

Machine électriques (pour GM)

- Circuit magnétique _____ page 1
- Phaseurs _____ page 5
- Transformateur _____ page 6
- Eléments de base _____ page 10
- Machine asynchrone _____ page 18
- Machine à courant continu _____ page 30
- Machine synchrone _____ page 41
- Mot. synchrone à aimants permanents _____ page 50
- Moteur pas à pas _____ page 58
- Rapport TP – Technique de mesure (Blue Box)
- Rapport TP – Machine Asynchrone
- Rapport TP – Moteur à courant continu
- Rapport TP – Machine Synchrone

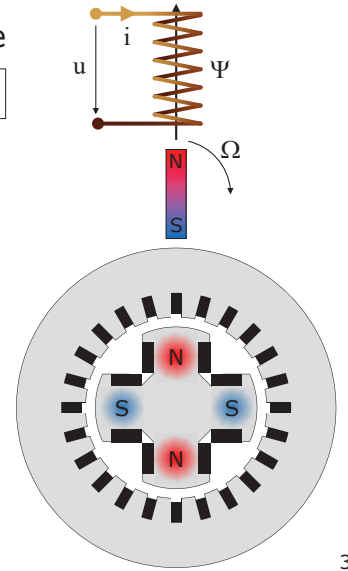
Tension induite généralisée

$$u = R i + \frac{d\Psi}{dt}$$

Tension induite de saturation

$$u = R i + L \frac{di}{dt} + k_\phi \Omega + i \frac{\partial L}{\partial i} \frac{di}{dt}$$

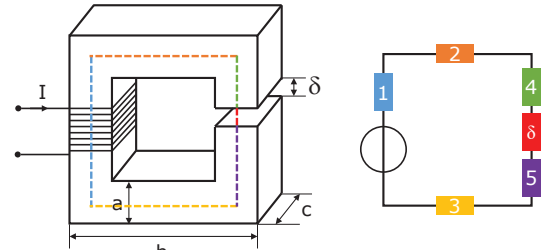
Tension induite de transformation Tension induite de mouvement



Circuit magnétique

Potentiel magnétique (tension)	$\Theta = Ni = HI$	
Flux d'induction magnétique (courant)	$\Phi = BS$	longueur
Flux totalisé	$\Psi = N \Phi$	
Perméance (résistance ⁻¹)	$\Lambda = \mu \frac{S}{l}$	
Perméabilité	$\mu = \mu_0 \mu_r \rightarrow \mu_0 = 4 \pi 10^{-7}$	
Loi d'Ohm	$\Phi = \Lambda \Theta$	
Mise en parallèle de perméances	$\Lambda_{eq \text{ parallèle}} = \sum_k \Lambda_k$	
Mise en série de perméances	$\Lambda_{eq \text{ série}} = \frac{1}{\sum_k \frac{1}{\Lambda_k}}$	

Perméance équivalente et longueur moyenne



$$\frac{1}{\Lambda_{eq}} = \sum_k \frac{1}{\Lambda_k} = \frac{l_1}{\mu_{fer} S} + \frac{l_2}{\mu_{fer} S} + \frac{l_3}{\mu_{fer} S} + \frac{l_4}{\mu_{fer} S} + \frac{\delta}{\mu_0 S} + \frac{l_5}{\mu_{fer} S}$$

$$= \frac{(l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5)}{\mu_{fer} S} + \frac{\delta}{\mu_0 S} = \frac{(l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + \mu_{rfer} \delta + l_5)}{\mu_{fer} S}$$

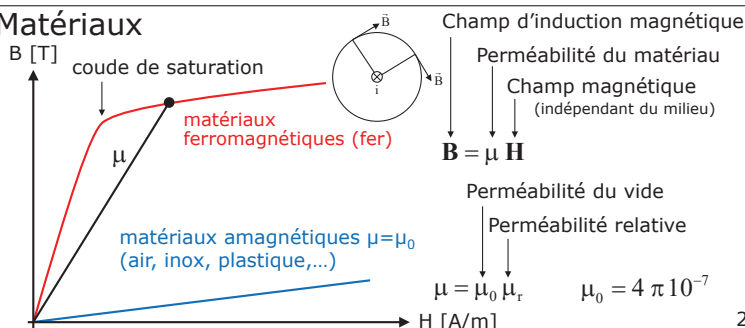
$$\Lambda_{eq} = \frac{\mu_{fer} S}{(l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + \mu_{rfer} \delta + l_5)}$$

Inductances

Flux totalisé $\Psi = L i$ En sinus : $X = \omega L$
 $\omega = 2 \pi f$

Inductance de champ principal $L_{hl} = N_1^2 \Lambda_{hl}$	Inductance de fuite $L_{\sigma 1} = N_1^2 \Lambda_{\sigma 1}$	
Inductance propre $L_{11} = \frac{\Psi_1}{i_1} = L_{hl} + L_{\sigma 1}$	Inductance mutuelle $L_{21} = \frac{\Psi_2}{i_1} = N_1 N_2 \Lambda_{21}$	$\Lambda_{21} = \Lambda_{12}$ $L_{21} = L_{12}$

Matériaux



Phaseurs

\hat{U}, \hat{I} = valeurs de crête
 U, I = valeurs efficace

Grandeurs instantanées

$$u \equiv u(t) = \hat{U} \cos(\omega t + \alpha) = \sqrt{2} U \cos(\omega t + \alpha)$$

$$i \equiv i(t) = \hat{I} \cos(\omega t + \beta) = \sqrt{2} I \cos(\omega t + \beta)$$

En complexe

$$U(\cos(\omega t + \alpha) + j \sin(\omega t + \alpha)) = U e^{j\omega t} e^{j\alpha}$$

$$I(\cos(\omega t + \beta) + j \sin(\omega t + \beta)) = I e^{j\omega t} e^{j\beta}$$

Phaseurs

$$\underline{U} = U(\cos(\alpha) + j \sin(\alpha)) = U e^{j\alpha}$$

$$\underline{I} = I(\cos(\beta) + j \sin(\beta)) = I e^{j\beta}$$

Norme $|\underline{U}| \equiv U = \sqrt{(\text{Re}\{\underline{U}\})^2 + (\text{Im}\{\underline{U}\})^2}$

Somme de phaseurs (exemple):

$$\underline{U}_1 + \underline{U}_2 = U_1 e^{j\alpha_1} + U_2 e^{j\alpha_2}$$

$$= U_1(\cos \alpha_1 + j \sin \alpha_1) + U_2(\cos \alpha_2 + j \sin \alpha_2)$$

Division de phaseurs (exemple):

$$\frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \frac{U e^{j\alpha}}{I e^{j\beta}} = \frac{U}{I} e^{j(\alpha-\beta)} = \frac{U}{I} e^{j(\varphi)} = Z e^{j(\varphi)}$$

Transformateur

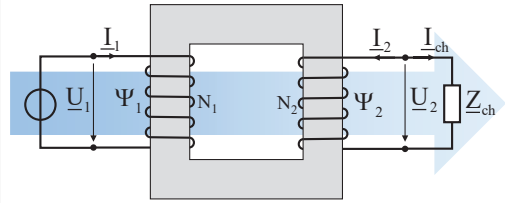
Grandeurs rapportées

Rapport de transformation

$$\ddot{u} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = -\frac{I_2}{I_1}$$

- Tension secondaire rapportée au primaire $U'_2 = \ddot{u} U_2$
- Courant secondaire rapporté au primaire $I'_2 = \frac{1}{\ddot{u}} I_2$
- Impédance secondaire rapportée au primaire $Z'_{ch} = \ddot{u}^2 Z_{ch}$

Transformateur monophasé idéal



Hypothèses :

- Alimentation sinusoïdale (le flux varie sinusoïdalement)
- La perméabilité du circuit magnétique est infinie
 - Pas de flux de fuite
 - Pas de pertes fer
- La résistance des bobines est négligée

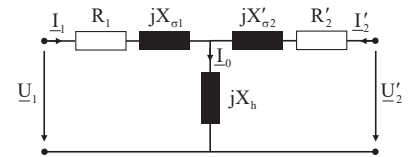
$$S_1 = U_1 I_1^* = \frac{N_1}{N_2} U_2 \left(-\frac{N_2}{N_1} I_2 \right)^* = -U_2 I_2^* = -S_2$$

* = conjugué complexe

Transformateur triphasé

Mais comment fait-on ?

Schéma équivalent par phase

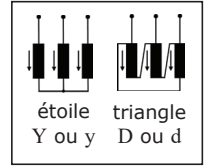


On donne les grandeurs de lignes, donc on adapte la tension et le courant en fonction du couplage.

Exemple : 20 kV / 6.6 kV

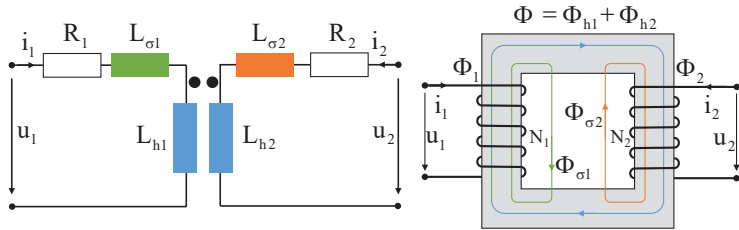
$$Yy \rightarrow \underline{U}_{1ph} = \frac{20}{\sqrt{3}} \text{ kV} \quad \underline{U}_{2ph} = \frac{6.6}{\sqrt{3}} \text{ kV}$$

$$Dy \rightarrow \underline{U}_{1ph} = 20 \text{ kV} \quad \underline{U}_{2ph} = \frac{6.6}{\sqrt{3}} \text{ kV}$$



Montage Dy souvent utilisé entre machine (basse tension, fort courant) et sous-station (haute tension, faible courant)

Transformateur monophasé réel



$$\begin{cases} u_1 = R_1 i_1 + \frac{d\Psi_1}{dt} \\ u_2 = R_2 i_2 + \frac{d\Psi_2}{dt} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Psi_1 = L_{11} i_1 + L_{12} i_2 = (L_{h1} + L_{\sigma 1}) i_1 + L_{12} i_2 \\ \Psi_2 = L_{22} i_2 + L_{21} i_1 = (L_{h2} + L_{\sigma 2}) i_2 + L_{21} i_1 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} L_{\sigma 1} &= N_1^2 \Lambda_{\sigma 1} \\ L_{h1} &= N_1 N_1 \Lambda_h \\ L_{12} = L_{21} &= N_1 N_2 \Lambda_h \\ L_{h2} &= N_2 N_2 \Lambda_h \\ L_{\sigma 2} &= N_2^2 \Lambda_{\sigma 2} \end{aligned}$$

Éléments de base

Couple électromagnétique

- Interaction entre 2 champs magnétiques
- Action d'un champ magnétique sur une structure à réluctance variable

$$T_{em} = k \hat{B}_s \hat{B}_r p \sin \delta$$

↑
nombre de paires de pôles

$$T_{em} = k \hat{B}_s^2 p \sin(2\delta)$$

↑
nombre de paires de pôles

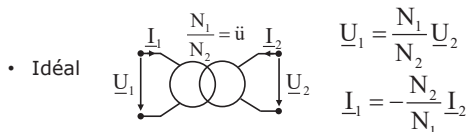
2 conditions :

- Même nombre de pôles (paires de pôles)
- Même vitesse (les champs sont dit synchrones)

2 conditions :

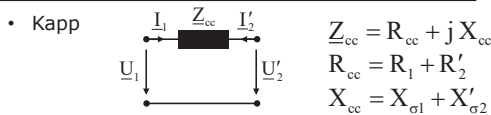
- Même nombre de pièces saillantes que de pôles (ou multiple)
- Même vitesse

Résumé schémas équivalents

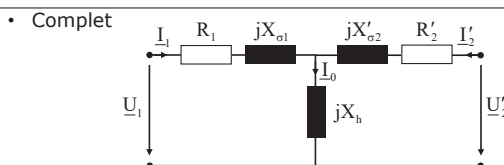


Grandeurs rapportées au primaire

$$\begin{aligned} U'_2 &= \ddot{u} U_2 \\ I'_2 &= \frac{1}{\ddot{u}} I_2 \\ Z'_{ch} &= \ddot{u}^2 Z_{ch} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} Z_{cc} &= R_{cc} + jX_{cc} & I_1 &= -I'_2 \\ R_{cc} &= R_1 + R'_2 & U_1 &= Z_{cc} I_1 + U'_2 \\ X_{cc} &= X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2} & U'_2 &= U_1 - Z_{cc} I_1 \end{aligned}$$



$$\begin{cases} U_1 = R_1 I_1 + jX_h I_1 + jX_{\sigma 1} I_1 + jX_h I'_2 \\ U'_2 = R'_2 I'_2 + jX_h I'_2 + jX'_{\sigma 2} I'_2 + jX_h I_1 \end{cases}$$

Grandeurs relatives - Per Unit - [pu]

- Tension
 - Courant
 - Puissance
 - Couple
 - Impédance
 - ...
- S'affranchir des **vraies grandeurs** physiques en établissant des **grandeurs relatives** à des valeurs de références.
- Les valeurs de références sont habituellement les grandeurs nominales.

Grandeurs nominales = ce pour quoi c'est dimensionné pour un fonctionnement « à vie ». Ne pas confondre avec les grandeurs max !
Données dans le datasheet ou déduisibles de la plaque signalétique.

Exemple pour la tension et le courant au primaire d'un transformateur

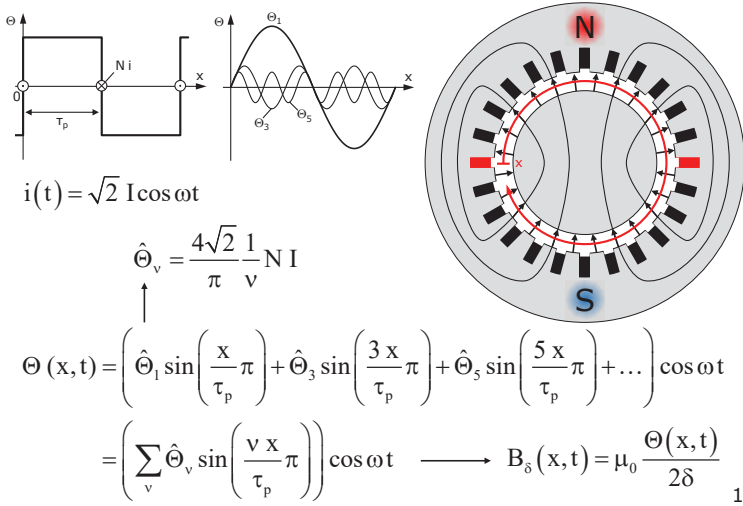
- tension de référence U_{1n} (valeur efficace)
- courant de référence I_{1n} (valeur efficace)

$$u_1 = \frac{U_1}{U_{1n}} \quad i_1 = \frac{I_1}{I_{1n}}$$

$$x[\text{pu}] = \frac{X}{X_n}$$

Les « per unit » [pu] sont notés en minuscule et la valeur est comprise entre 0 et 1 pour un fonctionnement normal.

