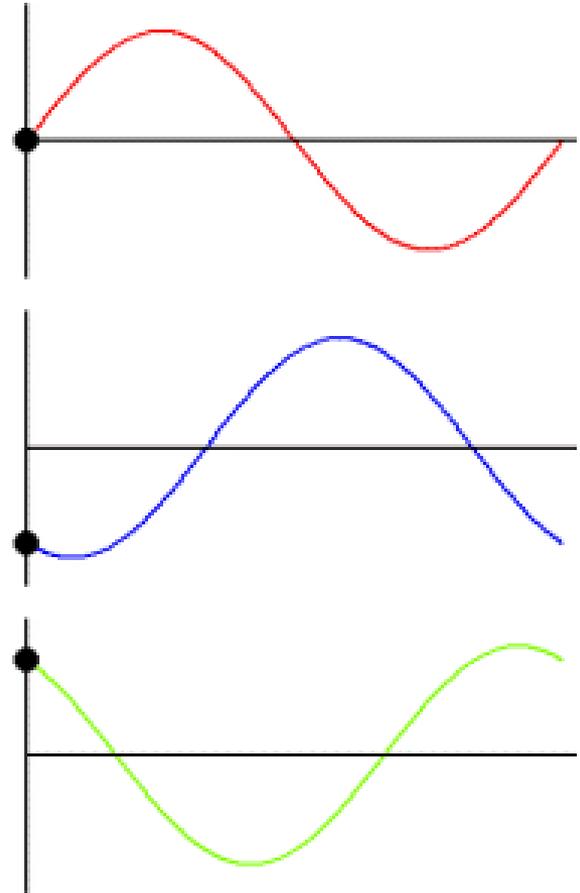
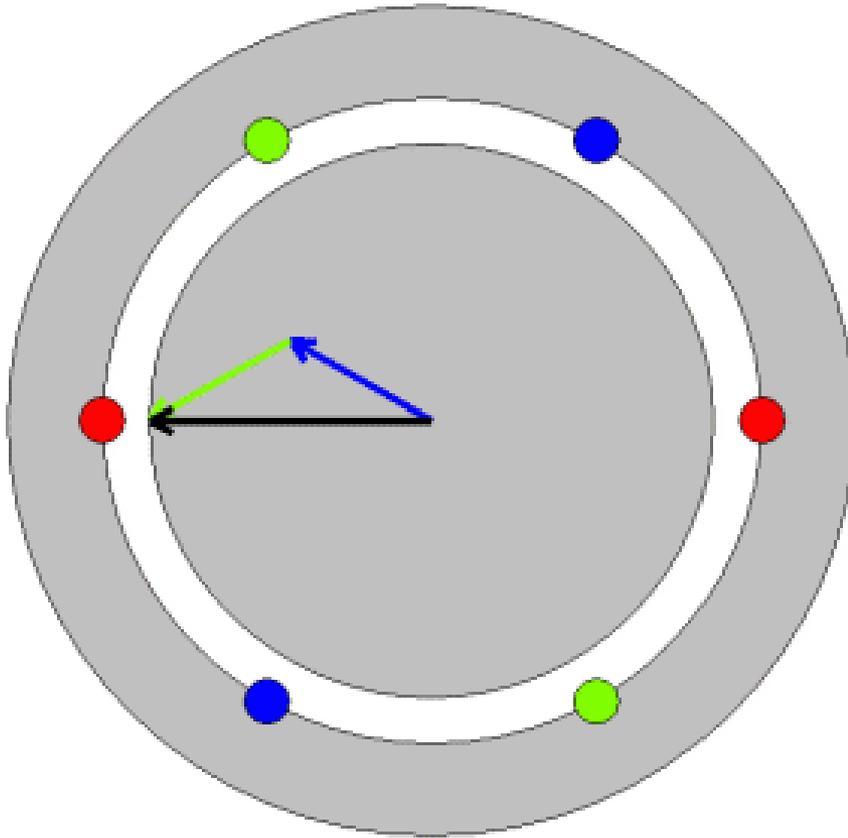
12. Champ tournant et bobinage

Champs pulsants résultants de l'alimentation de spires diamétrales réparties, par un système de courants alternatifs triphasés symétriques



12. Champ tournant et bobinage

Champ tournant résultant de la somme vectorielle des trois champs pulsants



Enseignements

- Champ tournant = « champ dont le maximum se déplace géométriquement »
- Champ pulsant = champ variant uniquement en intensité
- Il faut au moins 2 phases pour créer un champ tournant

12. Champ tournant et bobinage

Bobinage triphasé

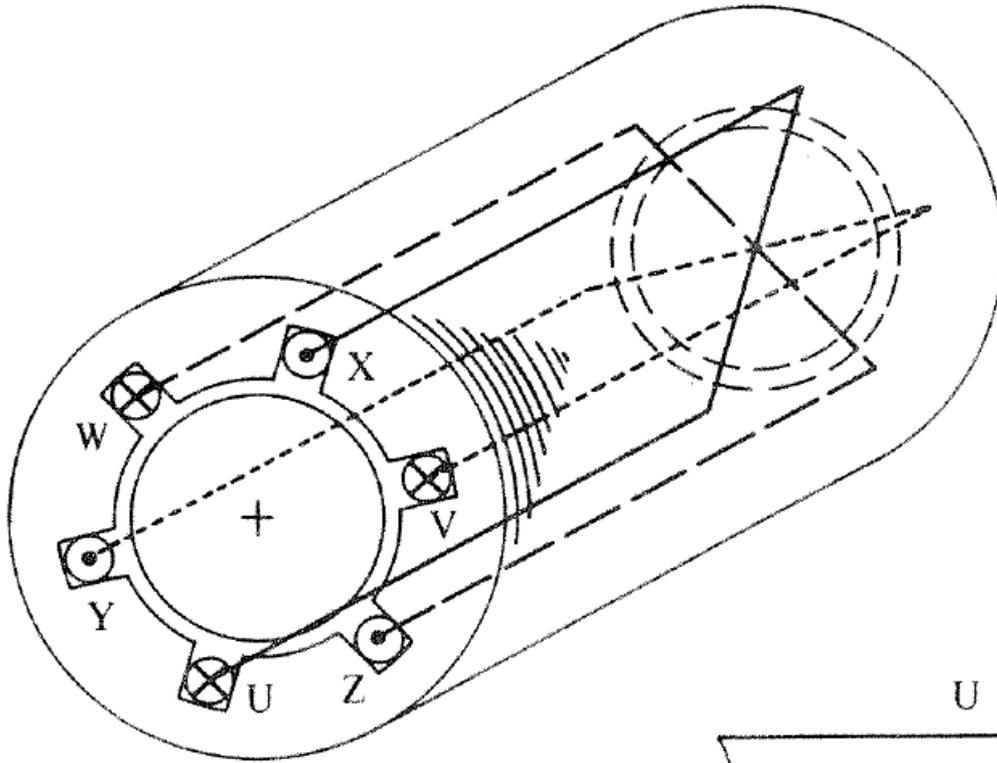


Fig. 12.1

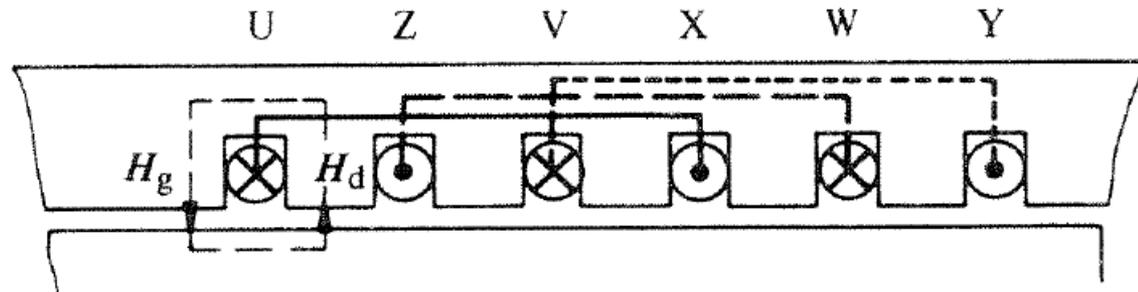


Fig. 12.2

12. Champ tournant et bobinage

Champ magnétique créé par une phase

$$\oint H dl = \iint J dS = Ni$$

$$H_g \cdot \delta - H_d \cdot \delta = Ni$$

$$\text{avec } H_d = -H_g$$

$$H_g = \frac{Ni}{2\delta}$$

Fondamental de la distribution de champ

$${}^1H = \frac{4}{\pi} \frac{Ni}{2\delta} \sin \frac{\pi y}{\tau_p}$$

$$\text{Si } i \text{ sinus: } H_u = {}^1\hat{H} \sin \frac{\pi y}{\tau_p} \sin \omega t \quad \text{avec} \quad {}^1\hat{H} = \frac{4}{\pi} \frac{N\hat{I}}{2\delta}$$

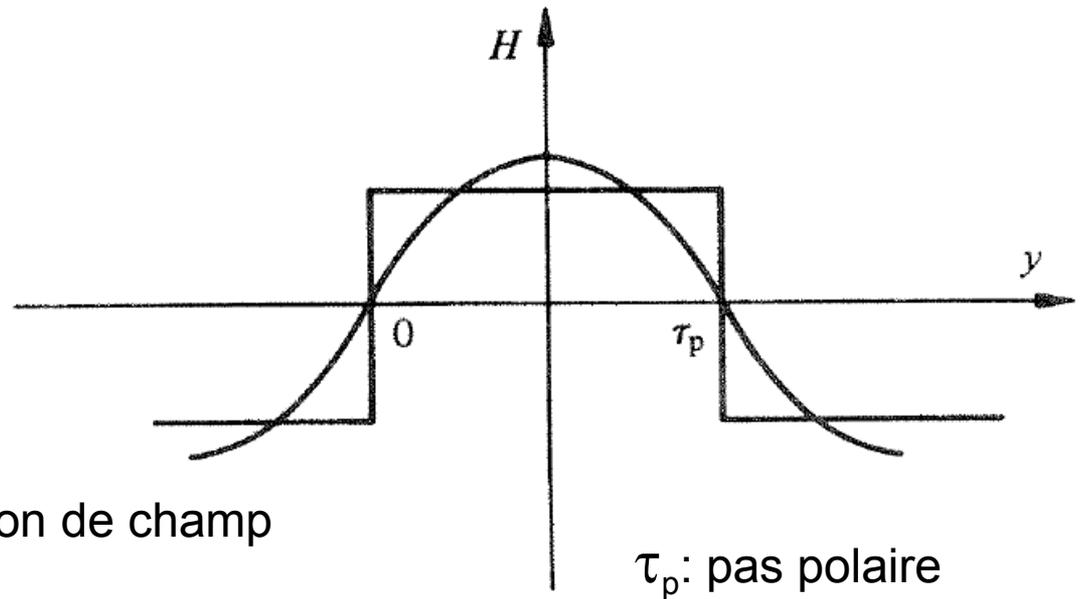


Fig. 12.3

12. Champ tournant et bobinage

Champ magnétique résultant

$$H_u = {}^1\hat{H} \sin \frac{\pi y}{\tau_p} \sin \omega t \quad H_v = {}^1\hat{H} \sin \left(\frac{\pi y}{\tau_p} - \frac{2\pi}{3} \right) \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$H_w = {}^1\hat{H} \sin \left(\frac{\pi y}{\tau_p} - \frac{4\pi}{3} \right) \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right)$$

$$H_u = \frac{1}{2} {}^1\hat{H} \left[\cos \left(\frac{\pi y}{\tau_p} - \omega t \right) - \cos \left(\frac{\pi y}{\tau_p} + \omega t \right) \right]$$

Onde progressive (directe)

Onde rétrograde (inverse)

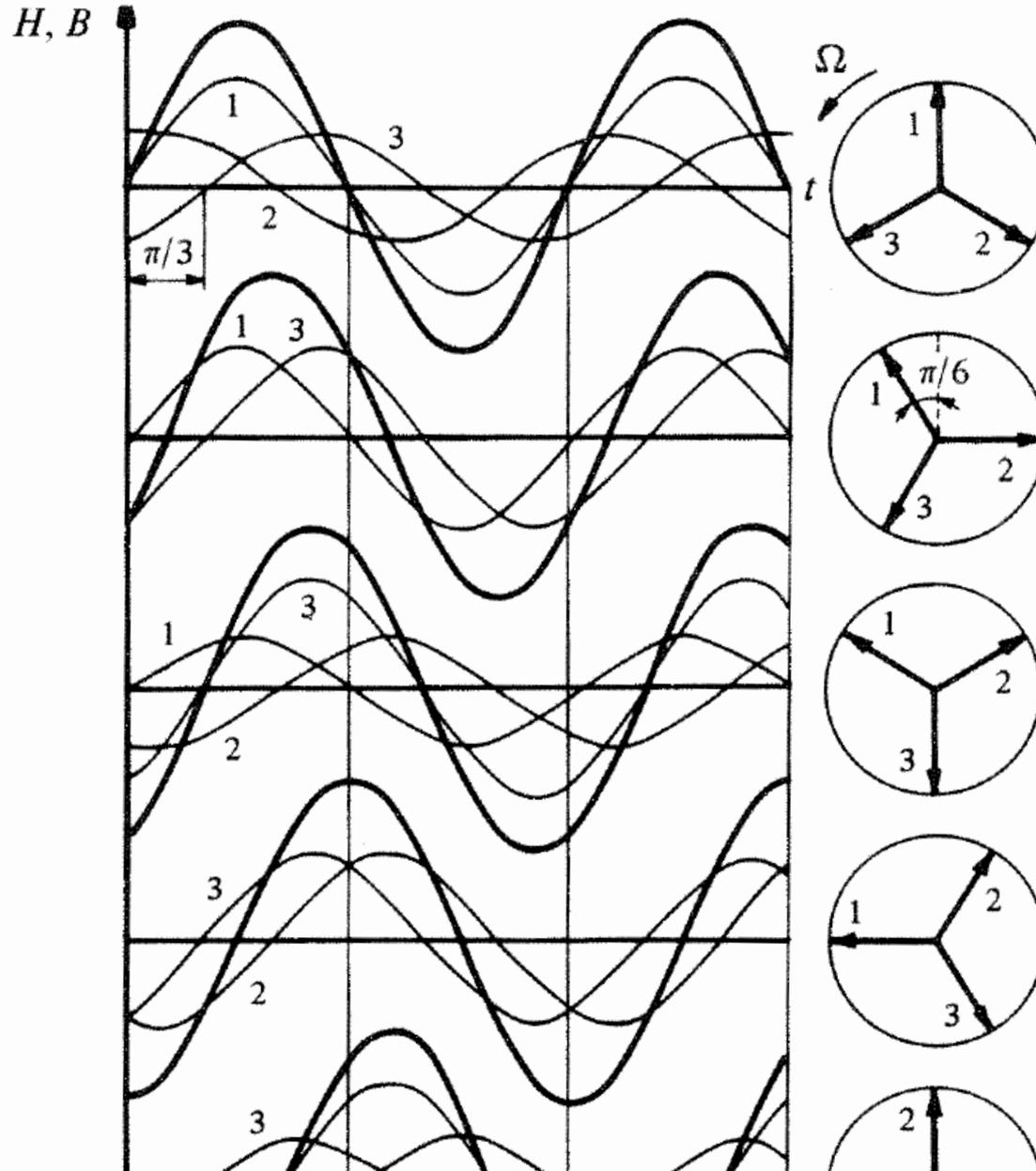
$$H_v = \frac{1}{2} {}^1\hat{H} \left[\cos \left(\frac{\pi y}{\tau_p} - \omega t \right) - \cos \left(\frac{\pi y}{\tau_p} + \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \right]$$

$$H_w = \frac{1}{2} {}^1\hat{H} \left[\cos \left(\frac{\pi y}{\tau_p} - \omega t \right) - \cos \left(\frac{\pi y}{\tau_p} + \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \right] +$$

$$H_{\text{tot}} = \frac{3}{2} {}^1\hat{H} \cos \left(\frac{\pi y}{\tau_p} - \omega t \right) - 0$$

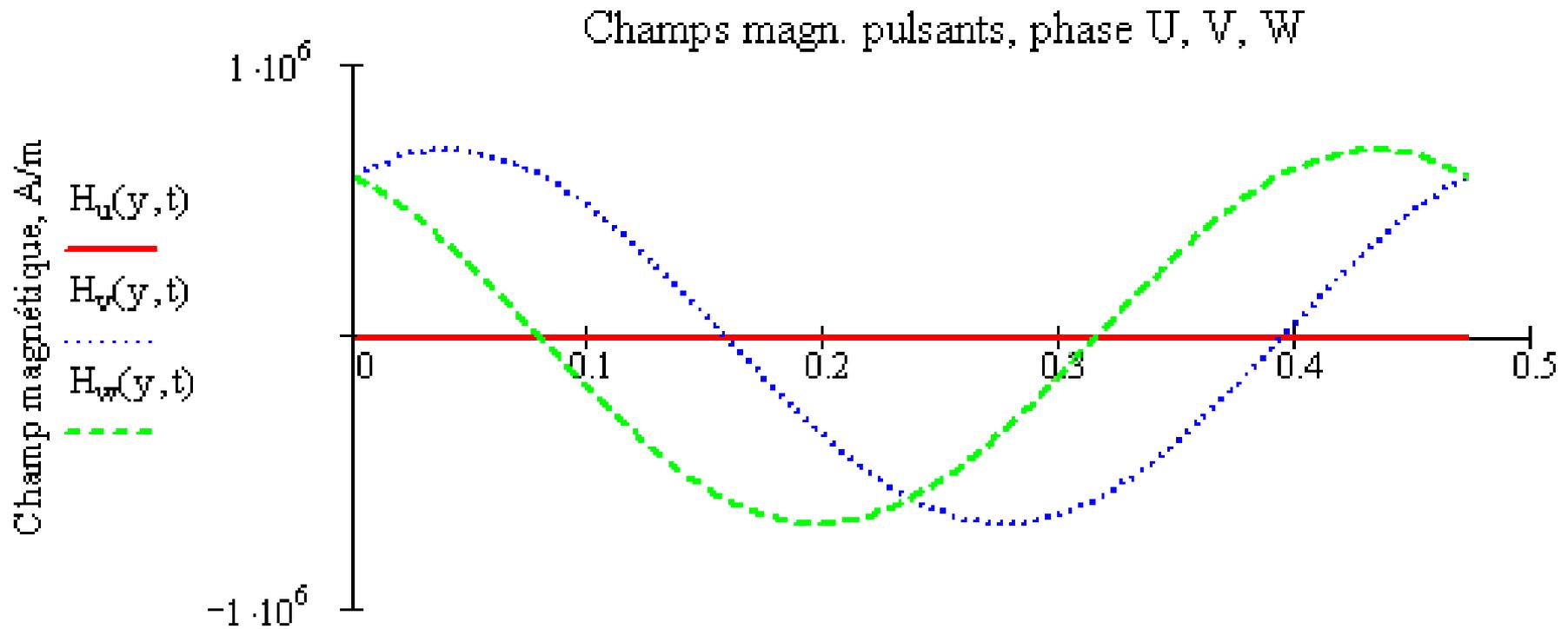
12. Champ tournant et bobinage

Champ magnétique résultant



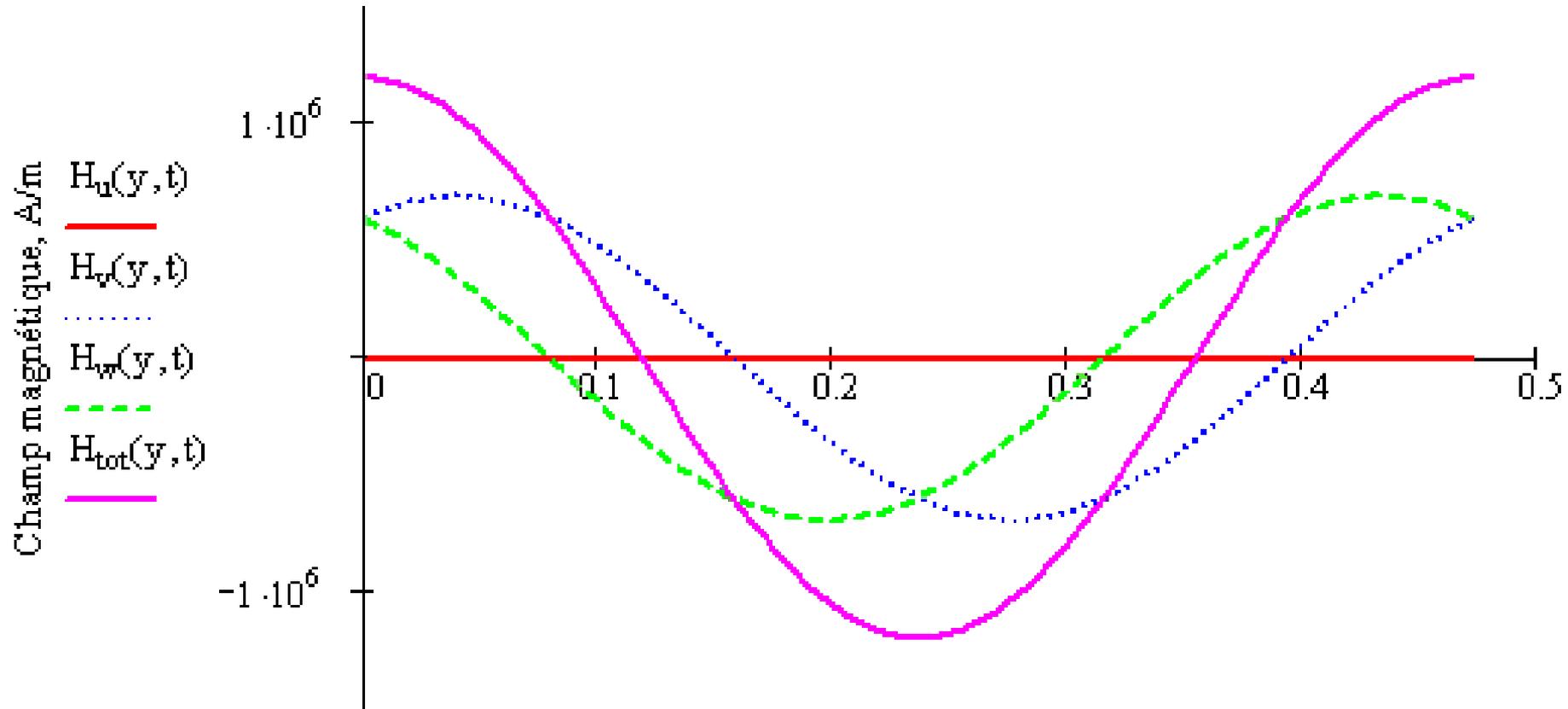
12. Champ tournant et bobinage

Champ pulsant



12. Champ tournant et bobinage

Champ tournant



12. Champ tournant et bobinage

Vitesse du champ tournant: cas du moteur bipolaire

$$H_{\text{tot}} = \frac{3}{2} \hat{H} \cos\left(\frac{\pi y}{\tau_p} - \omega t\right) - 0$$