Champ d'induction dans l'entrefer



12

Champ tournant généré avec du biphasé

Décalé de 90  temporel et géométrique

$$\begin{cases} B_{\delta A}(x, t) = \left(\sum_v \hat{B}_v \sin\left(v \frac{\pi x}{\tau_p}\right) \right) \cos(\omega t) \\ B_{\delta B}(x, t) = \left(\sum_v \hat{B}_v \sin\left(v \left(\frac{\pi x}{\tau_p} \pm \frac{\pi}{2}\right)\right) \right) \cos\left(\omega t \pm \frac{\pi}{2}\right) \end{cases}$$

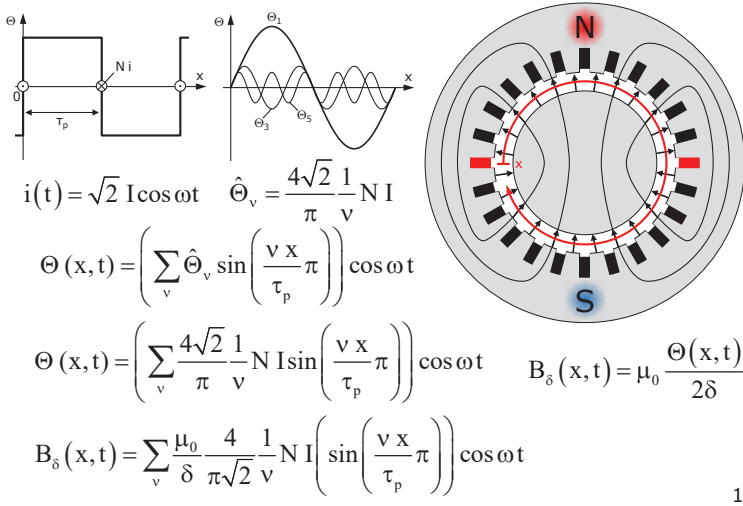
$$B_{\delta t}(x, t) = B_{\delta A}(x, t) + B_{\delta B}(x, t) = \sum \hat{B}_v \sin\left(\frac{v \pi x}{\tau_p} \pm \omega t\right)$$

Triphasé

$$B_{\delta t}(x, t) = B_{\delta A}(x, t) + B_{\delta B}(x, t) + B_{\delta C}(x, t) = \frac{3}{2} \sum_v \hat{B}_v \sin\left(\frac{v \pi x}{\tau_p} \pm \omega t\right)$$

15

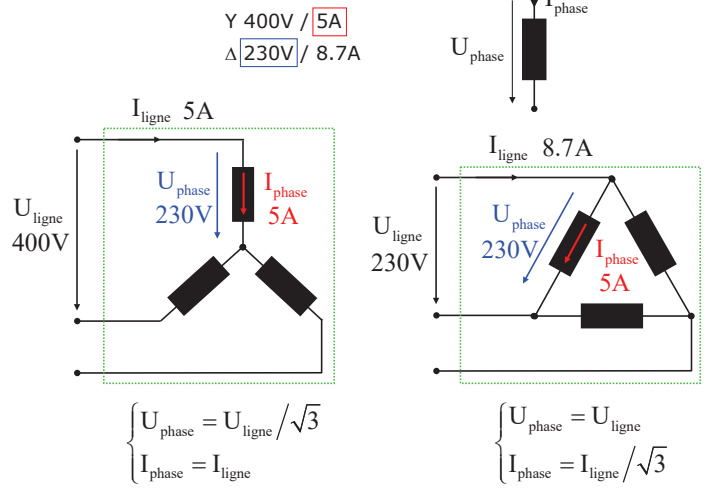
Champ d'induction dans l'entrefer



13

Rappel sur les couplages étoile-triangle

Plaque signalétique triphasée



16

Champ d'induction dans l'entrefer d'un enroulement triphasé

$$\begin{cases} B_{\delta A}(x, t) = \left(\sum_v \hat{B}_v \sin\left(\frac{v \pi x}{\tau_p}\right) \right) \cos(\omega t) \\ B_{\delta B}(x, t) = \left(\sum_v \hat{B}_v \sin\left(v \left(\frac{\pi x}{\tau_p} - \frac{2\pi}{3}\right)\right) \right) \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ B_{\delta C}(x, t) = \left(\sum_v \hat{B}_v \sin\left(v \left(\frac{\pi x}{\tau_p} + \frac{2\pi}{3}\right)\right) \right) \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad \text{avec } \hat{B}_v = \frac{\mu_0}{\delta} \frac{4}{\pi} \frac{1}{v} \frac{N I}{\sqrt{2}}$$

$$B_{\delta t}(x, t) = B_{\delta A}(x, t) + B_{\delta B}(x, t) + B_{\delta C}(x, t) = \frac{3}{2} \sum_v \hat{B}_v \sin\left(\frac{v \pi x}{\tau_p} \pm \omega t\right)$$

1.5 fois plus grand que le fondamental de chaque champ pulsant

14

Vitesses et nombre de pôles

$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$

$\Omega \longrightarrow$ Vitesse angulaire dans le monde mécanique

$\omega \longrightarrow$ Vitesse angulaire dans le monde électrique (appelée pulsation)

nombre de paires de pôles

$$n = \frac{f}{p}$$

Rappel :

- $\Omega \rightarrow [\text{rad/s}] \rightarrow$ Monde mécanique
- $\omega \rightarrow [\text{rad/s}] \rightarrow$ Monde électrique
- $f \rightarrow [\text{Hz}] \rightarrow$ Monde électrique
- $n \rightarrow [\text{tr/s}] \rightarrow$ Monde mécanique
- $N \rightarrow [\text{tr/min}] \rightarrow$ Monde mécanique

17

Machine asynchrone

Glissement

Par définition le glissement est l'écart de vitesse entre le champ tournant statorique et la vitesse mécanique du rotor, rapporté à la vitesse du champ tournant statorique.

Il est noté s et est sans dimension.

$$s = \frac{\Omega_s - \Omega_m}{\Omega_s} = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} = \frac{n_s - n_m}{n_s} = \frac{N_s - N_m}{N_s} = \frac{f_s - f_m}{f_s} [-]$$

\uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow
 [rad/s] [rad/s] [tr/s] [tr/min] [Hz]
 méca. élec. méca. méca. élec.

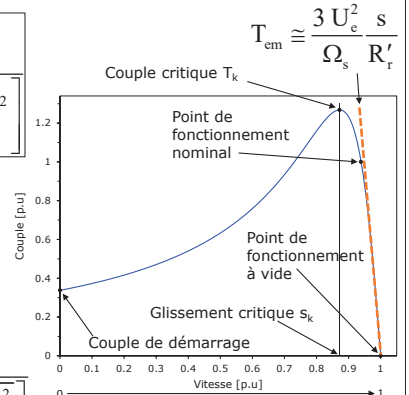
$$n = \frac{f}{p} \leftarrow \text{nombre de paires de pôles}$$

Caractéristique de couple

Indice 'e' pour équivalent de Thévenin

$$\underline{U}_e = \underline{U}_s \frac{jX_h}{R_s + j(X_{os} + X_h)} \quad \underline{Z}_e = jX_h \frac{R_s + jX_{os}}{R_s + j(X_{os} + X_h)} = R_e + jX_e$$

$$T_{cm} = \frac{3 U_e^2 \frac{R'_r}{s}}{\Omega_s \left[\left(R_e + \frac{R'_r}{s} \right)^2 + \left(X_e + X'_{cr} \right)^2 \right]}$$



Couple et glissement critique

$$s_k = \frac{R'_r}{\sqrt{R_e^2 + (X_e + X'_{cr})^2}}$$

$$T_k = \frac{3 U_e^2}{2 \Omega_s \left[R_e + \sqrt{R_e^2 + (X_e + X'_{cr})^2} \right]}$$

Equations de tension

alimentation sinusoïdale

$$\begin{cases} \underline{U}_s = R_s \underline{I}_s + j\omega_s L_{os} \underline{I}_s + j\omega_s L_{hs} \underline{I}_s + j\omega_s L_{sr} \underline{I}_r \\ \underline{U}_r = 0 = R_r \underline{I}_r + j\omega_r L_{or} \underline{I}_r + j\omega_r L_{hr} \underline{I}_r + j\omega_r L_{sr} \underline{I}_s \end{cases}$$

grandeurs rapportées au primaire

$$\ddot{u} = \frac{N_s k_{ws}}{N_r k_{wr}} \longrightarrow \begin{cases} L_{hs} = \ddot{u} L_{sr} \\ L'_{hr} = L_{hs} \end{cases}$$

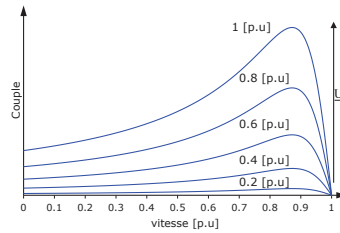
$$\begin{cases} \underline{U}_s = R_s \underline{I}_s + j\omega_s L_{os} \underline{I}_s + j\omega_s L_{hs} \underline{I}_s + j\omega_s L_{sr} \underline{I}_r \\ 0 = R'_r \underline{I}'_r + j\omega_r L'_{or} \underline{I}'_r + j\omega_r L'_{hr} \underline{I}'_r + j\omega_r L_{hs} \underline{I}_s \end{cases}$$

$$\omega_r = s \omega_s \longrightarrow \begin{cases} X_{os} = \omega_s L_{os} \\ X_h = \omega_s L_{hs} \\ X'_{or} = \omega_s L'_{or} \end{cases}$$

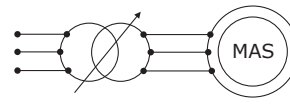
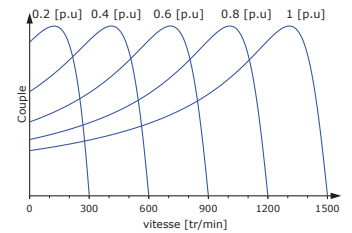
$$\begin{cases} \underline{U}_s = R_s \underline{I}_s + jX_{os} \underline{I}_s + jX_h (\underline{I}_s + \underline{I}'_r) \\ 0 = \frac{R'_r}{s} \underline{I}'_r + jX'_{or} \underline{I}'_r + jX_h (\underline{I}_s + \underline{I}'_r) \end{cases}$$

Alimentation à tension et fréquence variables

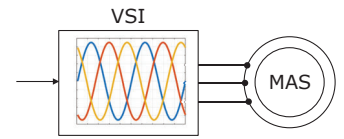
Alimentation à tension variable



Alimentation à U/f constant

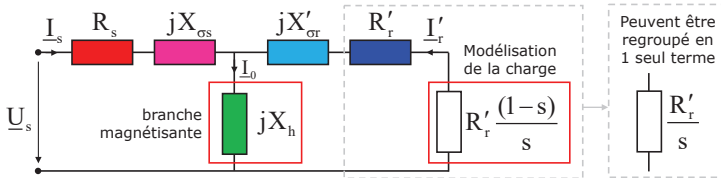


Permet de faire varier U_s en amplitude



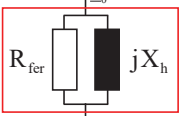
Permet de générer un système triphasé (U_s) variable en amplitude et en fréquence

Schéma équivalent de la machine asynchrone

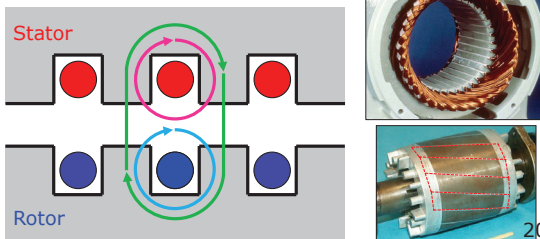


$$\begin{cases} \underline{U}_s = R_s \underline{I}_s + jX_{os} \underline{I}_s + jX_h (\underline{I}_s + \underline{I}'_r) \\ 0 = \frac{R'_r}{s} \underline{I}'_r + jX'_{or} \underline{I}'_r + jX_h (\underline{I}_s + \underline{I}'_r) \end{cases}$$

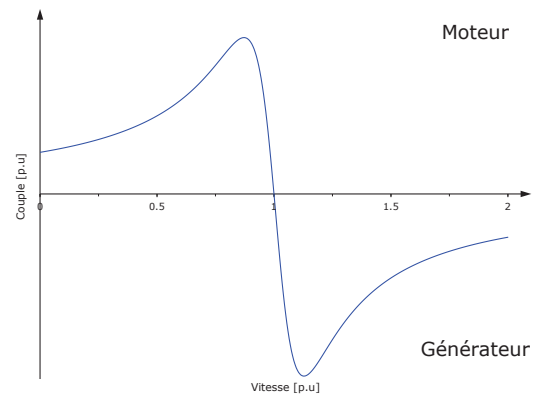
En tenant compte de R_{fer}



branche magnétisante

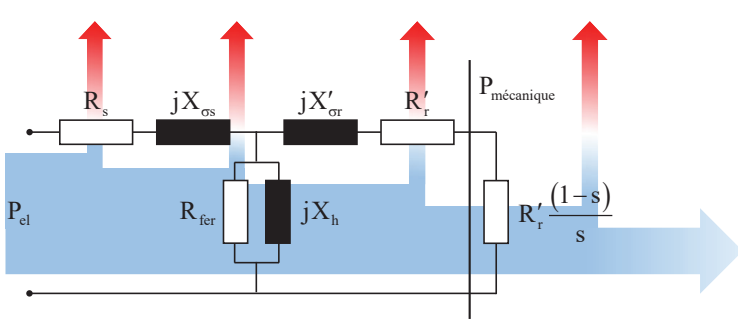


Caractéristique de couple et modes de fonctionnement



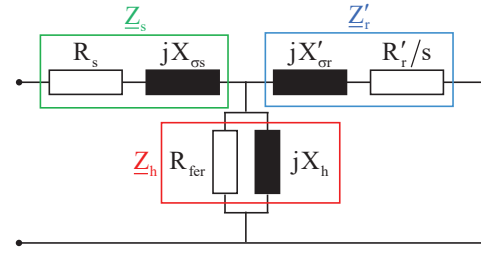
Bilan de puissance – Moteur

$$P_{el} = P_{js} + P_{fer} + P_{jr} + \overbrace{P_{f+v} + P_{utile}}^{P_{m\acute{e}canique}}$$



24

Impédance équivalente



$$\underline{Z}_{eq} = \underline{Z}_s + \frac{\underline{Z}_h \underline{Z}'_r}{\underline{Z}_h + \underline{Z}'_r}$$

$$\underline{Z}_s = R_s + jX_{os}$$

$$\underline{Z}'_r = \frac{R'_r}{s} + jX'_{or}$$

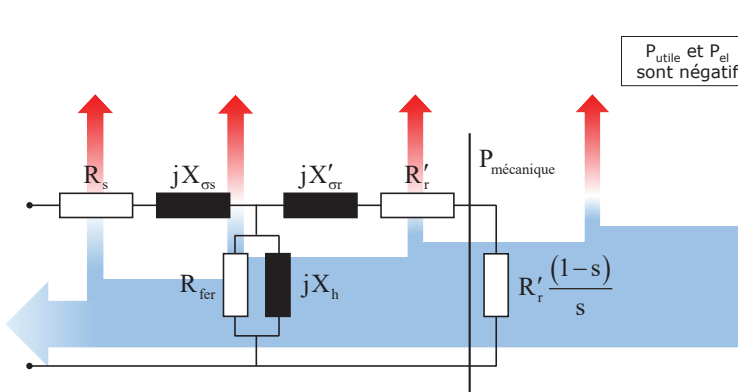
$$\underline{Z}_h = jX_h \rightarrow R_{fer} \gg X_h$$

$$\underline{Z}_{eq} = R_s + jX_{os} + \frac{jX_h \left(\frac{R'_r}{s} + jX'_{or} \right)}{jX_h + \left(\frac{R'_r}{s} + jX'_{or} \right)}$$

27

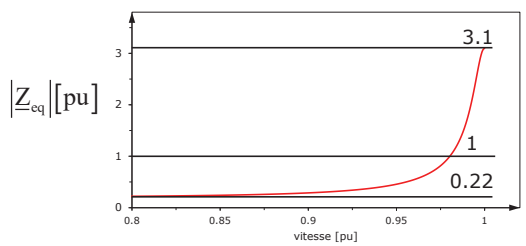
Bilan de puissance – Génératrice

$$P_{el} = P_{js} + P_{fer} + P_{jr} + \overbrace{P_{f+v} + P_{utile}}^{P_{m\acute{e}canique}}$$



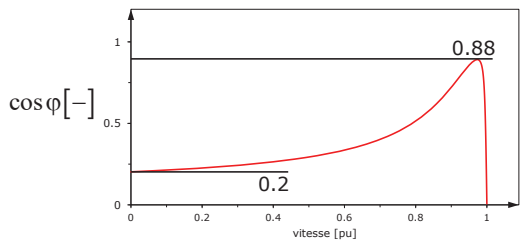
25

Impédance équivalente en fonction du glissement



$$\frac{1}{3.1} \cong 0.33$$

$$\frac{1}{0.22} \cong 4.5$$



consomme du réactif !