y_m : max du champ tournant

$$\frac{\pi y_m}{\tau_p} - \omega t = 0$$

$$y_m = \frac{\omega \tau_p}{\pi} t$$

$$v_m = \frac{dy_m}{dt} = \frac{\omega \tau_p}{\pi} = 2f\tau_p$$

$\Omega = v_m / r$ avec r , rayon d'alésage

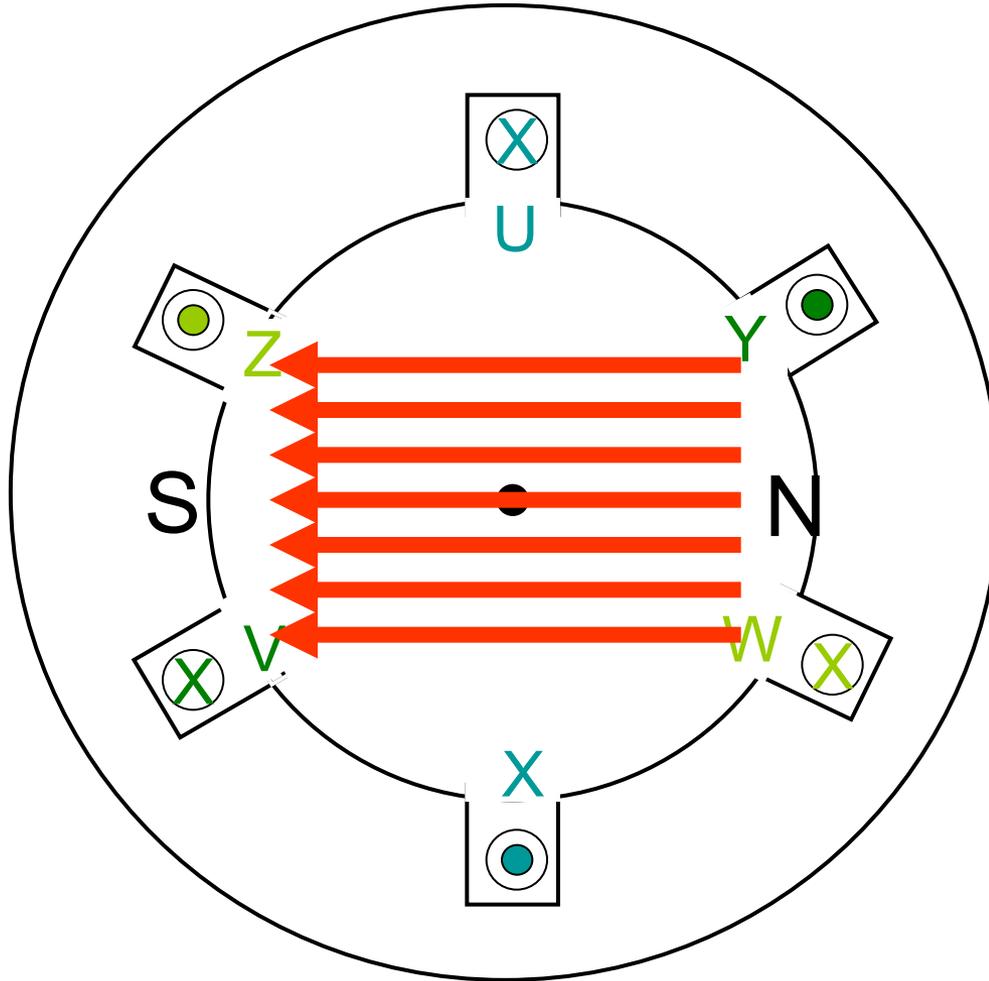
$$2\pi r = 2\tau_p$$

$$r = \frac{\tau_p}{\pi}$$

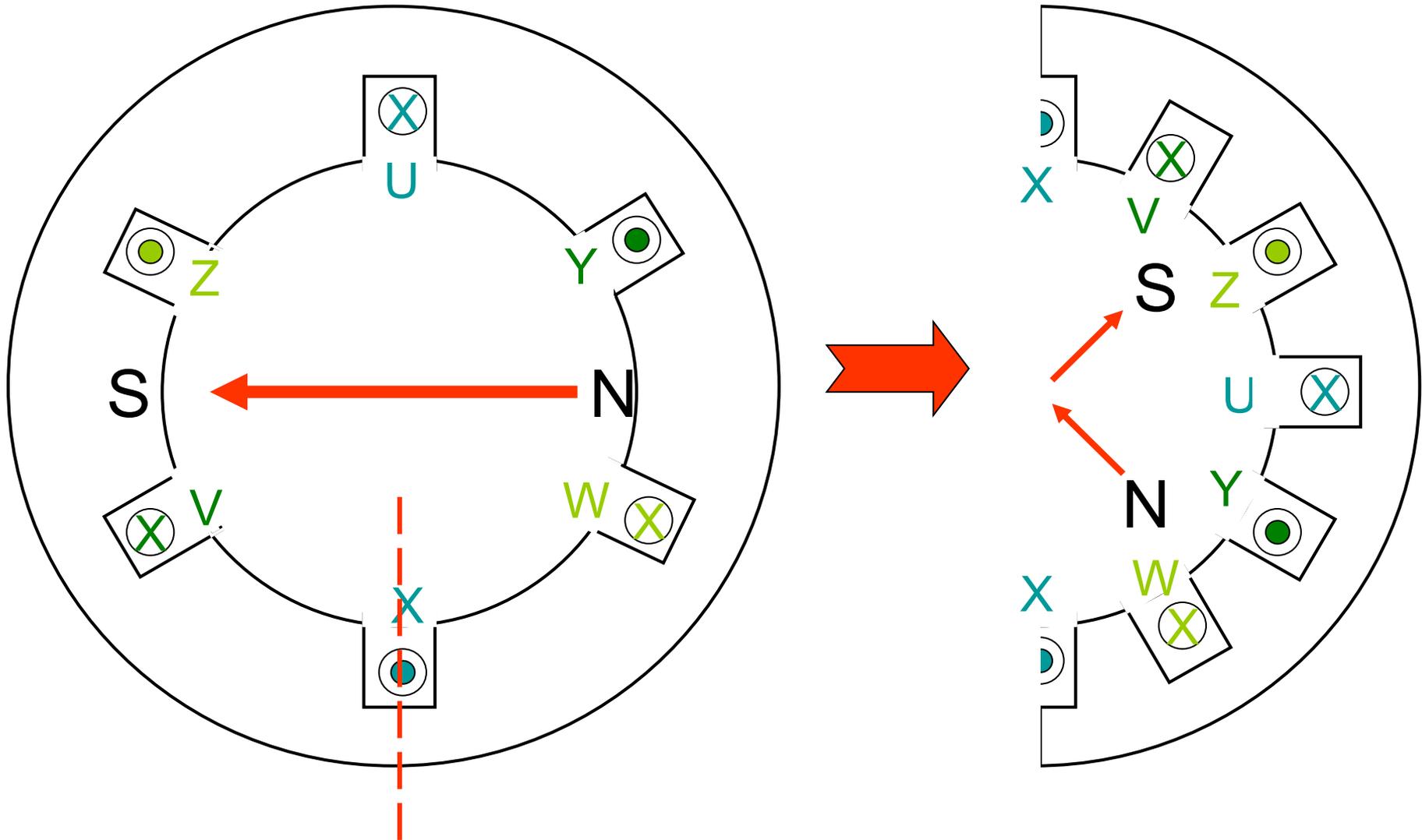
$$\Omega = \frac{v_m \cdot \pi}{\tau_p} = \omega$$

12. Champ tournant et bobinage

Notion de polarité: 2 pôles

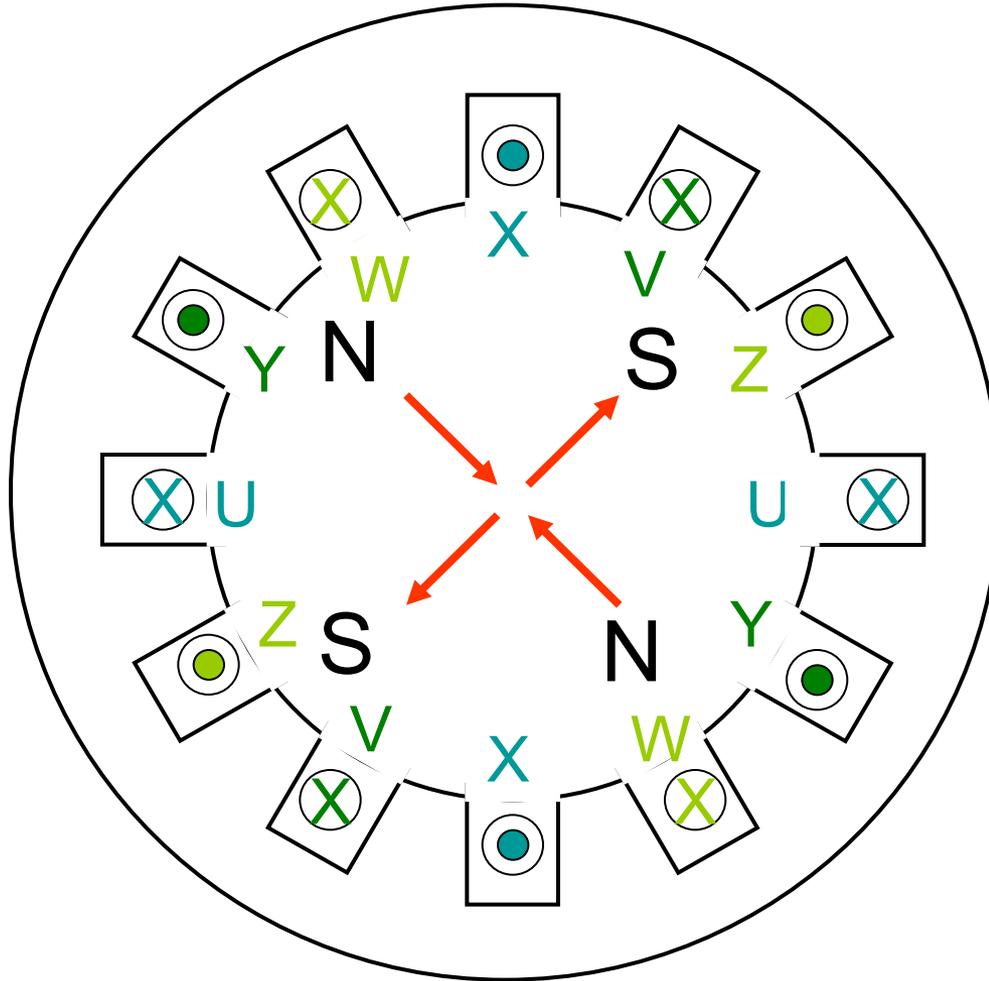


Construction d'un moteur à 4 pôles



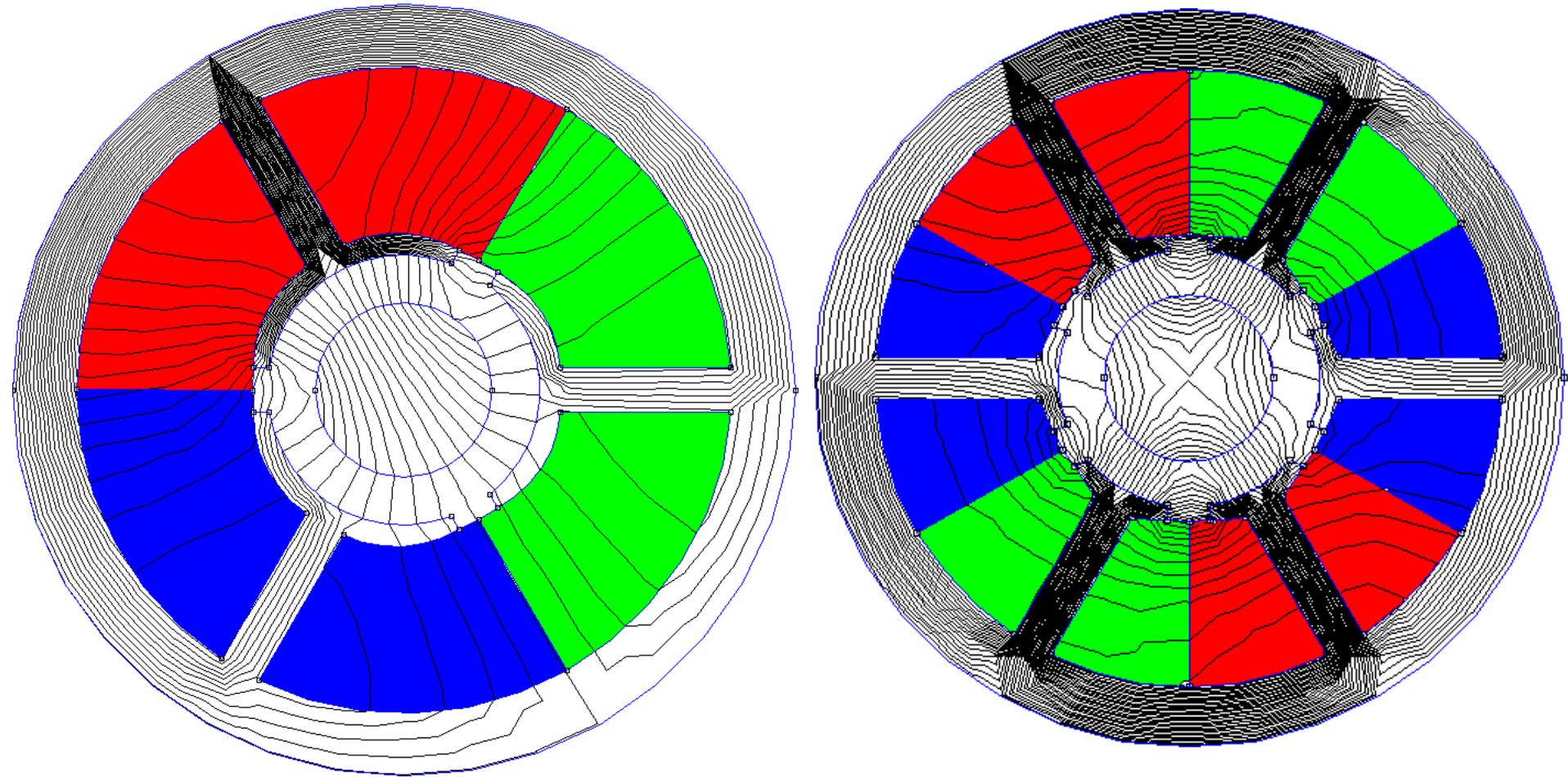
12. Champ tournant et bobinage

Moteur quadripolaire « fabriqué »



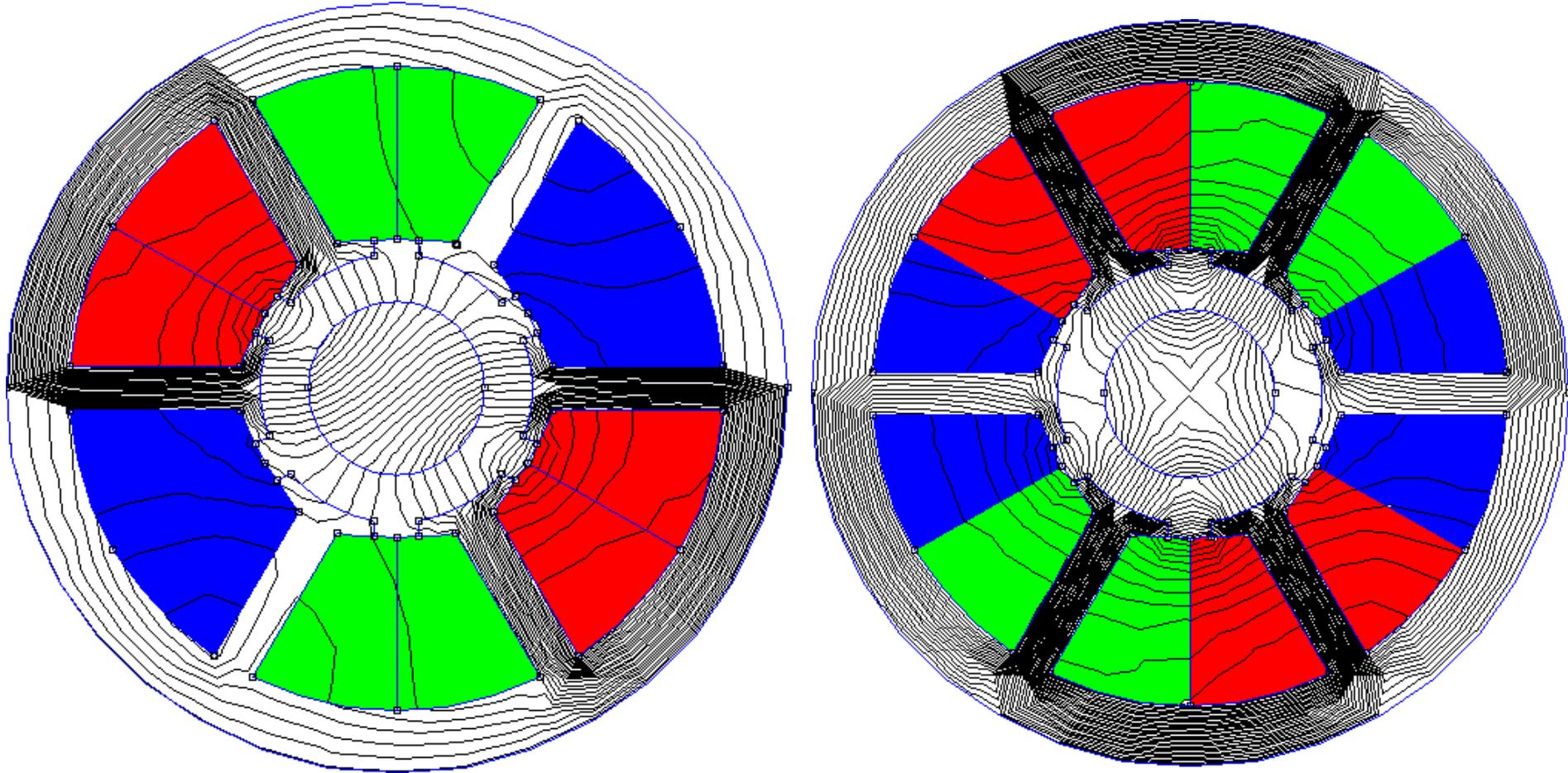
12. Champ tournant et bobinage

Exemple moteur bipolaire / quadripolaire



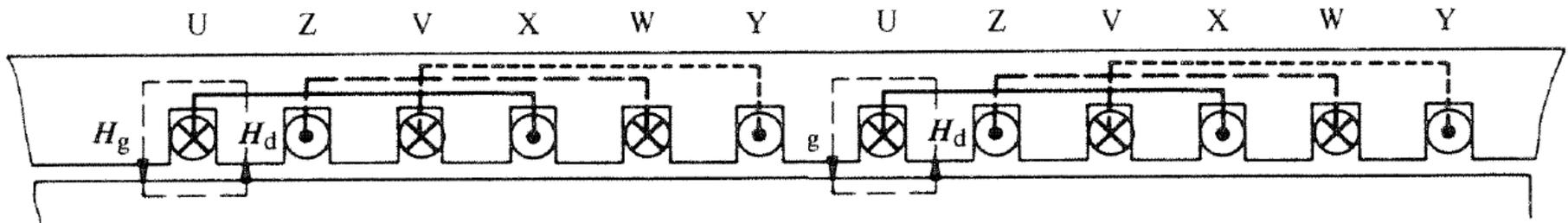
12. Champ tournant et bobinage

Exemple moteur bipolaire / quadripolaire



12. Champ tournant et bobinage

Vitesse du champ tournant: cas général



p = nombre de périodes = nombre de paires de pôles

$2p$ = nombre de pôles

$$\tau_p = \frac{2\pi r}{2p} = \frac{\pi r}{p}$$

$$\Omega_p = \frac{\omega}{p}$$

12. Champ tournant et bobinage

Tension induite en fonction du flux

$$u = Ri + d\Psi/dt = Ri + u_i$$

u_i = tension induite

$$u_i = d\Psi/dt = Nd\Phi/dt$$

On se limite au fondamental du flux

$${}^1\Phi = {}^1\hat{\Phi} \sin \omega t$$

$$u_i = N\omega {}^1\hat{\Phi} \cos \omega t$$

Valeur de crête:

$${}^1\hat{U}_i = N\omega {}^1\hat{\Phi}$$

Valeur efficace:

$${}^1U_i = N \frac{\omega}{\sqrt{2}} {}^1\hat{\Phi} = \sqrt{2}\pi Nf {}^1\hat{\Phi}$$

Effet du bobinage:

$${}^1U_i = \sqrt{2}\pi Nk_w f {}^1\hat{\Phi}$$

12. Champ tournant et bobinage

Tension induite en fonction de B

Obtention du flux:

$$\Phi = \int B dS = l \int_{\tau_p} B(y) dy$$

$$\hat{\Phi} = \frac{1}{k_f} B_{\text{eff}} l \tau_p$$

avec $k_f = \text{facteur de forme} = B_{\text{eff}} / \bar{B}$

$$B_{\text{eff}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \bar{B} = k_f \bar{B}$$

soit:

$${}^1\hat{\Phi} = \frac{2}{\pi} {}^1\hat{B} l \tau_p$$

$${}^1U_i = 2\sqrt{2} N k_w f \hat{B} l \tau_p$$

12. Champ tournant et bobinage

Facteurs de bobinage

- Facteur de distribution k_z
- Facteur de raccourcissement k_s

Facteur de bobinage $k_w = k_z k_s$

Le flux totalisé devient:

$$\Psi = k_w N \Phi$$

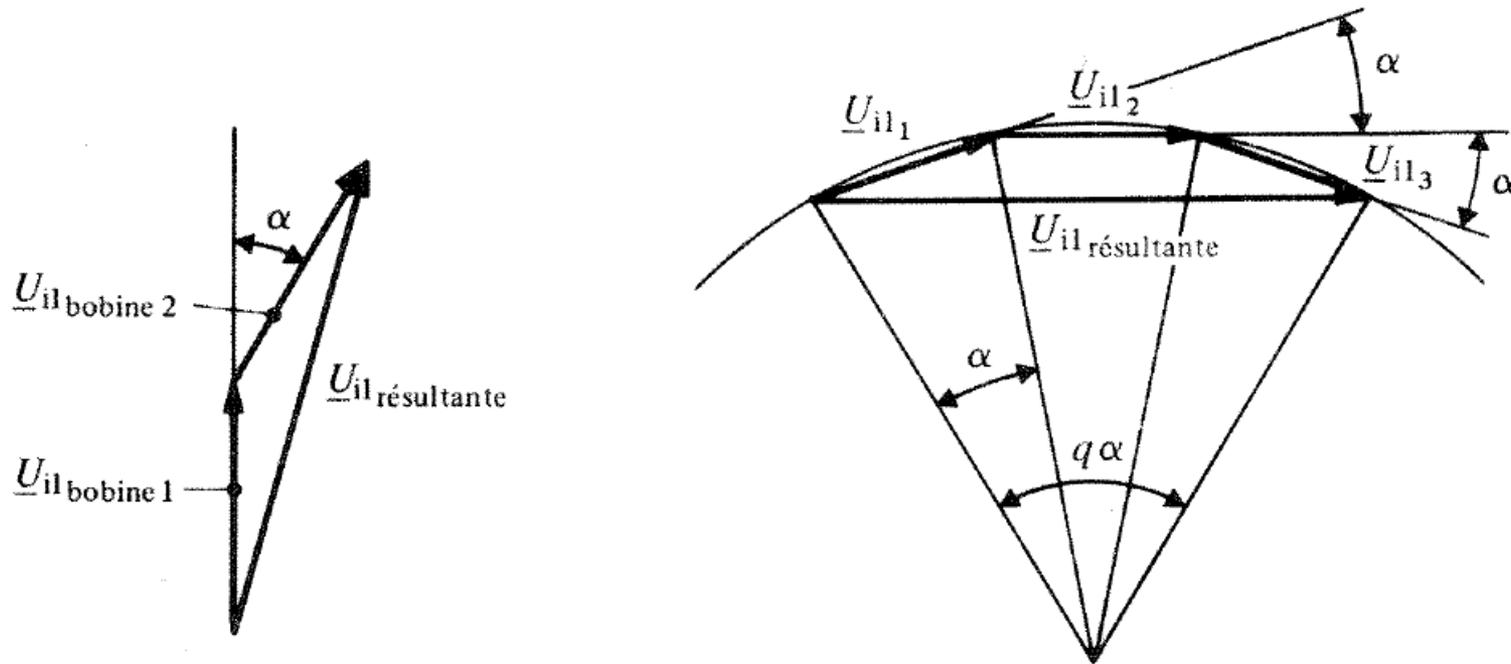


Fig. 12.10

$$k_z = \frac{\text{somme vectorielle des tensions induites}}{\text{somme arithmétique}} \leq 1$$

$$k_z = \frac{\sin(q\alpha/2)}{q \sin(\alpha/2)} = \frac{1}{2q \sin(\pi/6q)}$$

Avec q : nbre d'encoches par pôle et par phase

12. Champ tournant et bobinage

Facteur de raccourcissement

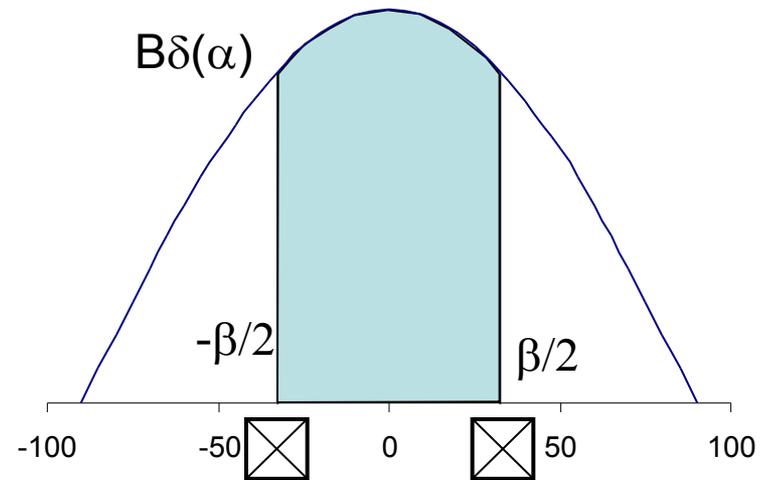
$$k_s = \frac{\text{Flux d'une bobine raccourcie}}{\text{Flux d'une bobine diamétrale}}$$

s: ouverture de la bobine

$$\beta = \frac{s}{\tau_p} \pi$$

$$\Phi_s = \Phi \frac{\int_{-\beta/2}^{\beta/2} \cos \alpha \, d\alpha}{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos \alpha \, d\alpha} = k_s \Phi$$

$$k_s = \sin \left(\frac{s}{\tau_p} \frac{\pi}{2} \right)$$



12. Champ tournant et bobinage

Facteur de raccourcissement

$$k_s = \sin\left(\frac{s}{\tau_p} \frac{\pi}{2}\right)$$

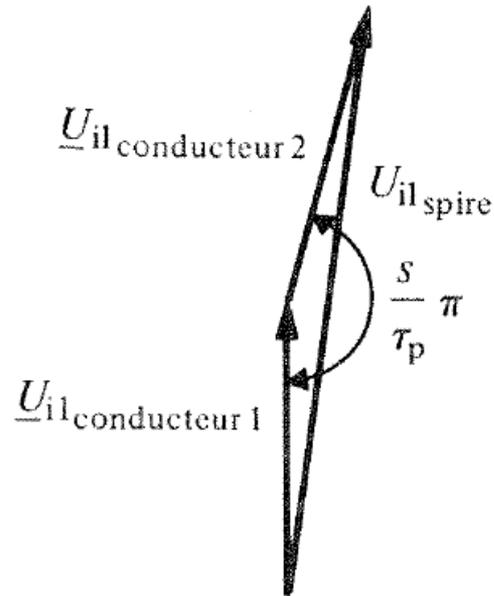


Fig. 12.11

12. Champ tournant et bobinage

Potentiel magnétique d'un bobinage

Pour un bobinage triphasé symétrique:

$${}^1\hat{\Theta}_{\text{tot}} = \frac{3}{2} {}^1\hat{\Theta} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{Nk_w}{p} I$$

12. Champ tournant et bobinage

Inductance propres et mutuelles

Flux statorique de la phase u:

$$\Psi_{su} = L_{s1} i_{su} + L_{sm} (i_{sv} + i_{sw})$$

Avec, pour un système triphasé:

$$i_{su} + i_{sv} + i_{sw} = 0$$

$$\Psi_{su} = (L_{s1} - L_{sm}) i_{su}$$

Ψ_{hu} correspondant au flux traversant l'entrefer et couplé avec le rotor;

$\Psi_{\sigma u}$ correspondant au flux de fuite;

$L_{sh} = \Psi_{hu} / i_{su}$ = inductance de champ principal

$L_{\sigma s} = \Psi_{\sigma u} / i_{su}$ = inductance de fuite

$$L_{s1} = L_{sh} + L_{\sigma s}$$

12. Champ tournant et bobinage

Inductances

$$\frac{L_{sm}}{L_{sh}} = \int_{2\tau/3}^{5\tau/3} \sin\left(\frac{\pi y}{\tau}\right) dy \bigg/ \int_0^{\tau} \sin\left(\frac{\pi y}{\tau}\right) dy = -\frac{1}{2}$$

$$L_{sm} = \frac{-L_{sh}}{2}$$

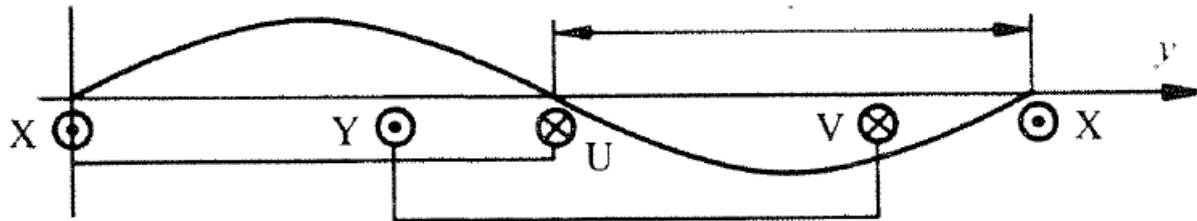


Fig. 12.12

12. Champ tournant et bobinage

Inductances

$$\Psi_{su} = i_{su} \left(L_{s1} + \frac{L_{sh}}{2} \right) = i_{su} (L_{\sigma s} + \frac{3}{2} L_{sh})$$

On pose alors:

$\frac{3}{2} L_{sh} = L_h$ = inductance de champ principal apparente d'une phase

$L_{\sigma s} + L_h = L_s$ *inductance propre apparente* d'une phase

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{su} &= L_s i_{su} \\ \Psi_{sv} &= L_s i_{sv} \\ \Psi_{sw} &= L_s i_{sw} \end{aligned} \right\}$$