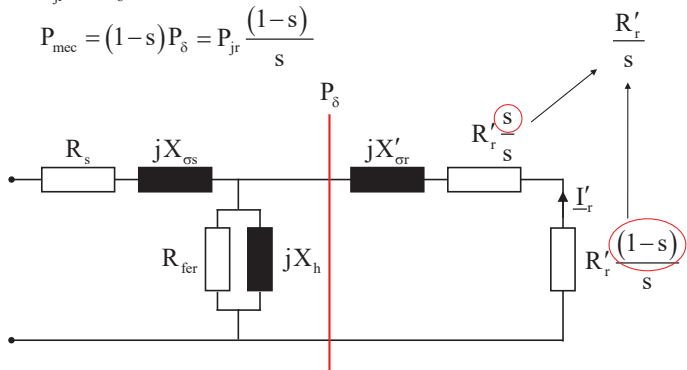
28

Puissance d'entrefer

$$P_{\delta} = P_{el} - P_{js} - P_{fer} = P_{mec} + P_{jr} = 3 \frac{R'_r}{s} I_r'^2$$

$$P_{jr} = s P_{\delta}$$

$$P_{mec} = (1-s) P_{\delta} = P_{jr} \frac{(1-s)}{s}$$

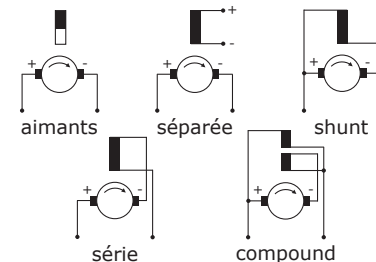


26

Machine à courant continu

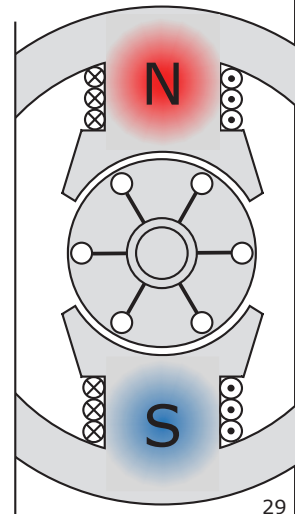
Différents types d'excitation

- Aimants permanents
- Electrique
 - Séparée
 - Shunt (parallèle)
 - Série
 - Compound (hyper ou hypo)



Pour l'excitation :

$$u_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \xrightarrow{\text{régime permanent}} U_f = R_f I_f$$



29

Tension induite de mouvement

$$u_i = \frac{d\Psi}{dt} = N \frac{d\Phi}{dt} \text{ avec } \Phi = \sum \hat{\Phi}_v \sin \omega_v t$$

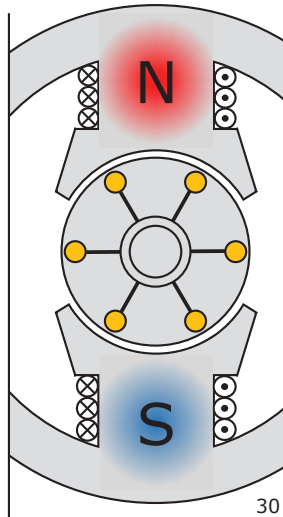
$$U_{i-} = \frac{1}{\sqrt{2}} N \omega \hat{\Phi} = \sqrt{2} \pi N f \hat{\Phi}$$

$$U_{i=} = \sqrt{2} U_{i-} = \sqrt{2} \sqrt{2} \pi N f \hat{\Phi} = 2\pi N f \hat{\Phi}$$

$$\Omega = \frac{2\pi f}{p} \text{ [rad/s]}$$

$$U_i = 2\pi N \frac{\Omega p}{2\pi} \hat{\Phi} = N \Omega p \hat{\Phi}$$

→ $U_i = k_\phi \Omega$ la tension induite est proportionnelle à la vitesse de rotation
 $k_\phi = k_{if} I_f$ et au courant d'excitation

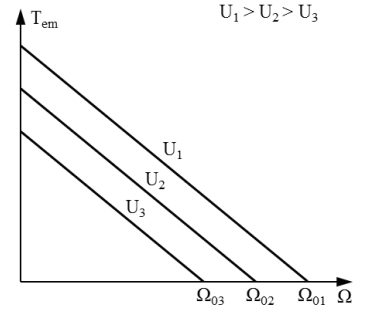
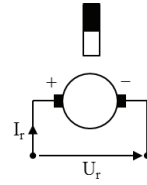


30

Moteur à aimants permanents

$$U_r = R_r I_r + k_\phi \Omega$$

$$T_{em} = k_\phi I_r$$



33

Equation de tension et schéma équivalent

$$u_r = R_r i_r + \frac{d\Psi}{dt}$$

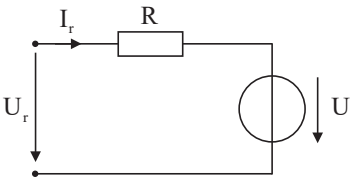
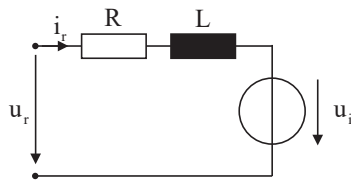
$$\frac{d\Psi}{dt} = L_r \frac{di_r}{dt} + u_i$$

$$u_r = R_r i_r + L_r \frac{di_r}{dt} + u_i$$

régime permanent → $U_r = R_r I_r + U_i = R_r I_r + k_\phi \Omega$

$$U_i = k_\phi \Omega = k_{if} I_f \Omega$$

$$U_r = R_r I_r + k_{if} I_f \Omega$$



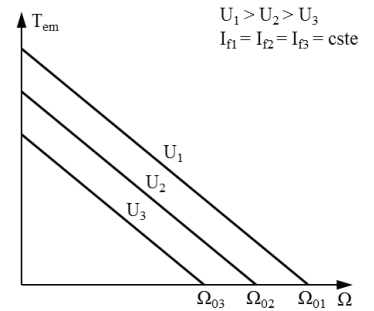
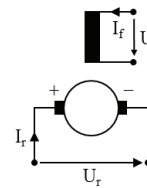
31

Moteur à excitation séparée

$$U_f = R_f I_f$$

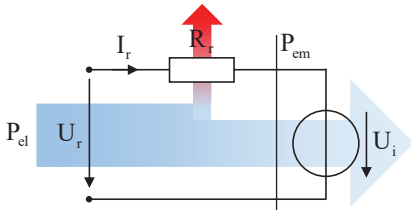
$$U_r = R_r I_r + k_{if} I_f \Omega$$

$$T_{em} = k_{if} I_f I_r$$



34

Bilan de puissance et modes de fonctionnement



$$P_{el} = P_j + P_{em}$$

$$P_{el} = U_r I_r$$

$$P_j = R_r I_r^2$$

$$P_{em} = U_i I_r = \Omega T_{em} = P_{mec}$$

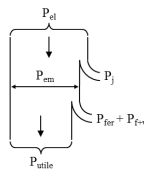
Moteur

$$P_{el} = R_r I_r^2 + P_{em}$$

$$U_r = R_r I_r + U_i$$

$$P_{el} > 0 \quad I_r > 0$$

$$T_{em} > 0 \quad U_r > U_i$$



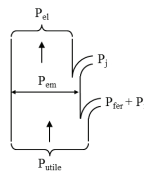
Génératrice

$$P_{el} = R_r I_r^2 + P_{em}$$

$$U_r = R_r I_r + U_i$$

$$P_{el} < 0 \quad I_r < 0$$

$$T_{em} < 0 \quad U_r < U_i$$



32

Moteur à excitation shunt (parallèle)

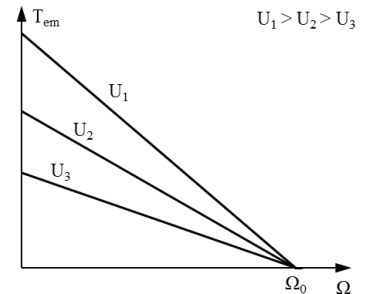
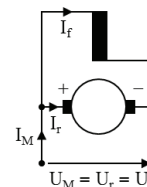
$$U_f = R_f I_f$$

$$U_r = R_r I_r + k_{if} I_f \Omega$$

$$T_{em} = k_{if} I_f I_r$$

$$U_M = U_r = U_f$$

$$I_M = I_r + I_f$$



35

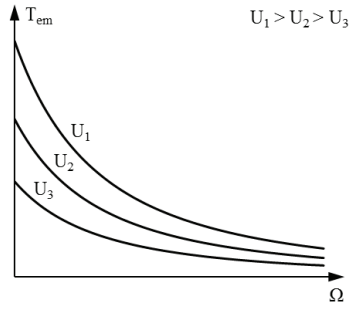
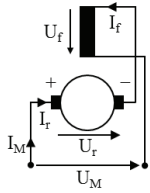
Moteur à excitation série

$$U_M = (R_f + R_r) I_M + k_{if} I_M \Omega$$

$$T_{em} = k_{if} I_M^2$$

$$U_M = U_r + U_f$$

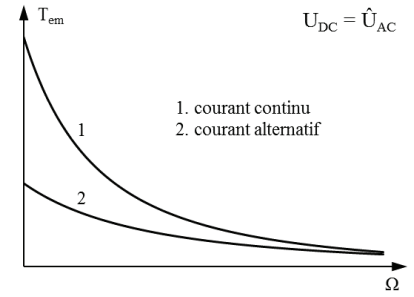
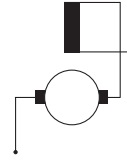
$$I_M = I_r = I_f$$



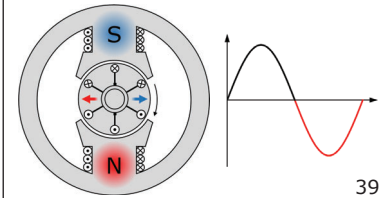
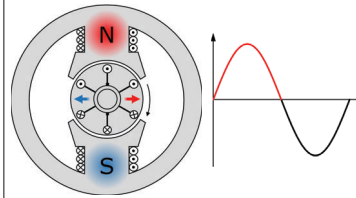
36

Moteur universel

$$U_{DC} = \hat{U}_{AC}$$



1. courant continu
2. courant alternatif



39

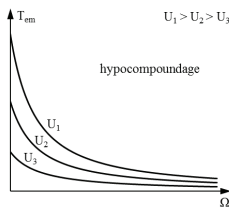
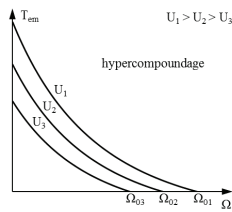
Moteur à excitation compound

$$U_M = U_f = R_f I_f$$

$$U_M = U_r + U_s = (R_r + R_s) I_r + (k_{is} I_r + k_{if} I_f) \Omega$$

$$T_{em} = k_{if} I_f I_r + k_{is} I_M^2$$

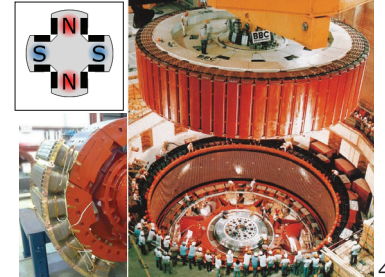
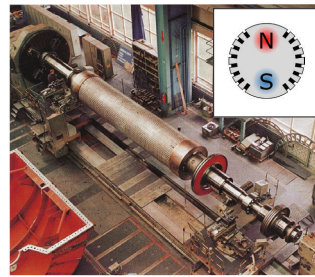
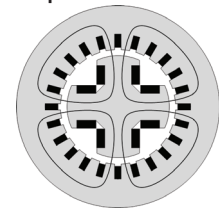
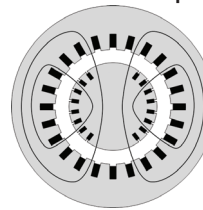
$$I_M = I_r + I_f$$



37

Machine synchrone

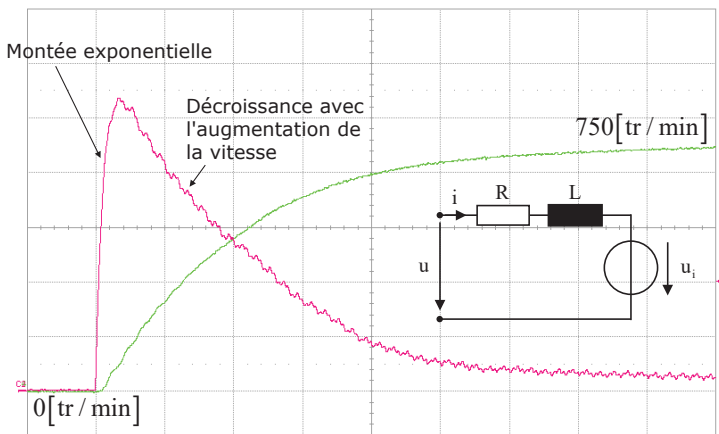
Machines à pôles lisses et à pôles saillants



40

Démarrage d'un moteur à courant continu 1.8 kW

Démarrage à demi tension 100V (750 tr/min à vide)



38

Tension induite de mouvement

$$u_i = \frac{d\Psi}{dt} = N \frac{d\Phi}{dt} \quad \Phi = \sum \hat{\Phi}_v \sin \omega_v t$$

$$U_i = \frac{1}{\sqrt{2}} N \omega \hat{\Phi} = \sqrt{2} \pi N f \hat{\Phi} \cong 4.44 N f \hat{\Phi}$$

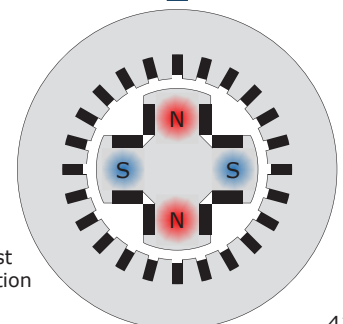
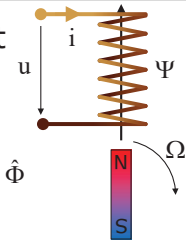
$$\Omega = \frac{\omega}{p} = \frac{2\pi f}{p} \text{ [rad/s]}$$

$$U_i = \sqrt{2} \pi N \frac{\Omega p}{2\pi} \hat{\Phi} = N \Omega p \frac{\hat{\Phi}}{\sqrt{2}}$$

$$= N \Omega p \Phi = k_\Phi \Omega = k_{if} I_f \Omega$$

$$U_i = k_\Phi \Omega = k_{if} I_f \Omega$$

la tension induite de mouvement est proportionnelle à la vitesse de rotation et au courant d'excitation