Exemple: équation de tension de la phase 1 d'un moteur synchrone:

$$u_1 = R_s + L_s \frac{di_1}{dt} + k_e \Omega \sin \omega t$$

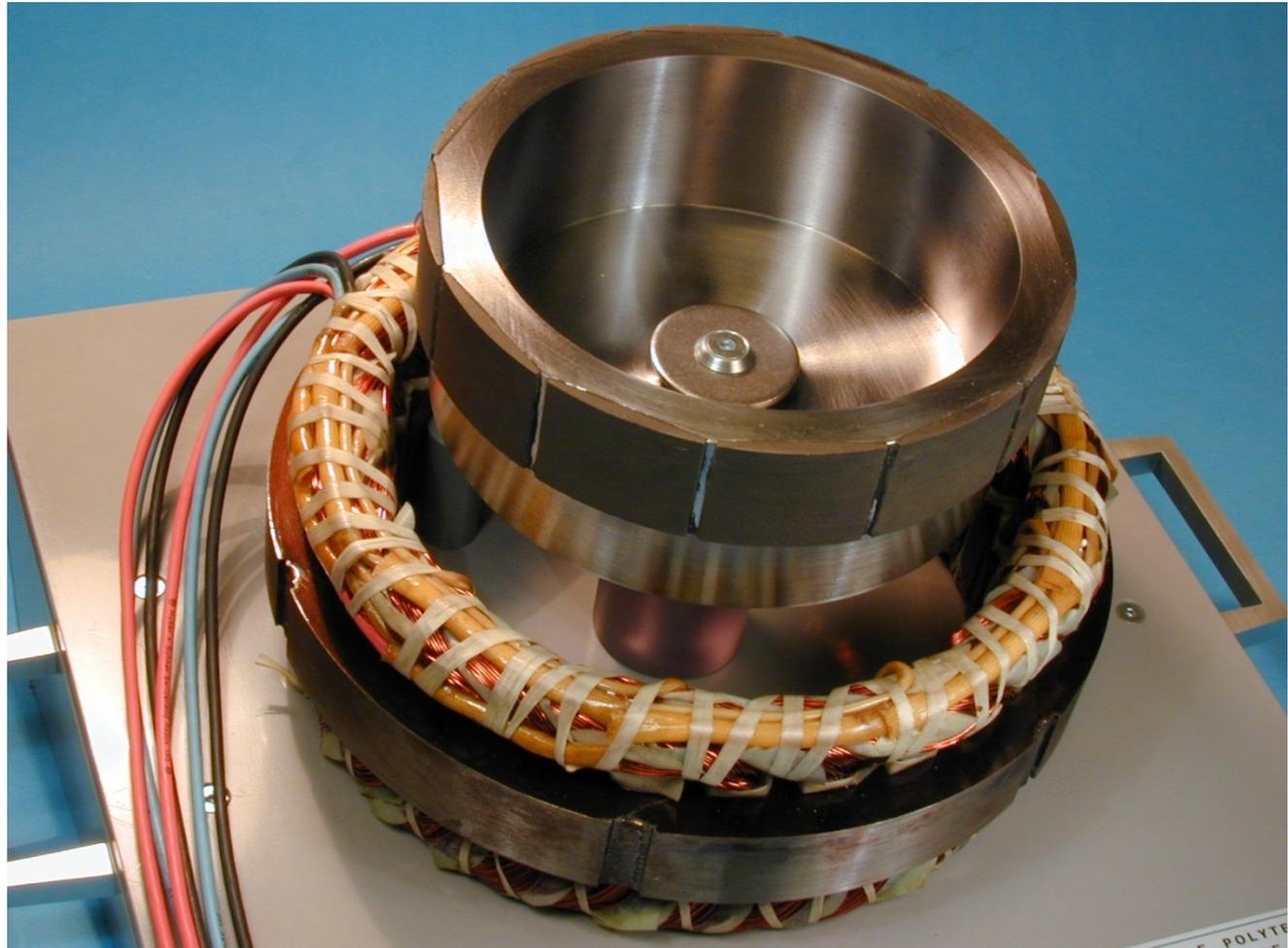
12. Champ tournant et bobinage

Bobinage réparti



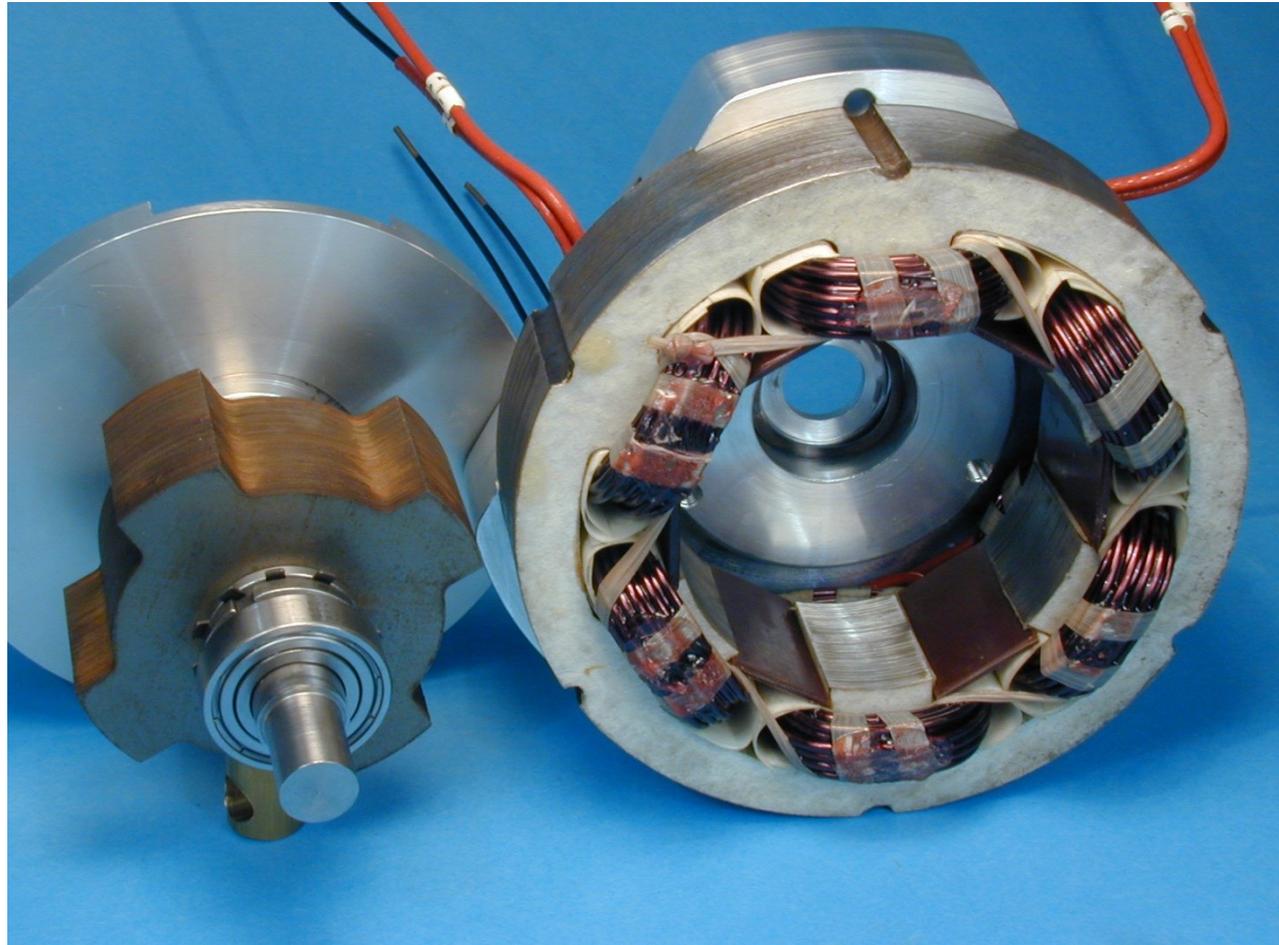
12. Champ tournant et bobinage

Moteur en cours de montage



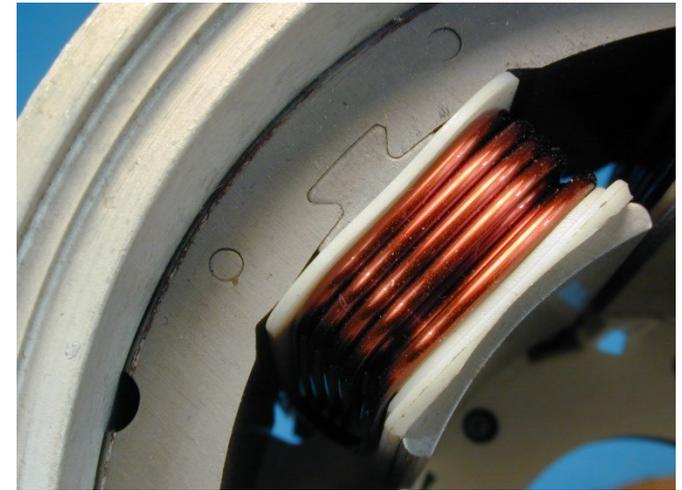
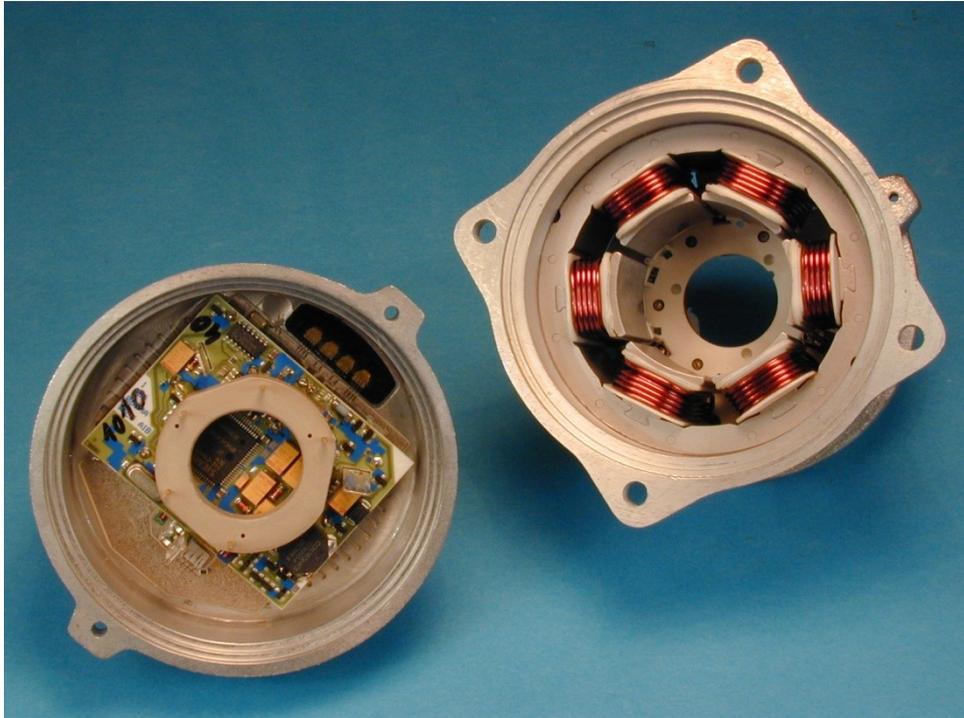
12. Champ tournant et bobinage