41

Equation de tension et schéma équivalent

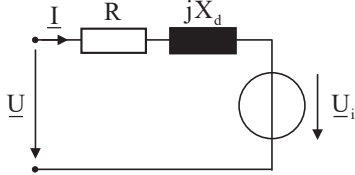
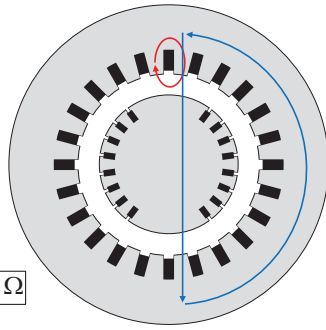
$$u = R i + \frac{d\Psi}{dt}$$

$$\frac{d\Psi}{dt} = L \frac{di}{dt} + u_i$$

$$\underline{U} = R \underline{I} + jX_d \underline{I} + \underline{U}_i$$

$$X_d = X_\sigma + X_h$$

$$\underline{U}_i = k_\phi \Omega = k_{lf} I_f \Omega$$



dans la moyenne et grande puissance R est souvent négligé $R \ll X_d$

42

Couple électromagnétique

$$\underline{U} = jX_d \underline{I} + \underline{U}_i \xrightarrow{\text{On choisi } \alpha = 0} U = jX_d I + U_i$$

$$\overline{AB} = X_d I \cos \varphi = U_i \sin \delta$$

$$U = jX_d I (\cos \varphi - j \sin \varphi) + U_i (\cos \delta - j \sin \delta)$$

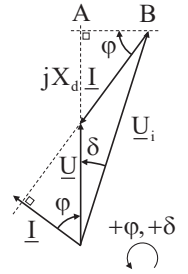
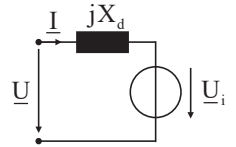
$$U = X_d I (\sin \varphi + j \cos \varphi) + U_i (\cos \delta - j \sin \delta)$$

les parties imaginaires doivent s'annuler car U est réel

$$X_d I \cos \varphi = U_i \sin \delta \rightarrow I \cos \varphi = \frac{U_i}{X_d} \sin \delta$$

$$P_{em} = T_{em} \Omega_s = 3 U I \cos \varphi = 3 \frac{U U_i}{X_d} \sin \delta$$

$$T_{em} = 3 \frac{U U_i}{2 \pi n_s X_d} \sin \delta \rightarrow T_k = 3 \frac{U U_i}{2 \pi n_s X_d}$$



45

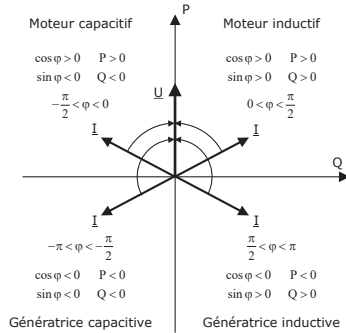
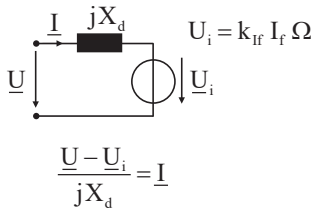
Puissances triphasées

Puissance apparente complexe $\underline{S} = 3 \underline{U}_{ph} \underline{I}_{ph}^*$ [VA]

Puissance apparente $S = 3 U_{ph} I_{ph} = \sqrt{3} U_{ligne} I_{ligne} = \sqrt{P^2 + Q^2}$ [VA]

Puissance active $P = 3 U_{ph} I_{ph} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{ligne} I_{ligne} \cos \varphi$ [W]

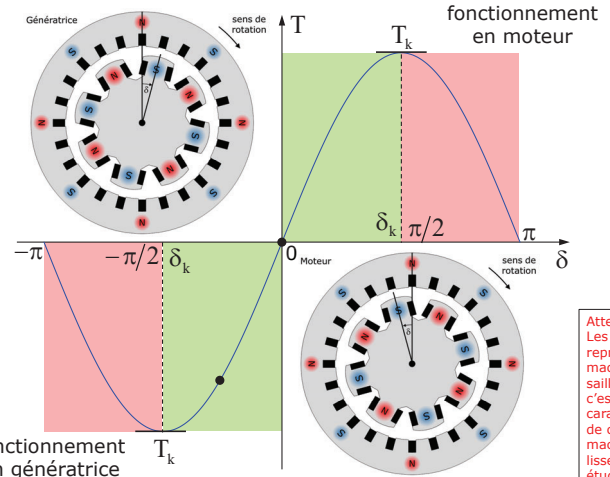
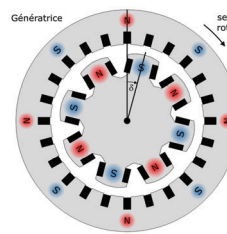
Puissance réactive $Q = 3 U_{ph} I_{ph} \sin \varphi = \sqrt{3} U_{ligne} I_{ligne} \sin \varphi$ [VAR]



43

Caractéristique de couple

$$T_{em} = 3 \frac{U U_i}{2 \pi n_s X_d} \sin \delta \quad T_{em} = k \hat{B}_s \hat{B}_r p \sin \delta$$



Attention : Les images représentent des machines à pôles saillants mais c'est bien la caractéristique de couple d'une machine à pôles lisses qui est étudiée ici.

46

Bilan de puissance et Couple électromagnétique

$$P_{el} = P_j + P_{em}$$

$$P_j = 3 R I^2$$

$$P_{em} = T_{em} \Omega_s$$

$$P_{el} = 3 U I \cos \varphi$$

φ déphasage entre \underline{U} et \underline{I}

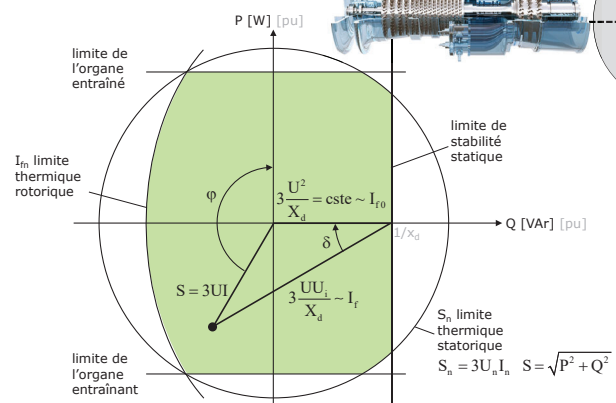
$$P_{em} = \Omega_s T_{em} = P_{el} - P_j = 3 U I \cos \varphi - 3 R I^2$$

$$T_{em} = (3 U I \cos \varphi - 3 R I^2) \frac{1}{2 \pi n_s} \xrightarrow{R \ll X_d} T_{em} = \frac{3 U I \cos \varphi}{2 \pi n_s}$$

44

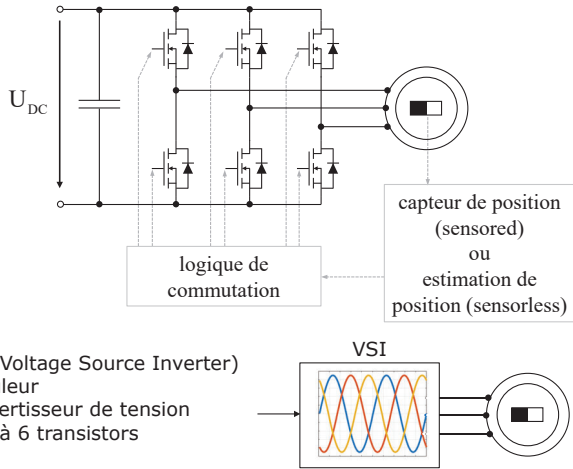
Le topogramme (diagramme des puissances)

Machine à pôles lisses (rotor cylindrique)



47

Moteur synchrone à aimants permanents



- VSI (Voltage Source Inverter)
- Onduleur
- Convertisseur de tension
- Pont à 6 transistors

49

Bilan de puissance et Couple électromagnétique

$$P_{el} = P_j + P_{em} = 3 U_i I \cos \varphi$$

$$P_j = 3 R I^2$$

$$P_{em} = \Omega_s T_{em} = 3 U_i I \cos \Psi$$

$\varphi \rightarrow$ déphasage entre \underline{U} et \underline{I}

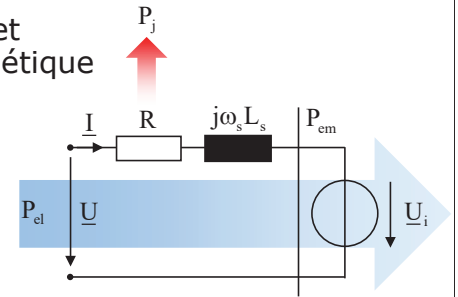
$\Psi \rightarrow$ déphasage entre \underline{U}_i et \underline{I}

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{3}{\Omega} U_i I \cos \Psi = \frac{3}{\Omega} k_\phi \Omega I \cos \Psi = 3 k_\phi I \cos \Psi$$

$$U_i = k_\phi \Omega$$

$\rightarrow T_{em} = 3 k_\phi I$ le couple est proportionnel au courant

$\cos \Psi = 1 (\Psi = 0)$
courant en phase avec la tension induite



52

Tension induite de mouvement

$$u_i = \frac{d\Psi}{dt} = N \frac{d\Phi}{dt} \quad \Phi = \sum \hat{\Phi}_v \sin \omega_v t$$

$$U_i = \frac{1}{\sqrt{2}} N \omega \hat{\Phi} = \sqrt{2} \pi N f \hat{\Phi} \cong 4.44 N f \hat{\Phi}$$

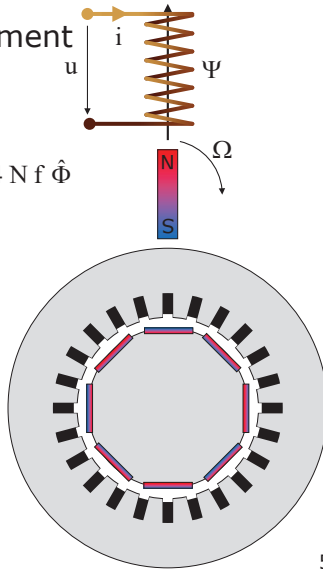
$$\Omega = \frac{2\pi f}{p} [\text{rad/s}]$$

$$U_i = \sqrt{2} \pi N \frac{\Omega p}{2\pi} \hat{\Phi} = N \Omega p \frac{\hat{\Phi}}{\sqrt{2}}$$

$$= N \Omega p \Phi$$

$$\rightarrow U_i = k_\phi \Omega$$

la tension induite est proportionnelle à la vitesse de rotation



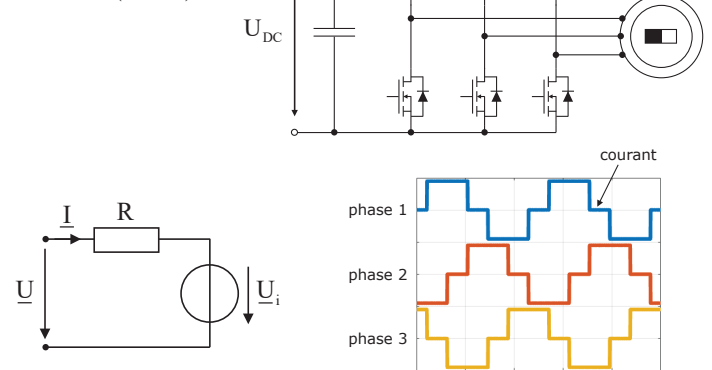
50

Courant en phase avec la tension induite

Commutation par blocs à 120°

$$T_{em} = k_{T_{em}} I \cos \Psi$$

$$\cos \Psi = 1 (\Psi = 0)$$



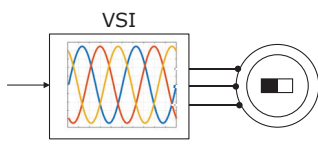
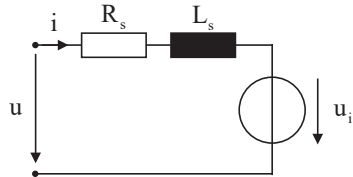
53

Equation de tension et schéma équivalent

$$u_1 = R_s i_1 + \frac{d\Psi_1}{dt}$$

$$\frac{d\Psi_1}{dt} = L_s \frac{di_1}{dt} + u_{i1}$$

$$u_1 = R_s i_1 + L_s \frac{di_1}{dt} + u_{i1}$$



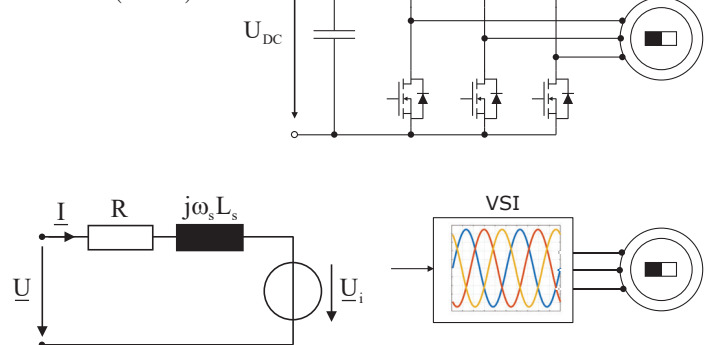
51

Courant en phase avec la tension induite

Alimentation sinusoïdale

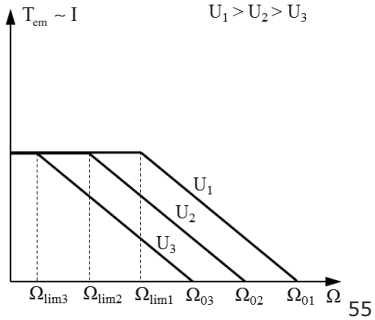
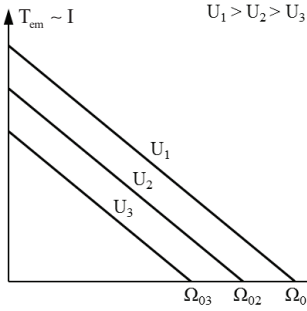
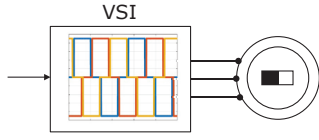
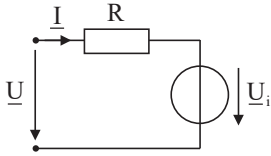
$$T_{em} = 3 k_\phi I \cos \Psi$$

$$\cos \Psi = 1 (\Psi = 0)$$

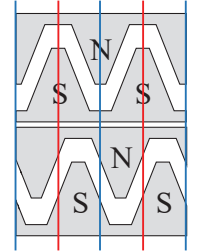
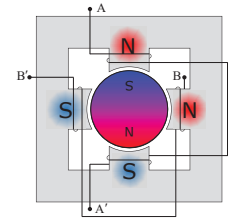
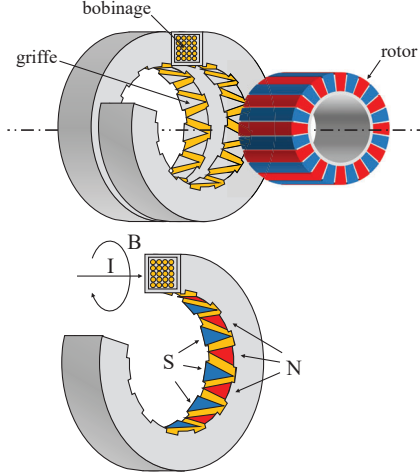