Concentrique - Réluctant



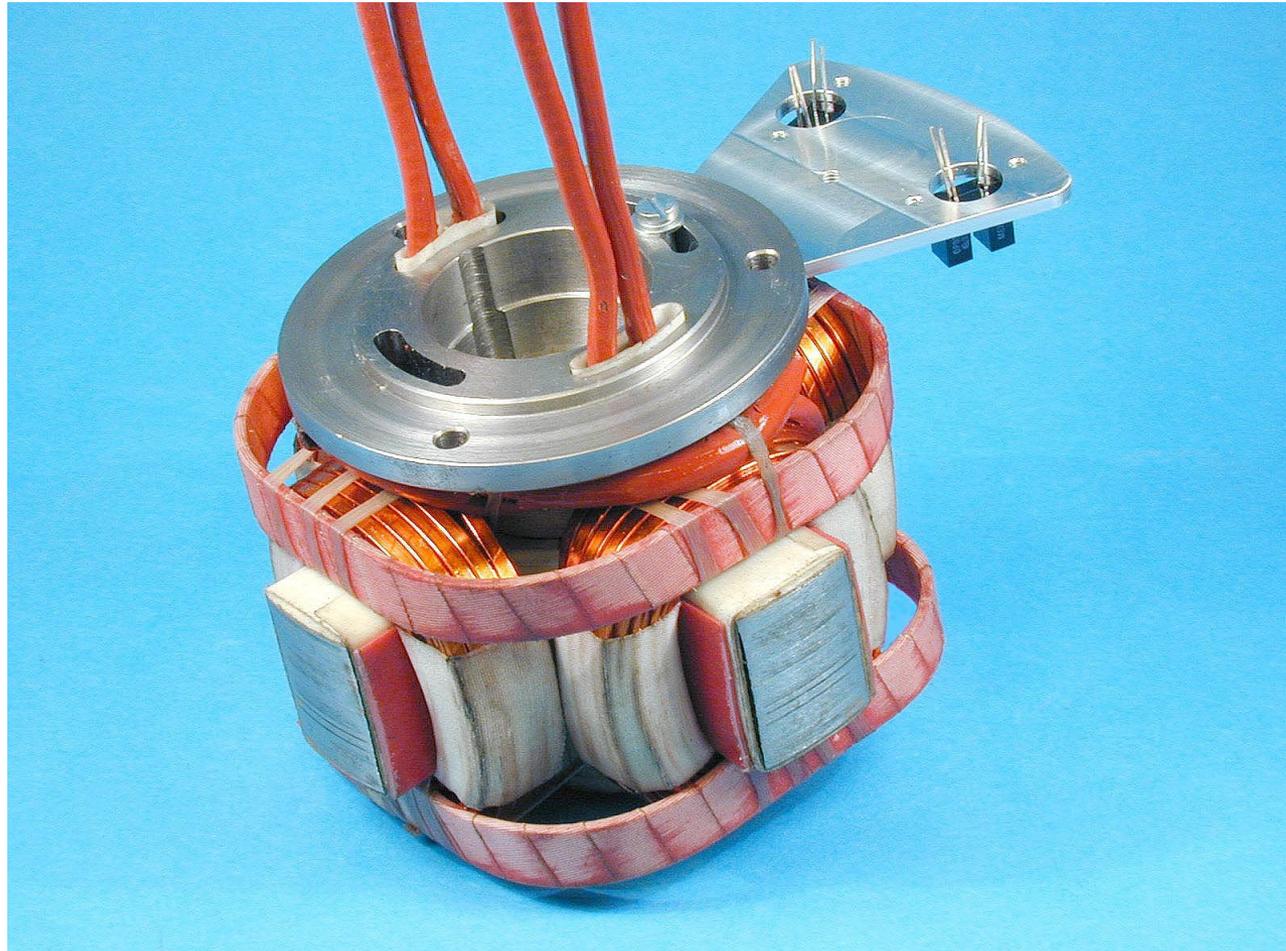
12. Champ tournant et bobinage

Astuce de bobinage



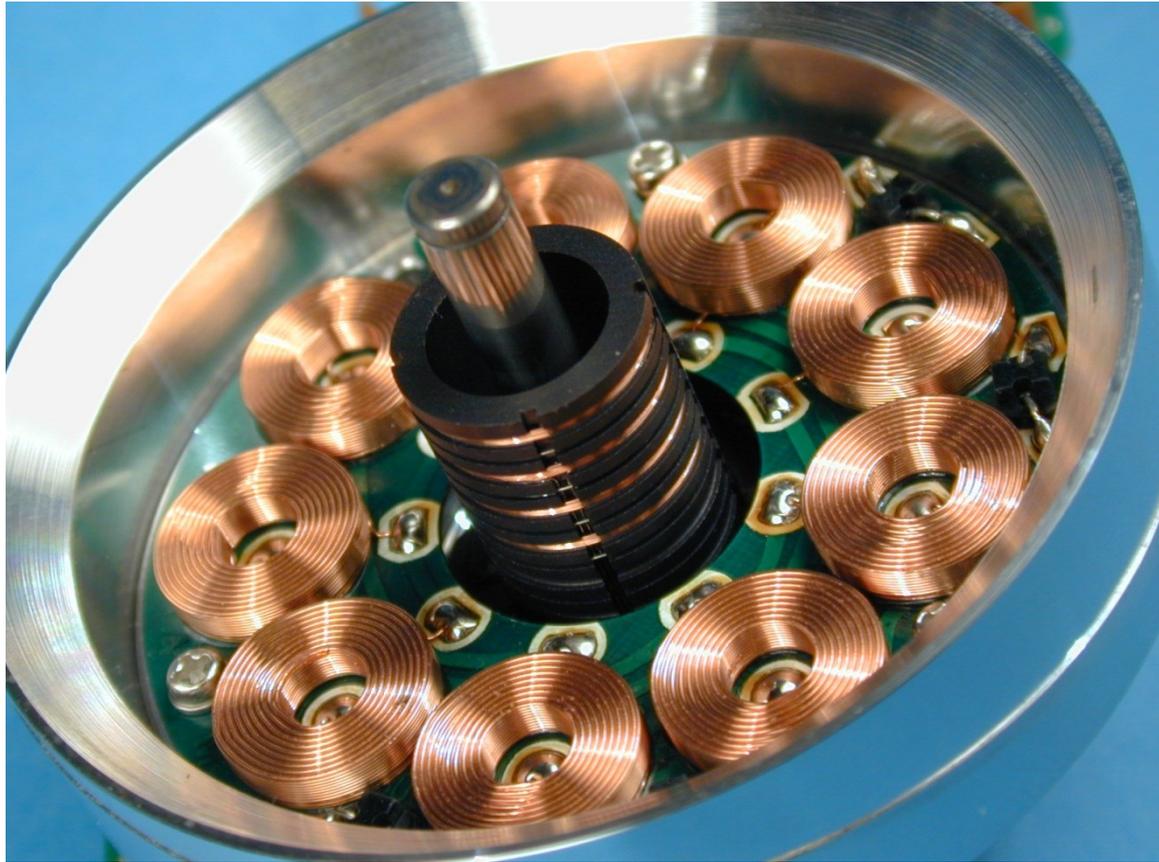
12. Champ tournant et bobinage

Concentrique - Réluctant



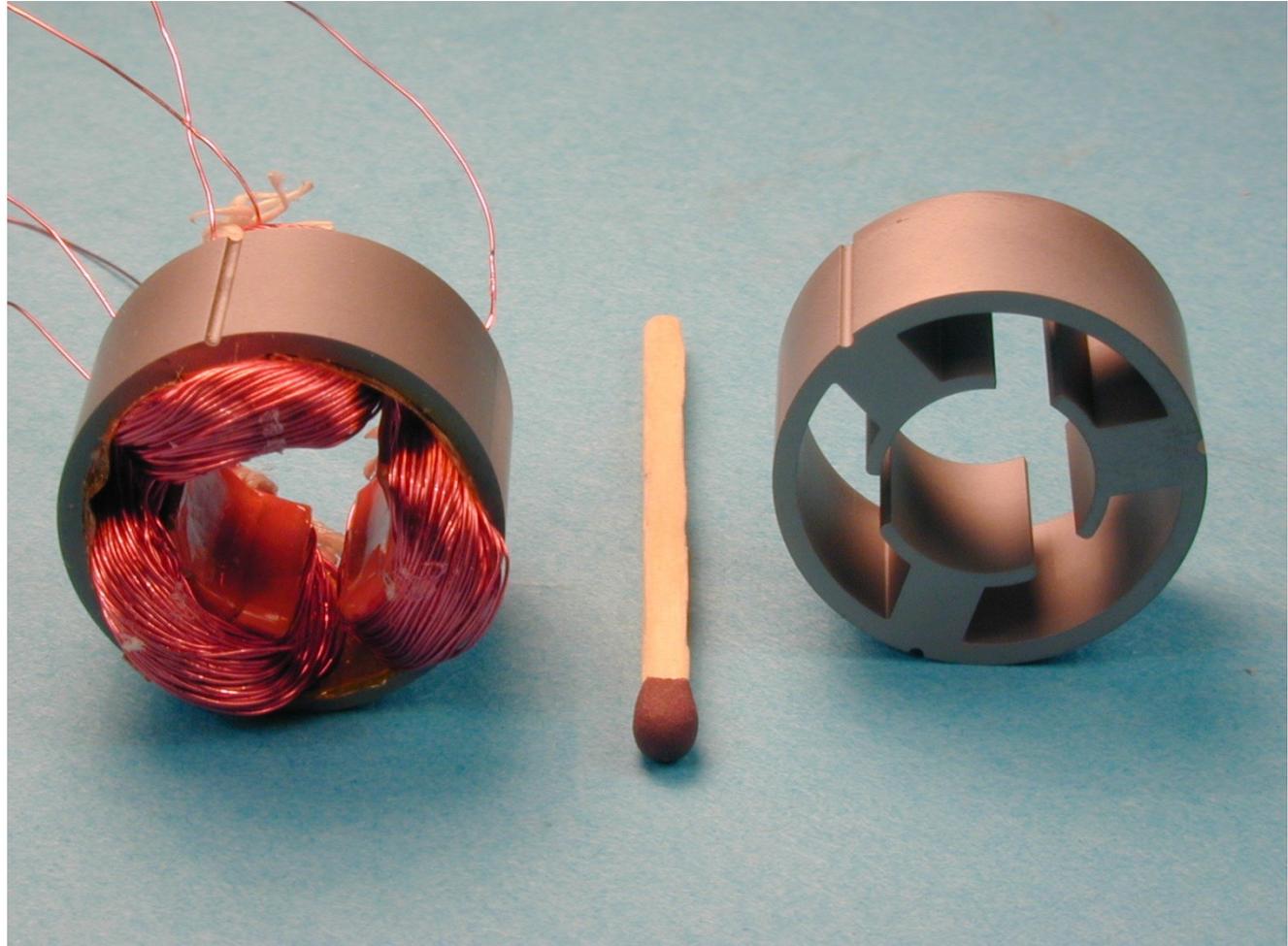
12. Champ tournant et bobinage

Concentrique - Brushless



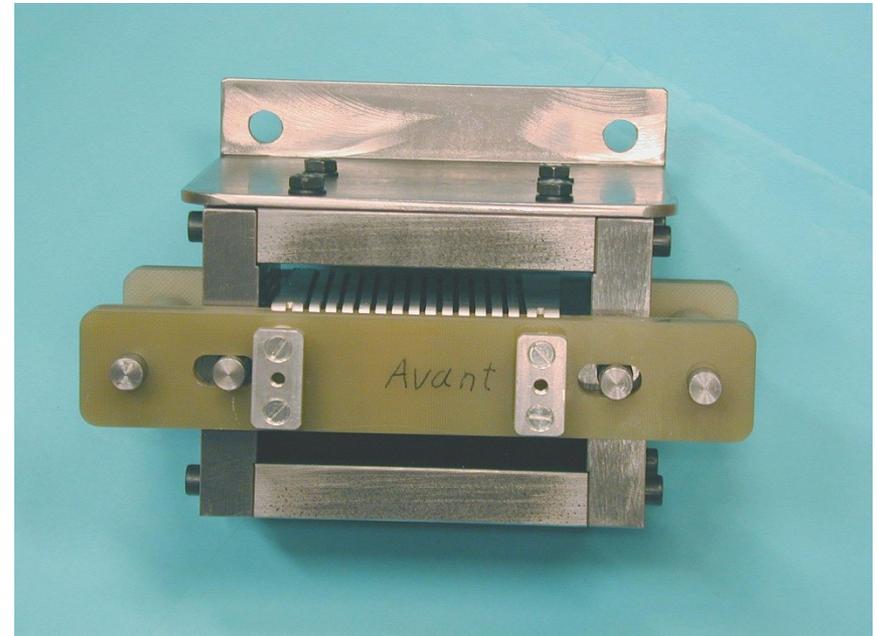
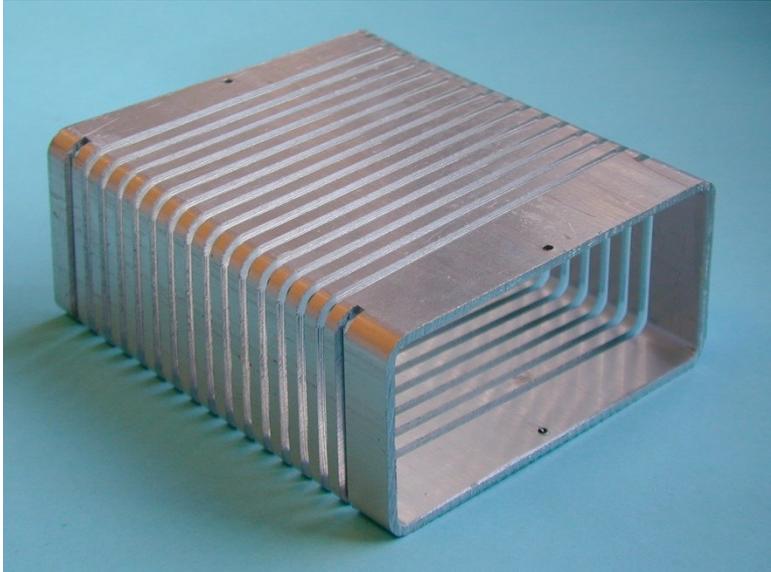
12. Champ tournant et bobinage