54

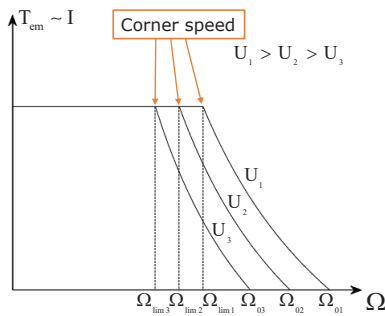
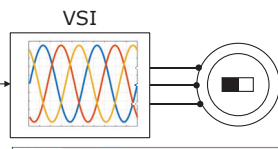
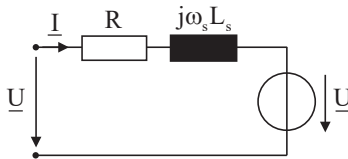
Caractéristique de couple Commutation par blocs à 120° (BLDC)



Moteur électromagnétique Moteur à griffes

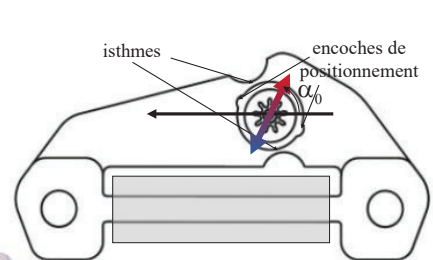
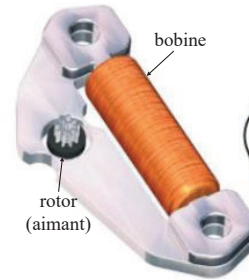


Caractéristique de couple Alimentation sinus (PMSM)



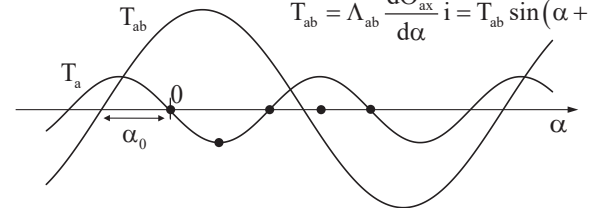
BRUSA	
Technical data	
Model	DMC544
Power	315 kW
Current	600 A
Speed	1500 rpm
Efficiency	95%
Weight	10 kg
DMC544	
315 kW - 200 kWh, 600 A	
Technical data	
Max. power	315 kW
Continuous power	160 kW
Max. current	600 A
Max. torque	450 Nm
Max. speed	1500 rpm
Max. input voltage	200 V
Max. output voltage	200 V
Efficiency	95%
Weight	10 kg

Moteur Lavet



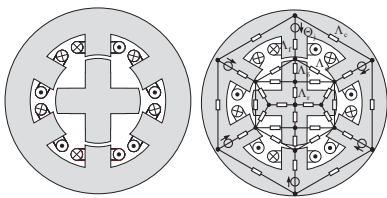
$$T_a = \frac{1}{2} \frac{d\Lambda_a}{d\alpha} \Theta_a^2 = \hat{T}_a \sin(2\alpha)$$

$$T_{ab} = \Lambda_{ab} \frac{d\Theta_{ax}}{d\alpha} i = \hat{T}_{ab} \sin(\alpha + \alpha_0)$$

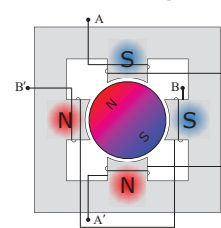


Moteur pas à pas

Moteur réluctant



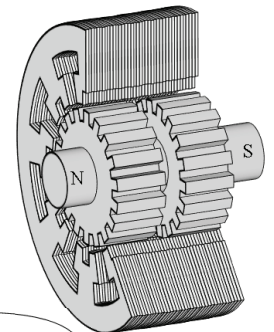
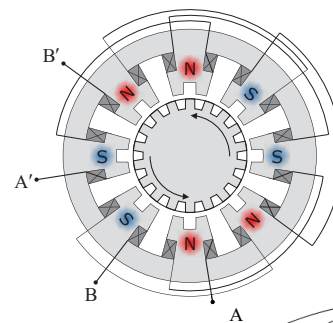
Moteur électromagnétique



- Nombre de phases le plus fréquent : 3, 4, 8
- Nombre de pas par tour habituellement : 12 - 72

- Habituellement biphase
- Nombre de pas par tour habituellement faible : 2 - 24
- Rendement élevé

Moteur réluctant polarisé



- Utilisé pour un nombre de pas par tour élevé : 24 - 400
- Rendement habituellement bon

Technique de mesure - Circuit RL - La BlueBox

Ce TP a pour but de vous faire utiliser les principaux appareils de mesures utilisés en électrotechnique et machines électriques : Voltmètre, Ampèremètre, Ohmmètre, Oscilloscope, ...

L'étude porte sur une résistance et sur un dipôle composé d'une résistance et d'une inductance placés en série, permettant d'introduire les phénomènes de base rencontrés dans les enroulements des machines électriques.



A savoir

Une case blanche doit être remplie par vous

Une case jaune est le résultat d'un calcul

Une case verte est la copie d'une case remplie ou calculée précédemment

Module	Résistance [Ω]	Self	
		Inductance [H]	Résistance [Ω]
RL01	470	0.95	10
RL02	470	1.3	12
RL03	470	1.6	13
RL04	470	1.8	15
RL05	820	1	10
RL06	820	1.2	12
RL07	820	1.5	13
RL08	820	1.9	15
RL09	560	1	11
RL10	560	1.3	13
RL11	560	1.6	15
RL12	560	2	17
RL13	680	1.1	10
RL14	680	1.3	12
RL15	680	1.6	14
RL16	680	1.9	16
RL17	270	2.14	53
RL18	390	1.5	38
RL19	470	0.76	24
RL20	330	0.675	24

Générateur de signaux : Signal SINUS de 2 Hz et de 2 Vp-p (sans offset).

Afficher deux fois le même signal du générateur de fonctions (MAIN OUT 50 Ohm) sur les canaux 1 et 2 (jaune et rose) de l'oscilloscope, à l'aide d'un "T" (qui se trouve dans les tiroirs blancs) et de 2 câbles BNC (sur le ratelier à câbles). Assurez-vous que vous avez un couplage DC 1M Ohm.

* Manipuler les boutons afin d'afficher les deux signaux à l'écran, les répartir dans chaque moitié d'écran. Afficher un nombre utile de périodes et adapter l'amplitude afin d'obtenir la meilleure dynamique sans que les signaux se superposent.

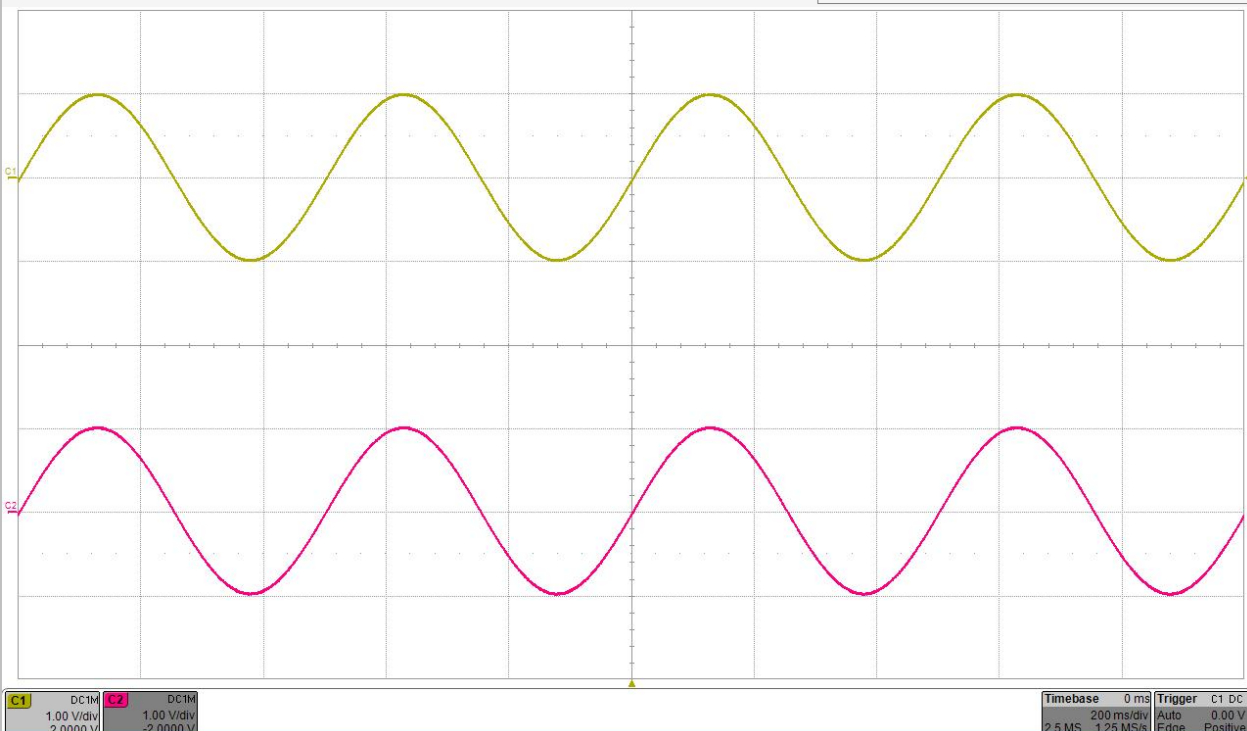
* Comparer l'effet des boutons "offset" de l'oscilloscope et du générateur de signaux. Où se trouve le zéro du signal sur l'écran ?

Commentaires/Explications

Apprendre à utiliser l'oscilloscope et se familiariser avec.

On comprend la différence entre offset d'affichage et offset réel du signal, car ici on affiche 2x le même signal mais leur 0 (zéro) de référence n'est pas au même endroit (Trait C1 jaune et trait C2 Magneta, à gauche de l'affichage).

On apprend à lire les échelles le nombre de V/div (volts par division) et de ms/div (millisecondes par division).



Introduction - Datasheet L'oscilloscope Circuit R Circuit RL

Fonctionnement de base de l'oscilloscope Mesures à l'oscilloscope Couplage AC/DC

Générateur de signaux : Signal SINUS de 2 Hz et de 2 Vp-p (sans offset).

Afficher deux fois le même signal du générateur de fonctions (MAIN OUT 50 Ohm) sur les canaux 1 et 2 (jaune et rose) de l'oscilloscope, à l'aide d'un "T" (qui se trouve dans les tiroirs blancs) et de 2 câbles BNC (sur le ratelier à câbles). Assurez-vous que vous avez un couplage DC 1MOhm.

* Manipuler les boutons afin d'afficher les deux signaux à l'écran, les répartir dans chaque moitié d'écran. Afficher un nombre utile de périodes et adapter l'amplitude afin d'obtenir la meilleure dynamique sans que les signaux se superposent.

* Comparer l'effet des boutons "offset" de l'oscilloscope et du générateur de signaux. Où se trouve le zéro du signal sur l'écran ?

Commentaires/Explications

Apprendre à utiliser l'oscilloscope et se familiariser avec.

On comprend la différence entre offset d'affichage et offset réel du signal, car ici on affiche 2x le même signal mais leur 0 (zéro) de référence n'est pas au même endroit (Trait C1 jaune et trait C2 Magneta, à gauche de l'affichage).

On apprend à lire les échelles le nombre de V/div (volts par division) et de ms/div (millisecondes par division).

C1	DC1M	C2	DC1M
1.00 V/div	1.00 V/div	1.00 V/div	1.00 V/div
2.0000 V	-2.0000 V		

Timebase	0 ms	Trigger	C1 DC
	200 ms/div	Auto	0.00 V
	2.5 MS	Edge	Positive

Introduction - Datasheet L'oscilloscope Circuit R Circuit RL

Fonctionnement de base de l'oscilloscope Mesures à l'oscilloscope Couplage AC/DC

Signal CARRE de 2kHz et 2 Vp-p, AVEC un offset de 1 V sur le générateur de signaux. Configurer le canal 1 en DC à 1 MOhm et le canal 2 en AC à 1 MOhm.

Changer la fréquence du signal, 2kHz, 200Hz, 20Hz et 2Hz, tout en adaptant à chaque fois l'échelle horizontale.

Expliquer les différences.

Conseil : Faire l'acquisition avec le signal à 2 Hz.

Commentaires/Explications

En mode AC l'oscilloscope cherche à enlever la composante du signal mesuré, en appliquant un filtre, dont la valeur est soustraite au signal. Si le signal mesure à une période de l'ordre de grandeur des constantes de temps du filtre (ou inférieur comme représenté ici), alors le signal mesuré et réel peuvent différer fortement.

C1	DC1M	C2	AC1M
1.00 V/div	1.00 V/div	1.00 V/div	1.00 V/div
0.0 mV ofst	0.0 mV ofst		

Timebase	0 ms	Trigger	C1 DC
	200 ms/div	Auto	0.00 V
	5 MS	Edge	Positive

Measure value status

P1:pkpk(C1)	2.026 V	P2:rms(C1)	984.3 mV	P3:period(C1)	500.001201 ms	P4:freq(C1)	1.99999520 Hz	P5:---	P6:---	P7:---	P8:---
-------------	---------	------------	----------	---------------	---------------	-------------	---------------	--------	--------	--------	--------

Circuit R



Résistance

R écrit sur la résistance ou donné dans la datasheet

R = 680 [Ohm]

R mesurée avec un Ohmmètre

R = 660 [Ohm]

Résistance mesurée avec la loi d'Ohm

Les variables possibles sont : U, R, I

Loi d'Ohm

$U = R \cdot I$

A l'aide de la source de tension alimentez la résistance et mesurez le courant et la tension à l'aide de multimètres.

N'enclenchez pas la source avant d'avoir fait vérifier votre câblage.

Pour voir comment câbler, cocher cette case. Mais peut-être est-ce mieux d'essayer par vous même d'abord.

Afficher le câblage

U mesuré R calculé selon la loi d'Ohm $R = U/I$

U = 7 [V] R = 661.0 [Ohm]

I mesuré

I = 0.01059 [A]

Puissances

Les variables possibles sont : U, R, I

Puissance (1) - f(U,R)

$P = U^2/R$

Puissance (2) - f(I,R)

$P = R \cdot I^2$

Puissance (3) - f(U,I)

$P = U \cdot I$

Pour une mesure en sinus

Relation liant U crête et U efficace

Les variables possibles sont : Ueff, U moy

Ueff = U efficace

U moy = U moyen

Les fonctions possibles sont : sqrt()

U crête = $\sqrt{2} \cdot U_{eff}$

Valeur numérique de U moyen

U moy = 0 [V]

Que mesure un voltmètre ?

La valeur moyenne

La valeur de crête

La valeur efficace

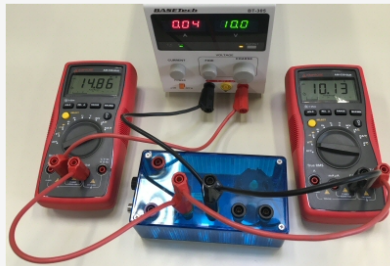
Commentaires/Explications

C'est le module RL14 qui a été utilisé ici (voir datasheet).

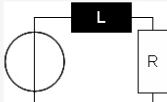
Nous avons eu la discussion sur les valeurs RMS et donc un voltmètre mesure bien des valeurs efficaces.

Pour rappel, une valeur efficace s'écrit en majuscule, comme pour du DC, car elle correspond à "l'équivalent" en alternatif de la même puissance dissipée par exemple dans une résistance. Ainsi, comme nos équations sont basées sur la conservation de la puissance l'appareil de mesure affiche les valeurs à mettre dans les équations (RMS).

Attention donc si on mesure visuelle une grandeur avec un oscilloscope à ne pas se tromper entre valeur de crête et efficace (RMS).



Circuit RL



Courant dans le dipôle pour un saut de tension de 7V

Puissances

Soit le dipôle formé d'une résistance R et d'une inductance L placés en série, auquel on applique un saut de tension U (7V).

Les variables possibles sont : U, R, L, i, t, di, dt, Tau

Les fonctions possibles sont : exp()

Equation différentielle

$u(t) = R \cdot i + L \cdot di/dt$

Constante de temps Tau

$\tau = L/R$

Solution de l'équation différentielle

$i(t) = (U/R) \cdot (1 - \exp(-t/\tau))$

Valeurs de R et L du datasheet

R = 680 [Ohm] L = 1.3 [H]

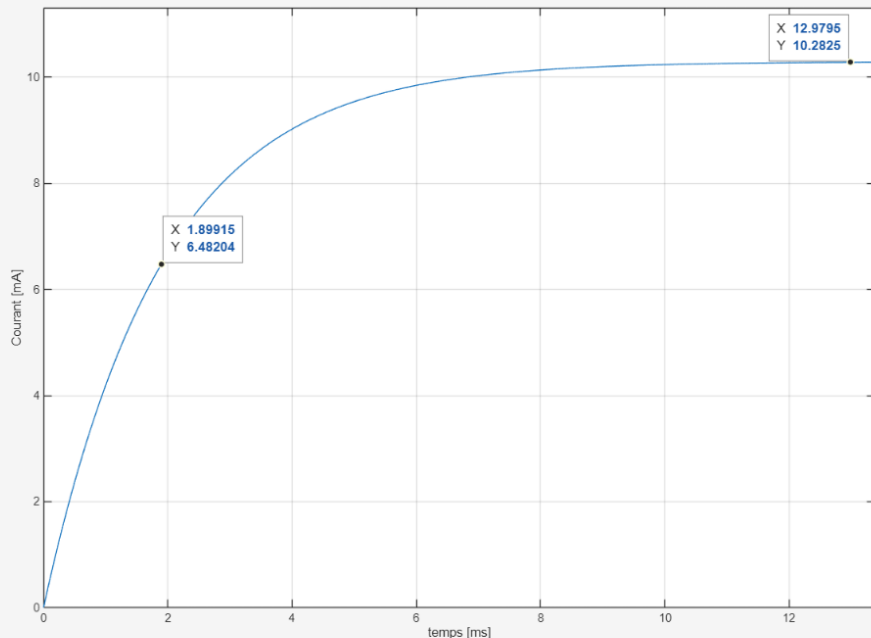
Commentaires/Explications

C'est le module RL14 qui a été utilisé ici (voir datasheet).

Méthode des 63%

$10.28 \cdot 0.63 = 6.48$

Point à 6.48204 et 1.89915 donc à 1.9 ms



Courant permanent et constante de temps

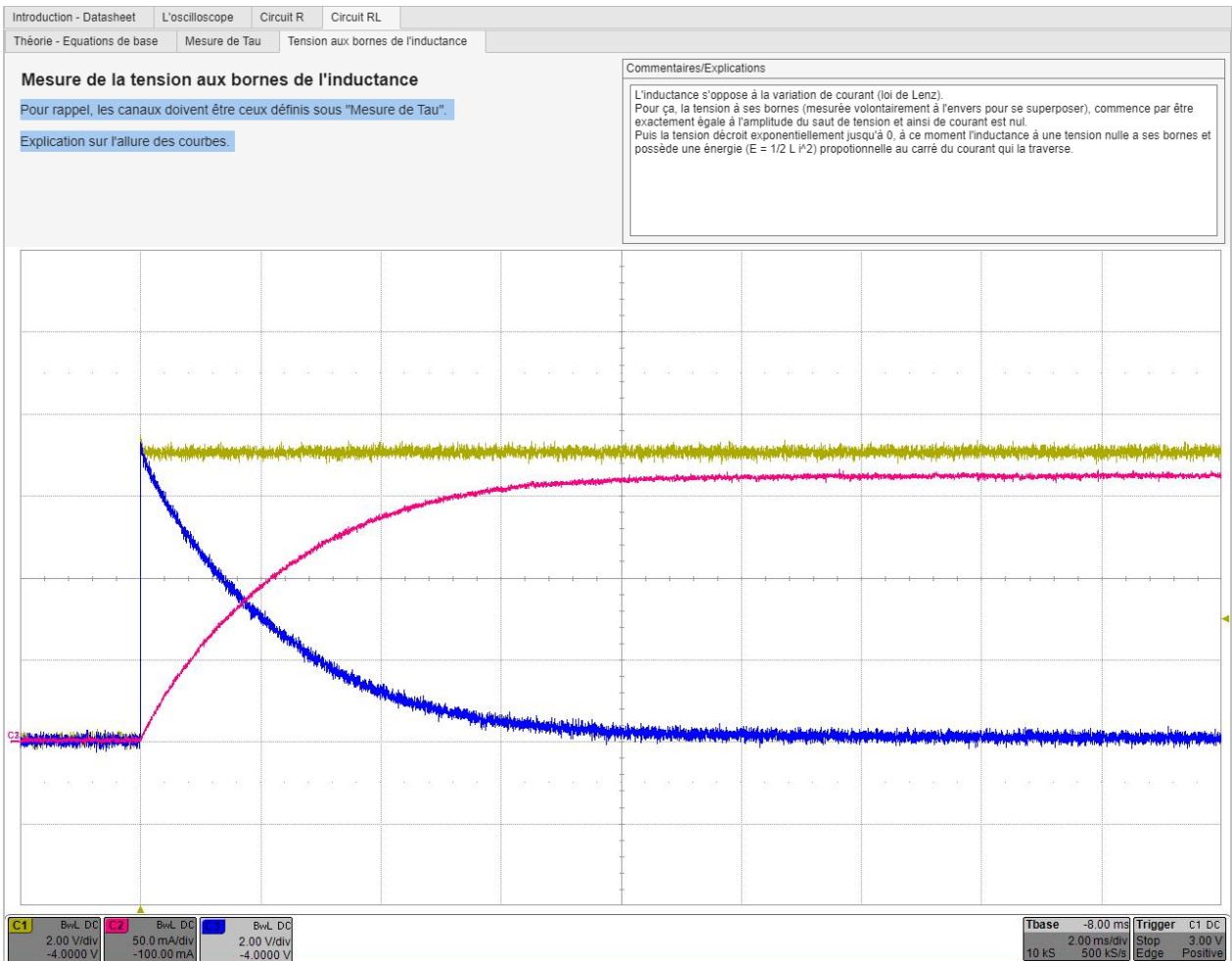
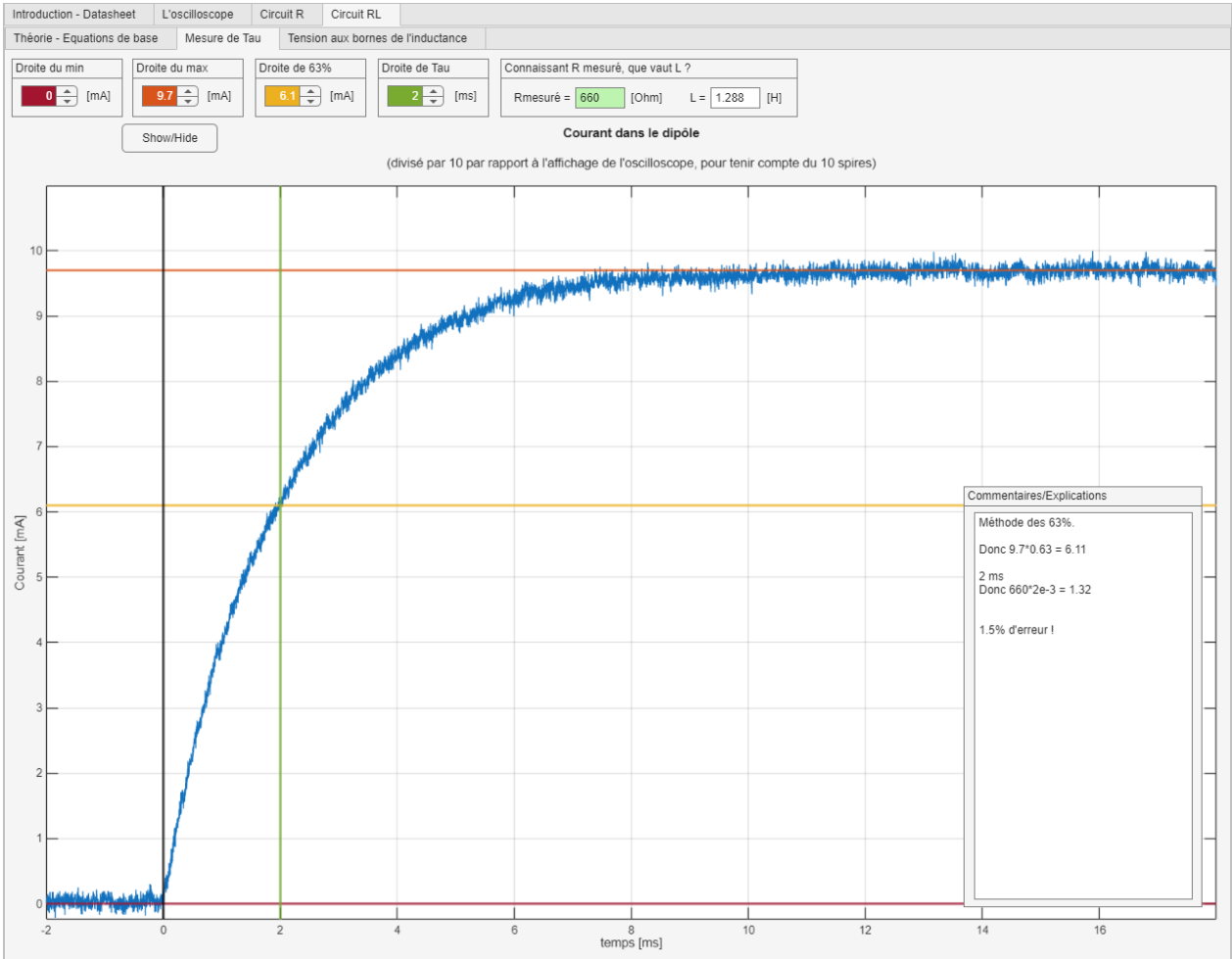
Déterminer, sur le graphique ci-dessus, le courant en régime permanent, puis, à l'aide de la méthode des 63%, déterminer la constante de temps Tau.

I en régime permanent

Iperm = 10.28 [mA]

La constante de temps Tau

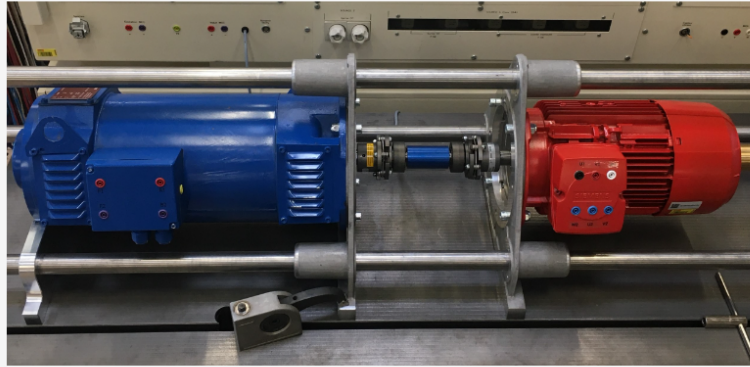
Tau = 1.9 [mS]



La machine asynchrone

En tant que moteur, la machine asynchrone est l'une des plus répandues sur terre de part sa construction robuste, sa facilité d'utilisation, son couple de démarrage. Elle est particulièrement utilisée dans les ascenseurs/grues - ainsi que dans les pompes, par exemple pour les climatisations.

Rs [Ω]	2.6
Xos [Ω]	6.3
Xh [Ω]	100
Rfer [Ω]	750
Xor' [Ω]	3.3
Rr' [Ω]	2.1



A savoir

Une case blanche doit être remplie par vous

Une case jaune est le résultat d'un calcul

Une case verte est la copie d'une case remplie ou calculée précédemment

Equations de base

Equations des puissances

Les variables possibles sont : Uph, Iph, cos_phi, sin_phi

Puissance apparente
S = 3*Uph*Iph

Puissance active
P = 3*Uph*Iph*cos_phi

Puissance réactive
Q = 3*Uph*Iph*sin_phi

Plaque signalétique

Tension de phase nominale
230 [V]

Courant de phase nominal
4.4 [A]

Equations déductibles de mesures

En pratique nous mesurons : Uligne, Iligne et P (puissance active).

Le couplage étant connu, ici nous choisissons "étoile", nous pouvons déduire les paramètres suivants.

Les fonctions possibles sont : sin(), cos(), tan(), asin(), acos(), atan()

Les variables possibles sont : Uph, Iph, P, cos_phi, sin_phi, Z

Uph = Uligne/sqrt(3) Iph = Iligne

Puissance apparente
S = 3*Uph*Iph

Le cos phi
cos_phi = P/(3*Uph*Iph)

Le sin phi
sin_phi = sin(acos(cos_phi))

Puissance réactive
Q = 3*Uph*Iph*sin_phi

La norme de l'impédance Z
Z = Uph/Iph

Partie réelle de Z complexe
Re(Z) = Z*cos_phi

Partie imaginaire de Z complexe
Im(Z) = Z*sin_phi

Résistance de phase

Mesure ohmique de la résistance Rs donnée dans le datasheet
2.6 [Ohm]

Rs mesurée avec un Ohmmètre Erreur en % (doit être < 7%)
2.6 [Ohm] 0.0 [%]

Dans l'étude des machines électriques, la tension de phase au stator est appelée Us (Uph = Us), et le courant de phase au stator est appelé Is (Iph = Is).

Attention, grâce au montage avec neutre artificiel, le wattmètre utilisé au labo vous donne directement les tensions et courants de phase, donc Us et Is.

Relations tensions/courants

Dans les calculs nous utilisons Uph et Iph (schéma équivalent par phase), mais en pratique nous ne pouvons habituellement que mesurer Uligne et Iligne.

Quelles sont les relations liant Uligne-Uphase et Iligne-Iphase en fonction du couplage (étoile ou triangle) ?

Les fonctions possibles sont : sqrt()

Les variables possibles sont : Uligne et Iligne

Couplage en étoile

Uph = Uligne/sqrt(3)

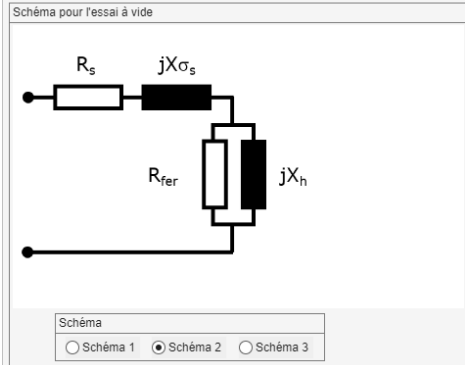
Iph = Iligne

Couplage en triangle

Uph = Uligne

Iph = Iligne/sqrt(3)

L'essai à vide sert à déterminer Rfer et Xh. A partir du schéma équivalent à vide, connaissant Rs et Xss, il est possible de déterminer Rfer et Xh.



Pour déterminer Rfer et Xh, Rs et Xss doivent être connues.

Rs a déjà été mesurée et vaut : Rs = 2.6 [Ohm]

Différentes solutions existent pour "trouver" Xss. Dans notre cas, nous supposons que Xss vaut 12% de l'impédance nominale Zn.