Concentrique - Brushless



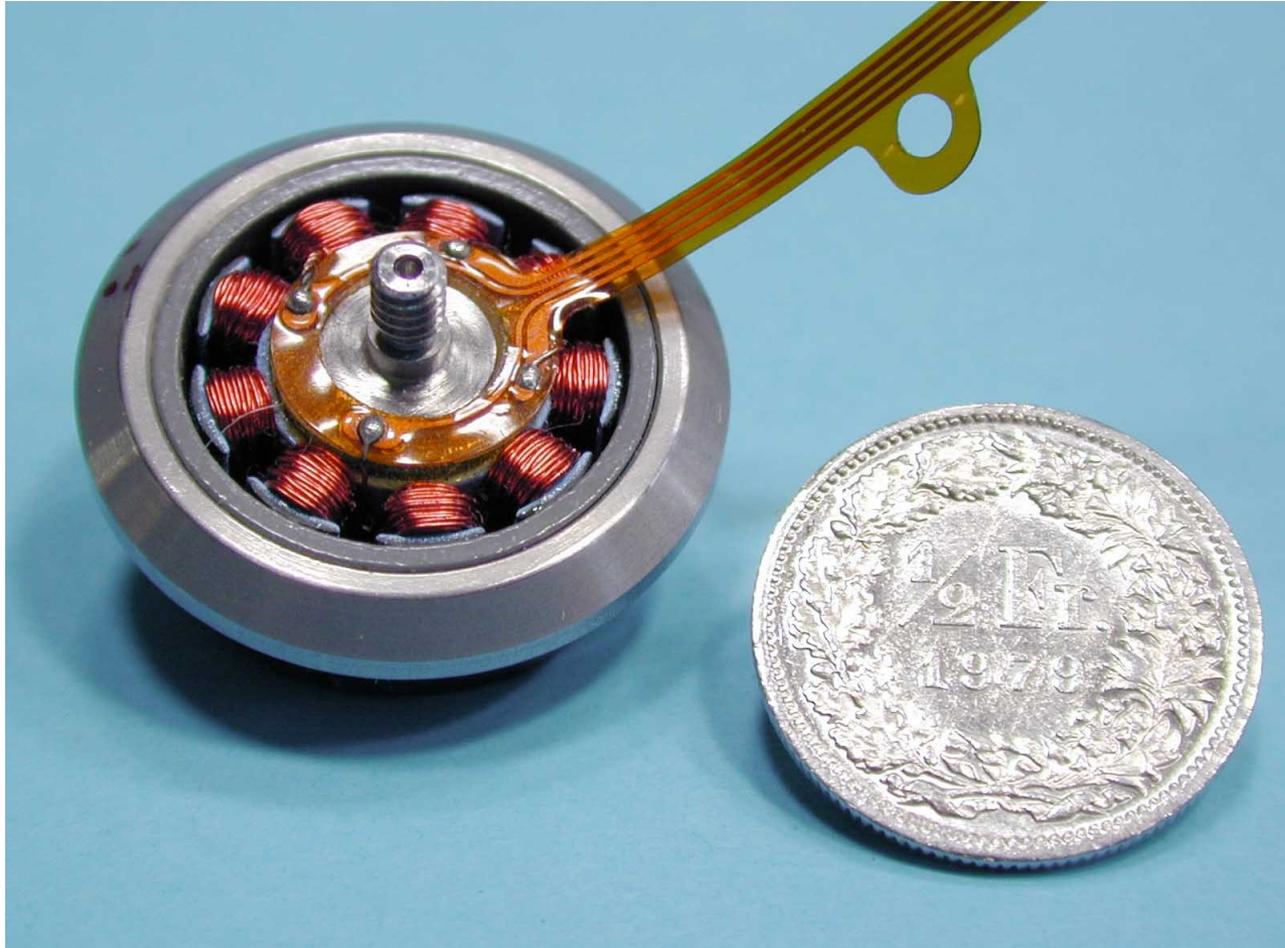
12. Champ tournant et bobinage

Concentrique - massif



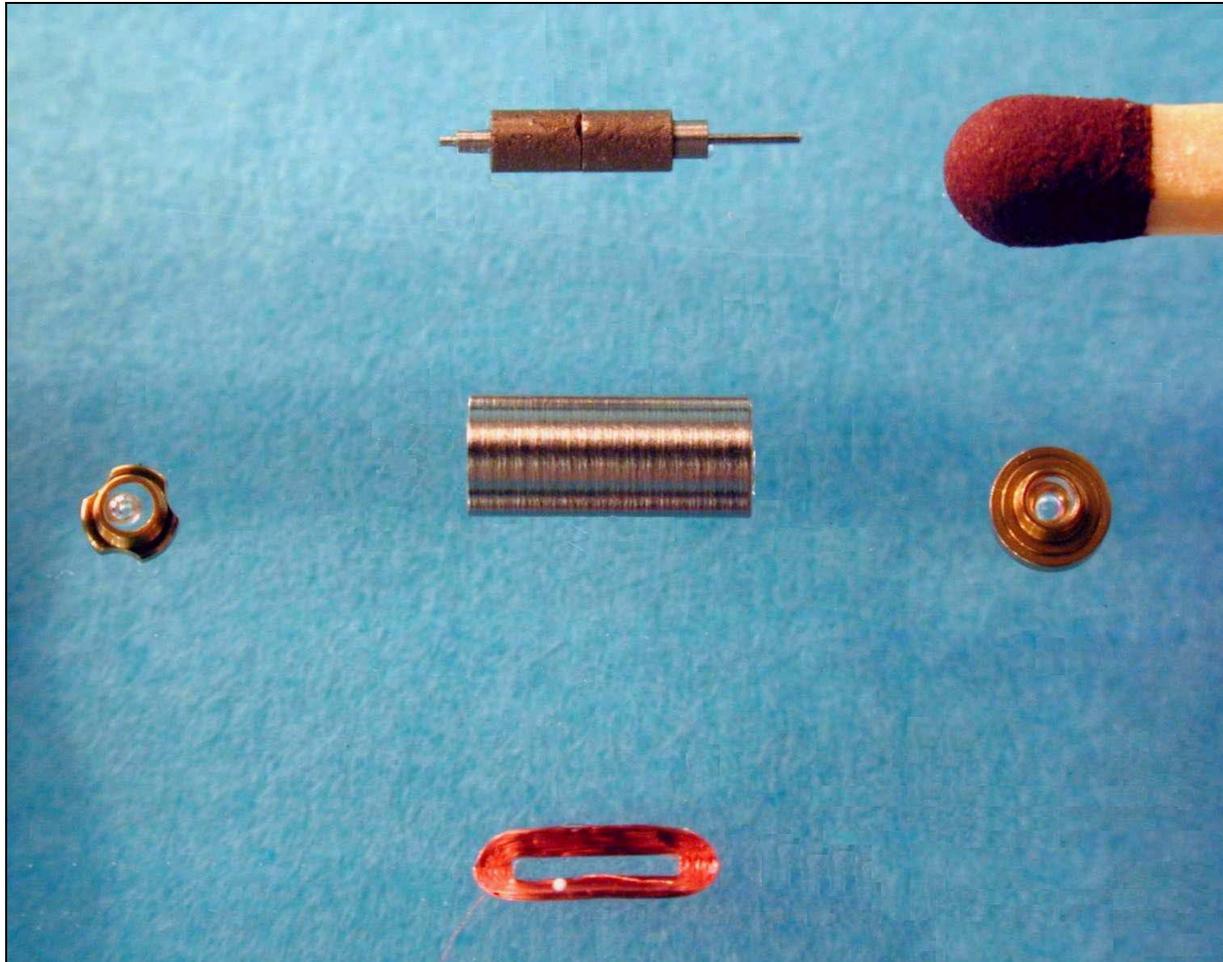
12. Champ tournant et bobinage

Concentrique - Brushless



12. Champ tournant et bobinage

Concentrique miniature



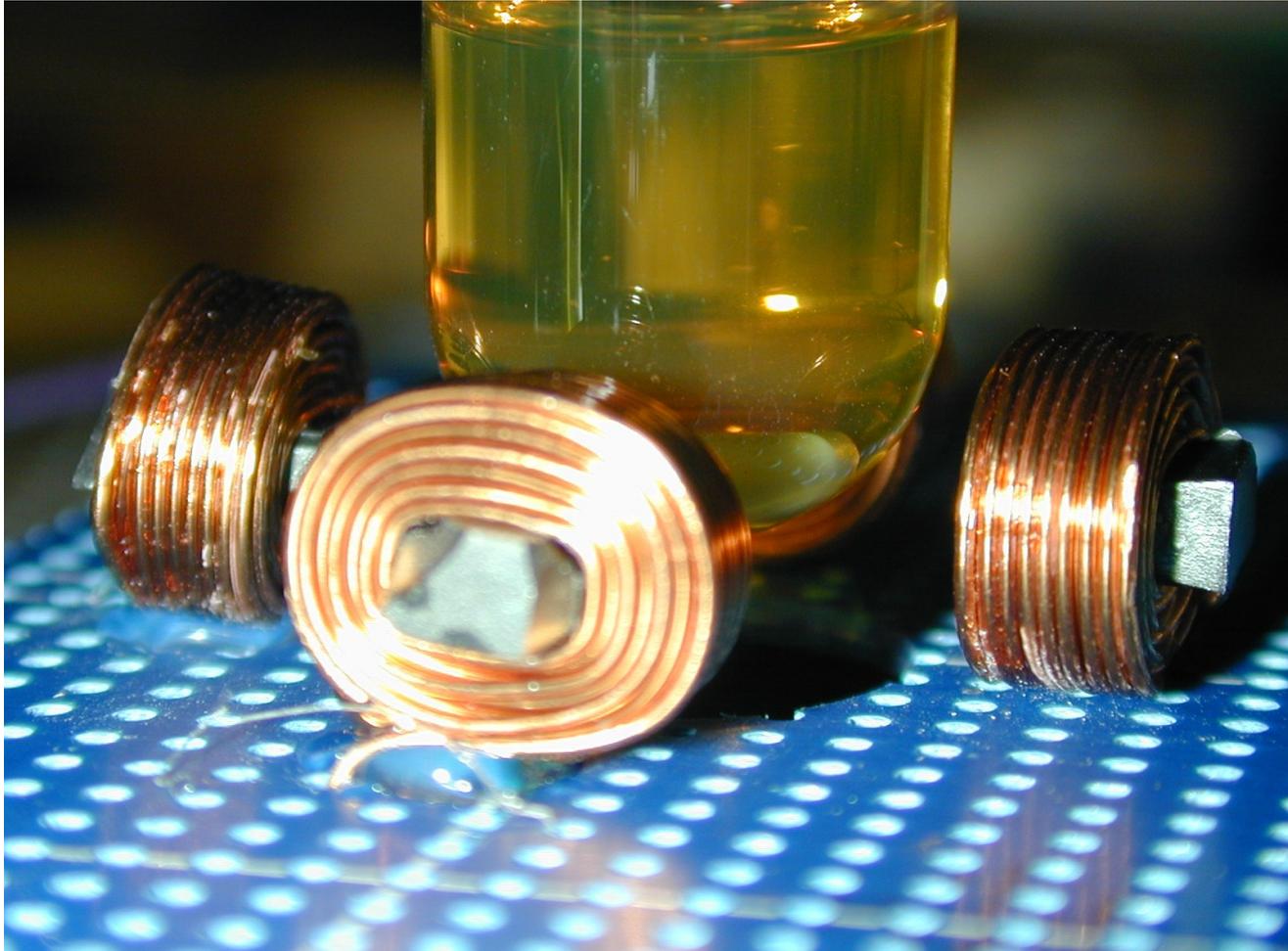
12. Champ tournant et bobinage

Spéciaux



12. Champ tournant et bobinage

Spéciaux



12. Champ tournant et bobinage

Conditions d'obtention d'un couple

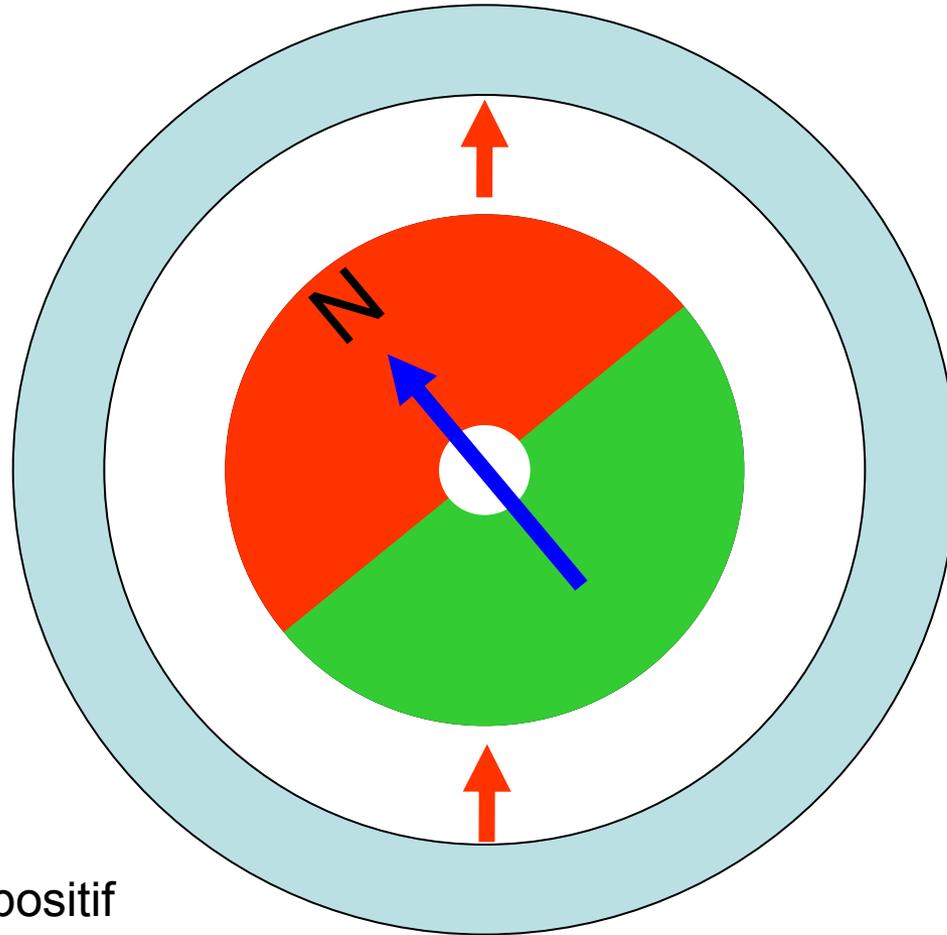
Dans un moteur électrique, on a:

- Un champ tournant statorique (créé par le stator)
- Un champ tournant rotorique (créé par le rotor)

Quelles sont les conditions pour obtenir un couple entre les deux ?