D'après les valeurs entrées sous "Plaque signalétique", que vaut Xss?

Xss = 6.27 [Ohm]

glissement (avec Ns et Nm)

s = (Ns-Nm)/Ns []

	Us0 [V]	Is0 [A]	P0 [W]	slip [%]	Pjs [W]	abs(Z0) [Ohm]	Rfer [Ohm]	Xh [Ohm]
1.1 Un	255.04	2.4531	256.95	0.066	46.94	104	816	98
1.0 Un	230.37	2.28	224.71	0.066	40.55	101	756	95
0.9 Un	207.23	1.728	203.37	0.133	23.29	120	638	115
0.8 Un	184.9	1.5141	186.49	0.133	17.88	122	544	118
0.7 Un	162.01	1.3129	173.16	0.266	13.44	123	441	121
0.6 Un	137.99	1.1497	160.07	0.266	10.31	120	340	120
0.5 Un	114.61	1.0107	149.07	0.4	7.97	113	247	118
0.4 Un	92.032	0.9285	141.055	0.533	6.72	99	165	112
0.3 Un	69.331	0.9335	135.323	1.13	6.80	74	94	98

Pour Rfer et Pfv. Le but de la droite n'est que pour les 2-3 premier points.

Le fait d'avoir un gros Pfv, ici 120.5 W c'est parce que la mesure est effectuée en étant accouplé à la machine à courant continu.

Si on enlève la puissance déterminée avec le couple et la vitesse mesurés par le banc on est autour des 100W donc Pfv de la MAS seule c'est 20W.

C'est confirmé à la fin avec les mesures en charge.

Les variables possibles sont : Rs, Xss, Rfer, Xh, Xsrp, Rrp et j

Impédance statorique Zs
Zs = Rs + jXss

Impédance de la branche magnétisante
Zh = jRfer/Xh + jXh

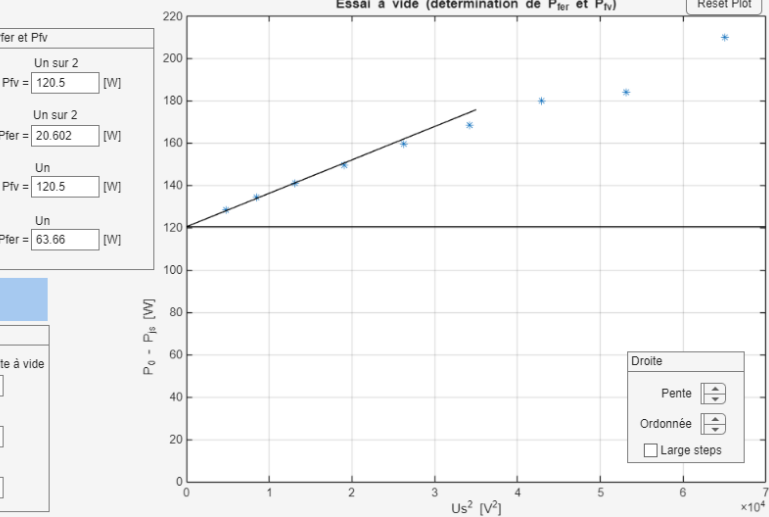
Impédance à vide (en fonction de Zs et Zh)
Z0 = Zs + Zh

Ainsi, en mesurant Z0, il est possible de déduire Rfer et Xh.

$$R_{fer} = \frac{(R_0 - R_s)^2 + (X_0 - X_{os})^2}{(R_0 - R_s)}$$

$$X_h = \frac{(R_0 - R_s)^2 + (X_0 - X_{os})^2}{(X_0 - X_{os})}$$

Rfer = 756 [Ohm] Xh = 96 [Ohm]



A partir de la mesure de P, U et I nous pouvons déterminer R0 et X0 (même démarche que celle faite dans l'onglet (équations de base).

Fonctions possibles : sin(), cos(), asin(), acos()

Variabiles possibles : P0, Pfv, Us0, Is0, Rs et celles que vous définissez ici.

Détermination de R0 et X0 à partir des mesures

Pertes joules au stator
Pjs = 3*Rs*Is0^2

Norme de l'impédance équivalente à vide
Z0 = Us0/Is0

cos phi à vide - tenir compte de Pfv !
cos_phi0 = (P0 - Pfv)/(3*Us0*Is0)

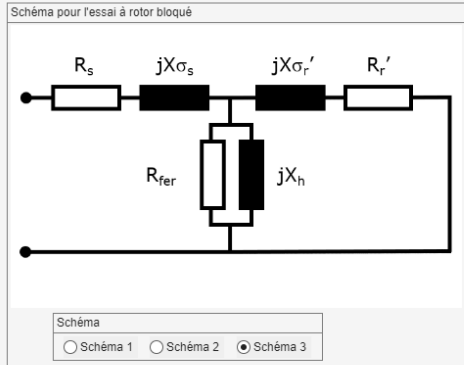
Partie réelle de Z0
R0 = Z0*cos_phi0

sin phi à vide
sin_phi0 = sin(acos(cos_phi0))

Partie imaginaire de Z0
X0 = Z0*sin_phi0

L'essai à rotor bloqué sert à déterminer R_{rp} et X_{srp} . A partir du schéma équivalent à rotor bloqué, connaissant les autres paramètres, il est possible de déterminer R_{rp} et X_{srp} .

Le schéma équivalent d'une machine à rotor bloqué étant le même que celui d'un transformateur en court-circuit, l'essai à rotor bloqué est souvent appelé "essai en court-circuit" et l'indice CC est utilisé pour cette raison.



Les variables possibles sont : R_s , X_{ss} , R_{fer} , X_h , X_{srp} , R_{rp} et j

$Z_{rcc} = R_{rp} + jX_{srp}$

$Z_s = R_s + jX_{ss}$

$Z_h = jR_{fer}X_h / (R_{fer} + jX_h)$
(en fonction de Z_s , Z_h et Z_{rcc})

$Z_{cc} = Z_s + (Z_h \cdot Z_{rcc}) / (Z_h + Z_{rcc})$
(à partir de l'équation précédente)

$Z_{rcc} = 1 / (1/(Z_{cc} - Z_s) - 1/Z_h)$

Ainsi, en mesurant Z_{rcc} , il est possible de déduire R_r' et X_{sr}' .

$$R_r' = Re\left\{ \frac{1}{\frac{1}{Z_{cc}} - \frac{1}{Z_s} - \frac{1}{Z_h}} \right\} \quad X_{sr}' = Im\left\{ \frac{1}{\frac{1}{Z_{cc}} - \frac{1}{Z_s} - \frac{1}{Z_h}} \right\}$$

Autres paramètres connus

$R_s = 2.6$ [Ohm] $R_{fer} = 756$ [Ohm]

$X_{ss} = 6.27$ [Ohm] $X_h = 96$ [Ohm]

A partir de la mesure de P, U et I nous pouvons calculer/déterminer R_{cc} et X_{cc} (même démarche que celle faite dans l'onglet (équations de base)).

Fonctions possibles : $\sin()$, $\cos()$, $\text{asin}()$, $\text{acos}()$
Variables possibles : Pcc, Usc, Iscc et celles que vous définissez ici.

Détermination de R_{cc} et X_{cc} à partir des mesures

$\cos_phicc = P_{cc} / (3 \cdot U_{sc} \cdot I_{scc})$

$\sin_phicc = \sin(\text{acos}(\cos_phicc))$

Norme de l'impédance
 $Z_{cc} = U_{sc} / I_{scc}$

Partie réelle de Z_{cc}
 $R_{cc} = Z_{cc} \cdot \cos_phicc$

Partie imaginaire de Z_{cc}
 $X_{cc} = Z_{cc} \cdot \sin_phicc$

!!! ATTENTION !!!

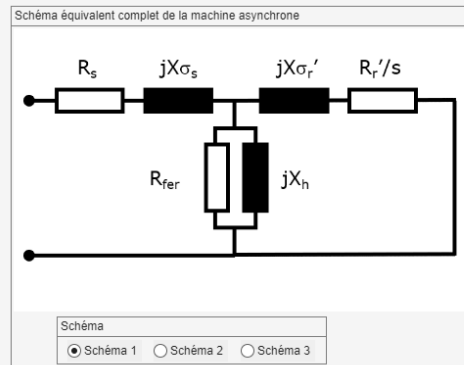
C'est le courant I_s votre référence PAS la tension U_s comme dans l'essai à vide.

Il faut monter la tension lentement et ne pas rester longtemps au delà du courant nominal. Comme la machine ne tourne pas elle n'est pas refroidie.

	Usc [V]	Iscc [A]	Pcc [W]	Rr' [Ohm]	Xsr' [Ohm]
1.1 In	50.084	4.8505	320.21	2.1	3.1
1.0 In	46.861	4.4345	270.07	2.1	3.3
0.9 In	43.051	3.9512	216.22	2.2	3.7
0.8 In	39.408	3.4977	169.87	2.2	4.2
0.7 In	36.167	3.1064	134.98	2.2	4.6
0.6 In	32.324	2.6496	99.199	2.3	5.2
0.5 In	28.603	2.2161	70.076	2.4	6.1
0.4 In	24.508	1.7544	44.785	2.5	7.3
0.3 In	20.83	1.35	26.669	2.6	9.2

$R_r' = 2.1$ [Ohm] $X_{sr}' = 3.3$ [Ohm]

Paramètres / Détermination de la caractéristique de couple Mesures/Caractéristique de couple



Paramètres du schéma équivalent

Rs datasheet [Ohm]	Rs mesuré [Ohm]	Ecart Rs [%]
2.6	2.6	0.0
Xss datasheet [Ohm]	Xss calculé [Ohm]	Ecart Xss [%]
6.3	6.27	0.5
Rfer datasheet [Ohm]	Rfer mesuré [Ohm]	Ecart Rfer [%]
750	756	0.8
Xh datasheet [Ohm]	Xh mesuré [Ohm]	Ecart Xh [%]
100	96	4.2
Rr' datasheet [Ohm]	Rr' mesuré [Ohm]	Ecart Rr' [%]
2.1	2.1	0.0
Xsr' datasheet [Ohm]	Xsr' mesuré [Ohm]	Ecart Xsr' [%]
3.3	3.3	0.0

Valeur du couple nominal

À partir des valeurs de la plaque signalétique, calculer le couple nominal.

Puissance nominale
 $P_n = 2200$ [W]

Vitesse nominale
 $N_n = 1465$ [tr/min]

Couple nominal (0.2% de précision)
 $T_n = 14.34$ [Nm]

Equation de puissance mécanique

Variables possibles :

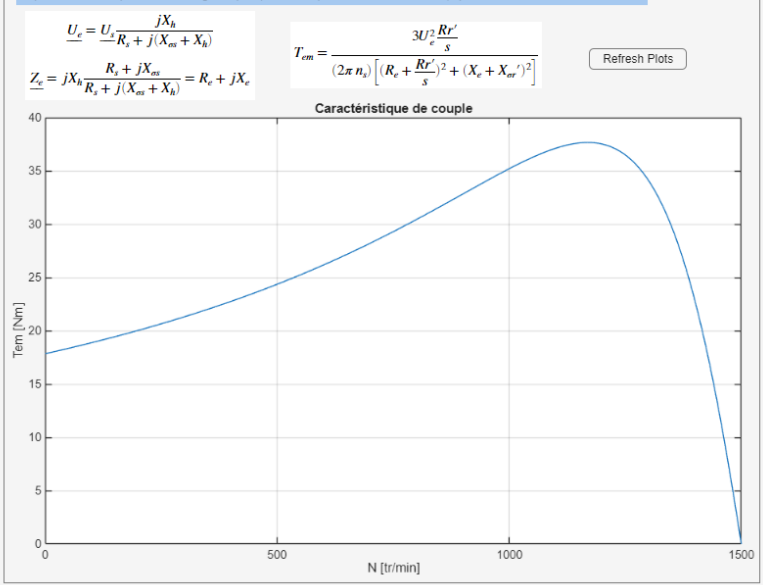
- T_{em} = couple électromécanique
- Ω_{mec} = vitesse angulaire mécanique [rad/s]
- n_s = vitesse du champ tournant statorique dans le monde mécanique [tr/s]
- s = le glissement [-]

Puissance mécanique
 $P_{mec} = T_{em} \cdot \Omega_{mec}$

Vitesse mécanique du rotor en [rad/s]
 $\Omega_{mec} = 2 \cdot \pi \cdot n_s \cdot (1-s)$

Caractéristique de couple

Connaissant la valeur des paramètres de la machine, ainsi que la tension de phase appliquée, l'équation du couple électromagnétique (selon l'équivalent de Thévenin), peut être résolue et affichée.



Introduction/Datasheet/Equations de base Essai à vide Essai à rotor bloqué Essai en charge / Caractéristique de couple Essai de démarrage

Paramètres / Détermination de la caractéristique de couple Mesures/Caractéristique de couple

En mesurant, Pel, Us, Is, avec le wattmètre, ainsi que la vitesse du moteur, déterminer toutes les autres valeurs dans le fichier matlab : MesuresEnCharge

Import Data

Us	Is	Pel	N	cosphi	s	Pjs	Pjr	Pfer	Pfv	Pmec	Tem	Rend.	TemMesuré
[V]	[A]	[W]	[tr/min]	[-]	[-]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[Nm]	[%]	[Nm]
230	1.98	212	1500	0.155	0	30.58	0	79.34	110.5	70.92	0.45	33.45	0.4
230	2.01	313	1499	0.226	0.0007	31.51	0.13	79.34	110.5	170.85	1.09	54.59	1.01
230	2.12	566	1496	0.387	0.0027	35.06	1.2	79.34	110.5	419.24	2.68	74.07	2.6
230	2.38	880	1491	0.536	0.006	44.18	4.54	79.34	110.5	720.78	4.62	81.91	4.5
230	2.78	1270	1487	0.662	0.0087	60.28	9.8	79.34	110.5	1089.42	7	85.78	6.9
230	3.2	1627	1484	0.737	0.0107	79.87	15.66	79.34	110.5	1420.97	9.14	87.34	9.01
230	3.65	1980	1479	0.786	0.014	103.92	25.15	79.34	110.5	1740.43	11.24	87.9	11.01
230	4.15	2340	1473	0.817	0.018	134.34	38.27	79.34	110.5	2056.89	13.33	87.9	13.1
230	4.4	2530	1469	0.833	0.0207	151.01	47.53	79.34	110.5	2220.97	14.44	87.79	14.1

TemMAX = [Nm]

Comparaison entre Tem tiré du bilan de puissance et celui mesuré par le couplemètre ?

Pourquoi les courbes ne matchent pas ? Quel paramètre ajuster ?

On peut se rappeler que la pente de la caractéristique de couple est liée à Rr donc quand on l'ajuste on match mieux.