12. Champ tournant et bobinage

Conditions d'obtention d'un couple
Exemple 1: même polarité, même vitesse

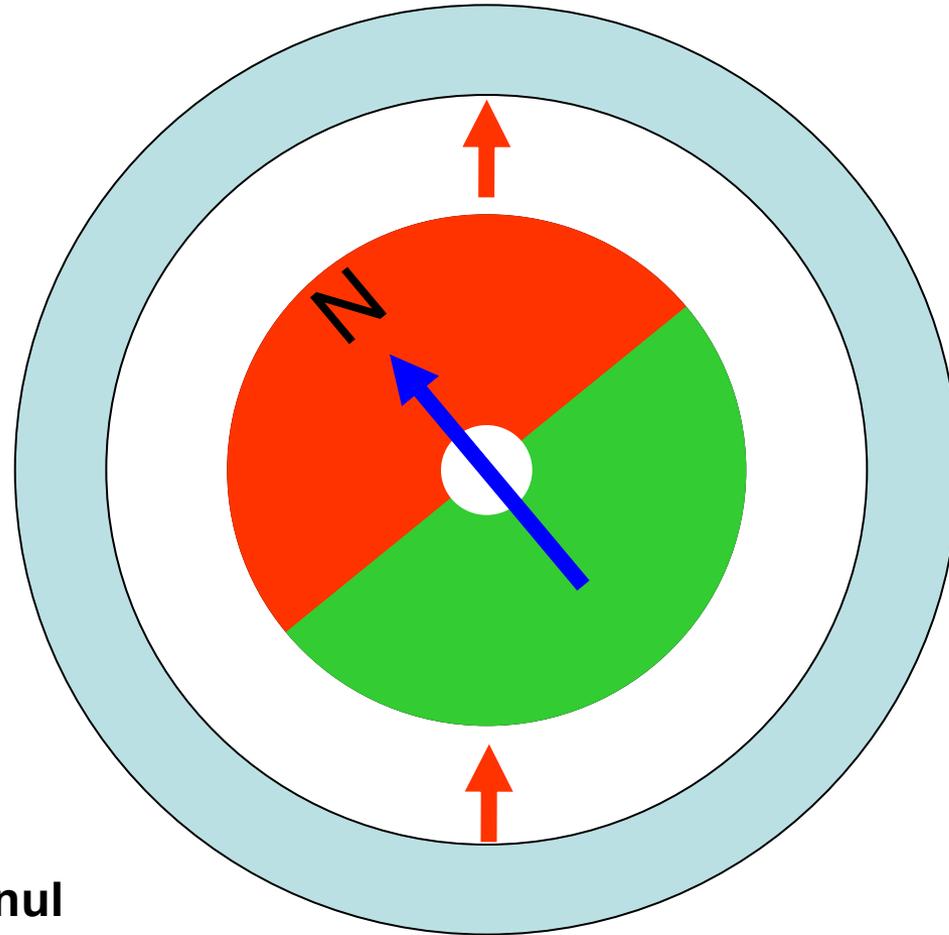


Le couple moyen est positif

12. Champ tournant et bobinage

Conditions d'obtention d'un couple

Exemple 2: vitesses différentes

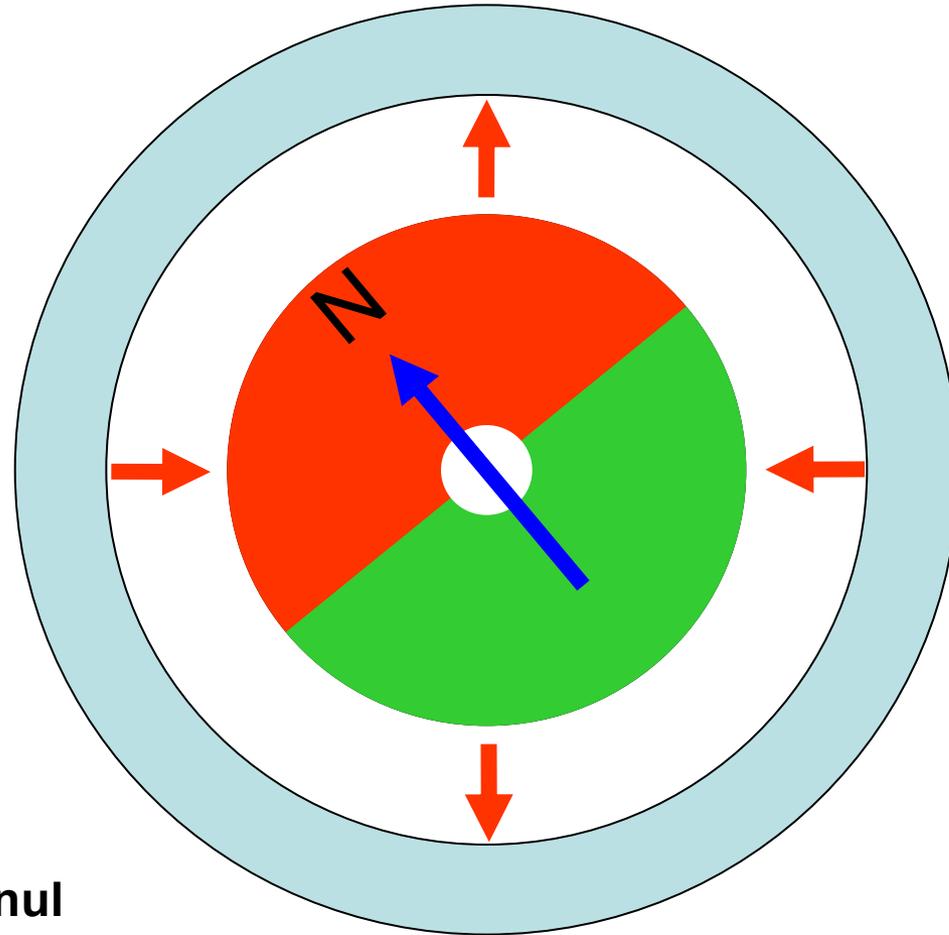


Le couple moyen est **nul**

12. Champ tournant et bobinage

Conditions d'obtention d'un couple

Exemple 2: polarités différentes



Le couple moyen est **nul**

12. Champ tournant et bobinage

Composantes de l'induction dans l'entrefer

$$B_1(x, t) = \hat{B}_1 \sin\left(\frac{x}{\tau_p} \pi - \omega t\right) = \hat{B}_1 \sin\left(\frac{2p}{D} x - \omega t\right)$$

$$B_s(x, t) = \hat{B}_s \sin\left(\frac{2p_s}{D} x - \omega_s t\right)$$

$$B_r(y, t) = \hat{B}_r \sin\left(\frac{2p_r}{D} y - \omega_r t\right)$$

$$\Omega_r' = \Omega_r + \Omega_m \quad \omega_r' = p_r \Omega_r' = \omega_r + \omega_m \quad \omega_m = p_r \Omega_m$$

12. Champ tournant et bobinage

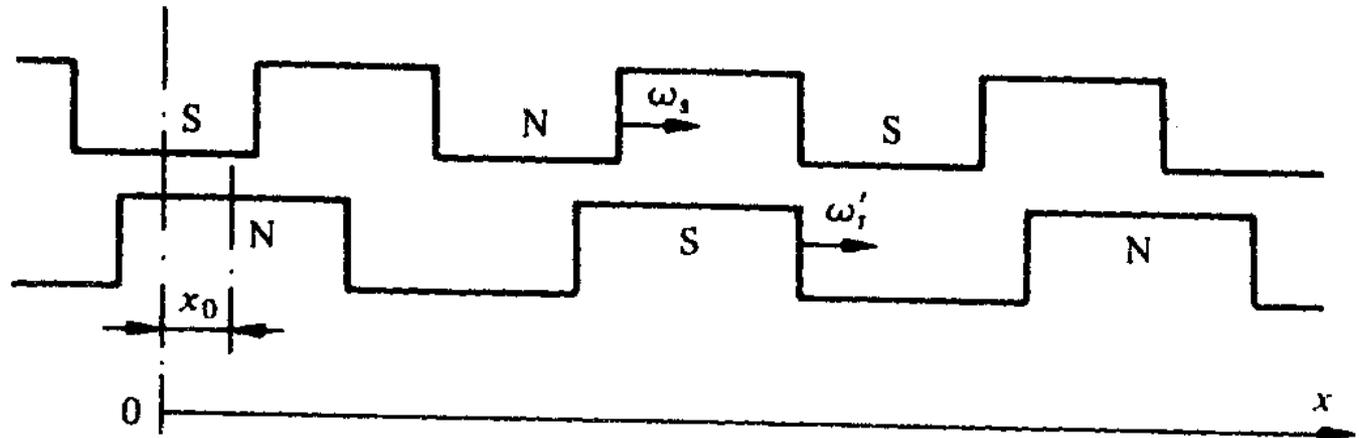
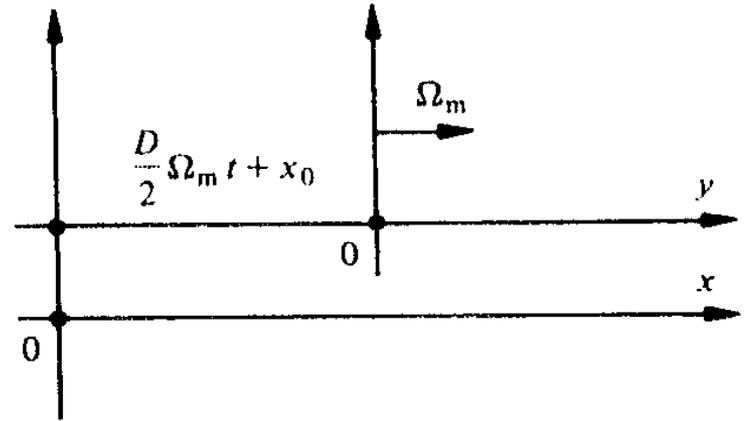
Changement de référentiel (-> stator)

$$x = y + \frac{D}{2} \Omega_m t + x_0$$

$$B'_r(x, t) = \hat{B}_r \sin\left(\frac{2p_r}{D} x - \omega'_r t - p_r \xi_m\right)$$

Déphasage entre les 2 composantes:

$$\xi_m = \frac{2x_0}{D}$$



12. Champ tournant et bobinage

Energie magnétique dans l'entrefer

$$\begin{aligned} W_{\text{mag}} &= \int_V \frac{(B_s + B_r')^2}{2\mu_0} dV \\ &= \frac{\delta l}{2\mu_0} \int_0^{\pi D} (B_s^2 + B_r'^2 + 2B_s B_r') dx = W_1 + W_2 + W_3 \end{aligned}$$

$$W_1 = \frac{\delta l}{2\mu_0} \int_0^{\pi D} B_s^2 dx = \frac{\pi D l \delta}{2\mu_0} \frac{B_s^2}{2}$$

$$W_2 = \frac{\delta l}{2\mu_0} \int_0^{\pi D} B_r'^2 dx = \frac{\pi D l \delta}{2\mu_0} \frac{B_r'^2}{2}$$

12. Champ tournant et bobinage

Energie magnétique (composante mutuelle)

$$\begin{aligned} W_3 &= \frac{\delta l}{2\mu_0} \int_0^{\pi D} 2B_s B_r' dx \\ &= \frac{\delta l}{2\mu_0} B_s B_r \left[\int_0^{\pi D} \cos \left(\frac{2(p_s - p_r)}{D} x - (\omega_s - \omega_r') t + p_r \xi_m \right) dx \right. \\ &\quad \left. - \int_0^{\pi D} \cos \left(\frac{2(p_s + p_r)}{D} x - (\omega_s + \omega_r') t - p_r \xi_m \right) dx \right] \end{aligned}$$

- pour $p_s \neq p_r$:

$$W_3 = 0$$

- pour $p_s = p_r = p$:

$$W_3 = \frac{\pi D l \delta}{2\mu_0} B_s B_r \cos [-(\omega_s - \omega_r') t + p_r \xi_m]$$

12. Champ tournant et bobinage

Energie magnétique totale

- pour $p_s \neq p_r$:

$$W_{\text{mag}} = \frac{\pi D l \delta}{2\mu_0} \left(\frac{\hat{B}_s^2 + \hat{B}_r^2}{2} \right)$$

- pour $p_s = p_r = p$:

$$W_{\text{mag}} = \frac{\pi D l \delta}{2\mu_0} \left[\frac{\hat{B}_s^2 + \hat{B}_r^2}{2} + \hat{B}_s \hat{B}_r \cos [-(\omega_s - \omega_r')t + p\xi_m] \right]$$

12. Champ tournant et bobinage

Couple électromagnétique

$$T_{\text{em}} = \frac{\partial W_{\text{mag}}}{\partial \xi_m}$$

$$\omega'_r = p_r \Omega'_r = \omega_r + \omega_m \quad \omega_m = p_r \Omega_m$$

- pour $p_s \neq p_r$:

$$T_{\text{em}} = 0$$

- pour $p_s = p_r = p$:

$$T_{\text{em}} = -\frac{\pi D l \delta}{2\mu_0} \hat{B}_s \hat{B}_r p \sin [-(\omega_s - \omega'_r)t + p\xi_m]$$

Pour que la moyenne de T_{em} soit non-nulle, il faut:

$$\omega_s - \omega'_r = 0$$

$$\text{Soit } \omega_s = \omega'_r = \omega_r + p\Omega_m$$

12. Champ tournant et bobinage

Possibilités de couple non-nul:

- $\omega_r = 0$
 $\Omega_m = \omega_s / p$ moteur synchrone
- $\omega_s = 0$
 $\Omega_m = \omega_r / p$ moteur à courant continu
- $\omega_r \neq 0, \omega_s \neq 0$
 $\omega_r = \omega_s - p\Omega_m$ moteur asynchrone

$$T_{em} = - \frac{\pi D l \delta}{2\mu_0} \hat{B}_s \hat{B}_r p \sin p\zeta_m$$

Conclusion

- Notion de champ tournant, champ pulsant:
 - Il faut au minimum 2 phases pour générer un champ tournant
 - Un champ tournant peut être décomposé en 2 champ pulsants
- Equation de tension induite et effet du bobinage
 - Facteur de distribution
 - Facteur de raccourcissement
- Condition d'obtention d'un couple
 - Il faut 2 sources de champs magnétique synchrones de même polarité déphasées