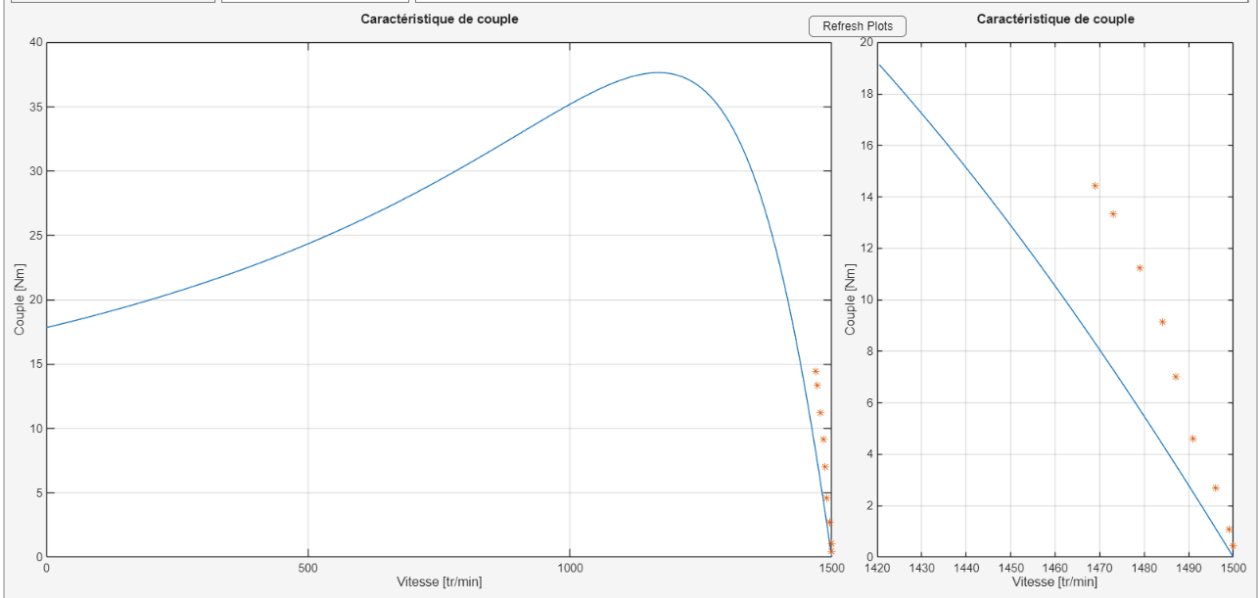
Et ensuite aller voir sous Essai en court-circuit ou je donne plus d'infos.

Pour charger la machine asynchrone nous utilisons une machine à courant continu.

Demander à un(e) assistant(e) de vous montrer comment utiliser la machine à courant continu.

Lors de cette mesure le couple nominal ne doit pas être dépassé.

Que vaut ce couple nominal (déterminé précédemment) ?



Introduction/Datasheet/Equations de base Essai à vide Essai à rotor bloqué Essai en charge / Caractéristique de couple Essai de démarrage

Paramètres / Détermination de la caractéristique de couple Mesures/Caractéristique de couple

En mesurant, Pel, Us, Is, avec le wattmètre, ainsi que la vitesse du moteur, déterminer toutes les autres valeurs dans le fichier matlab : MesuresEnCharge

Import Data

Us	Is	Pel	N	cosphi	s	Pjs	Pjr	Pfer	Pfv	Pmec	Tem	Rend.	TemMesuré
[V]	[A]	[W]	[tr/min]	[-]	[-]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[Nm]	[%]	[Nm]
230	1.98	212	1500	0.155	0	30.58	0	79.34	110.5	70.92	0.45	33.45	0.4
230	2.01	313	1499	0.226	0.0007	31.51	0.13	79.34	110.5	170.85	1.09	54.59	1.01
230	2.12	566	1496	0.387	0.0027	35.06	1.2	79.34	110.5	419.24	2.68	74.07	2.6
230	2.38	880	1491	0.536	0.006	44.18	4.54	79.34	110.5	720.78	4.62	81.91	4.5
230	2.78	1270	1487	0.662	0.0087	60.28	9.8	79.34	110.5	1089.42	7	85.78	6.9
230	3.2	1627	1484	0.737	0.0107	79.87	15.66	79.34	110.5	1420.97	9.14	87.34	9.01
230	3.65	1980	1479	0.786	0.014	103.92	25.15	79.34	110.5	1740.43	11.24	87.9	11.01
230	4.15	2340	1473	0.817	0.018	134.34	38.27	79.34	110.5	2056.89	13.33	87.9	13.1
230	4.4	2530	1469	0.833	0.0207	151.01	47.53	79.34	110.5	2220.97	14.44	87.79	14.1

TemMAX = [Nm]

Comparaison entre Tem tiré du bilan de puissance et celui mesuré par le couplemètre ?

Pourquoi les courbes ne matchent pas ? Quel paramètre ajuster ?

En modifiant la valeur de Rr de 2.1 (valeur initiale) à 1.1 Ohm.

C'est écart vient de 2 raisons.

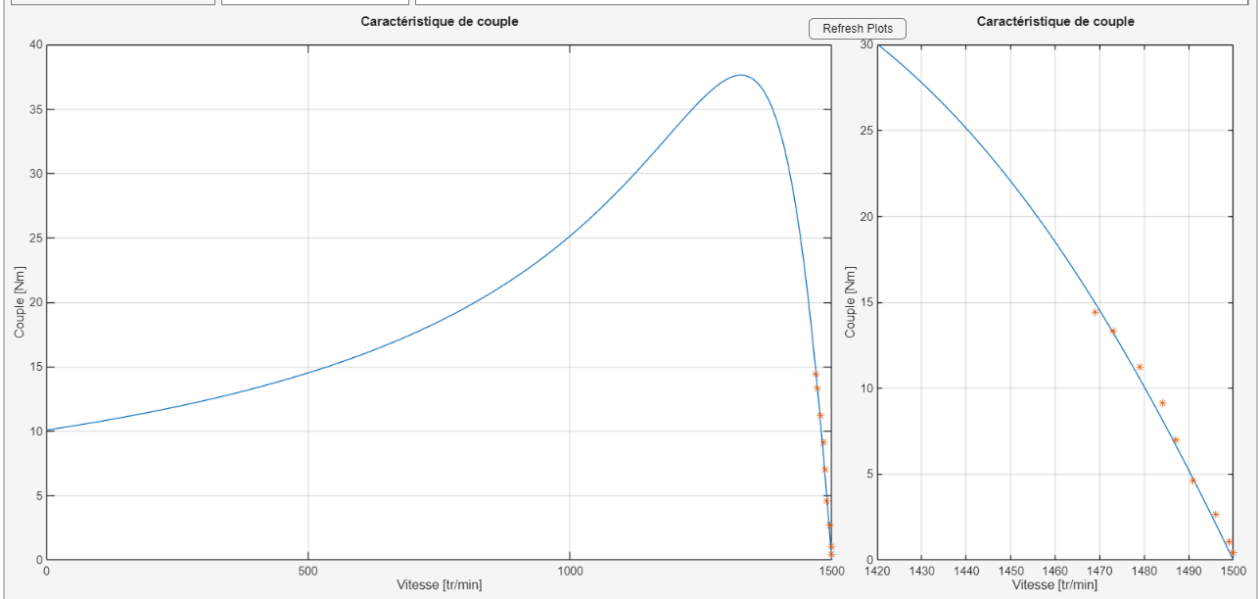
1. Rr déterminé par l'essai à rotor bloqué donne une valeur pouvant aller 30-40% trop haute suivant le type de machine, dû à l'effet pelliculaire.
2. Les pertes par frottement et ventilation déterminées sont trop élevée (120 W contre 20W).

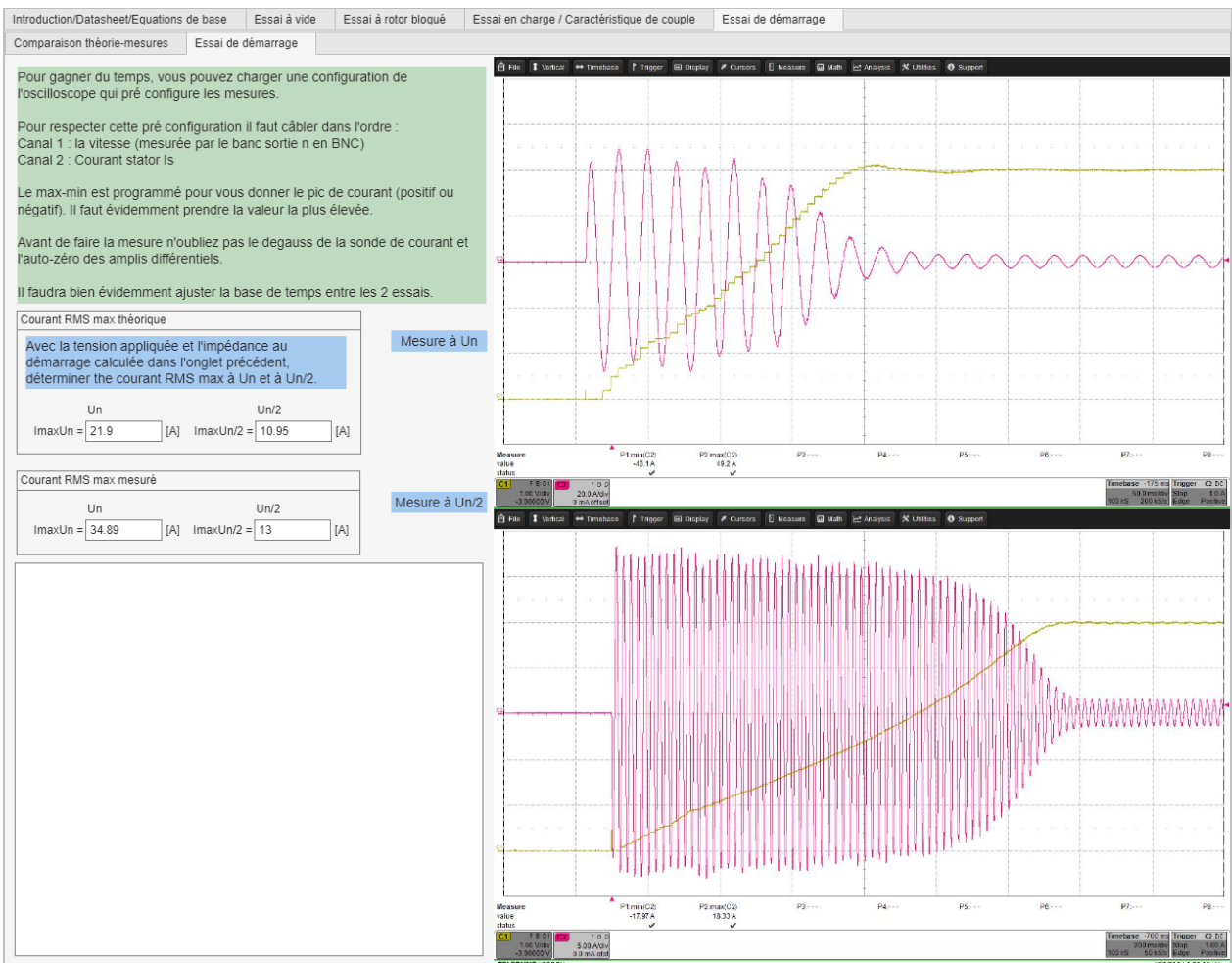
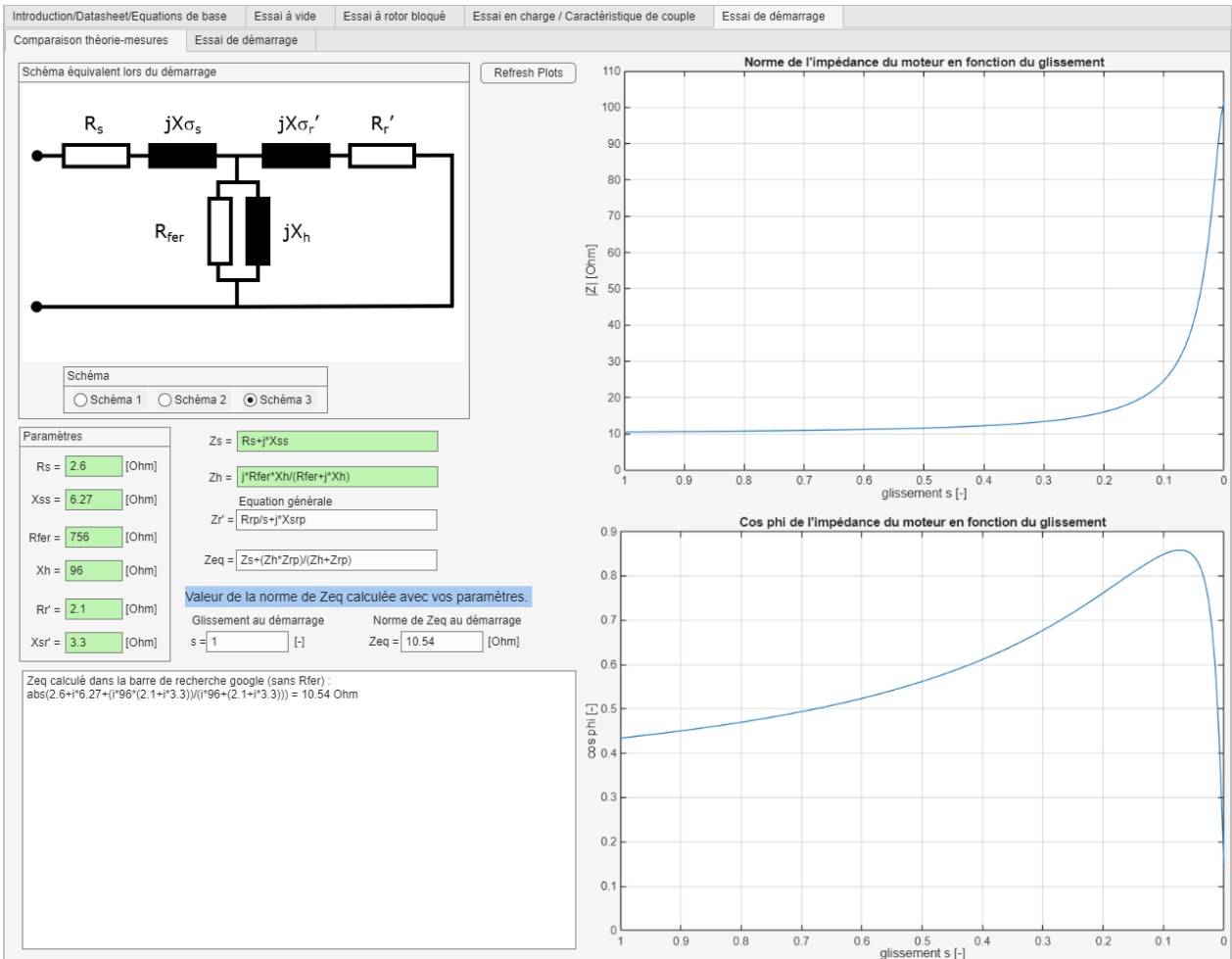
Pour charger la machine asynchrone nous utilisons une machine à courant continu.

Demander à un(e) assistant(e) de vous montrer comment utiliser la machine à courant continu.

Lors de cette mesure le couple nominal ne doit pas être dépassé.

Que vaut ce couple nominal (déterminé précédemment) ?

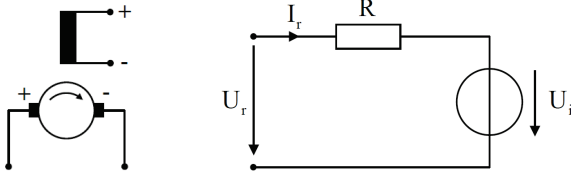




TP Moteur DC

Machine à courant continu à excitation séparée

Symbole Schéma équivalent en régime permanent



Equations en régime permanent

$$U_r = R I_r + U_i$$

$$k_\phi = k_{fj} I_f$$

$$U_i = k_\phi \Omega = k_{fj} I_f \Omega$$

$$T_{em} = k_\phi I_r = k_{fj} I_f I_r$$

1. Détermination de kphi

Comment faire pour déterminer kphi ?

- Equation ?
- Condition à respecter ?
- Comment faire concrètement en pratique avec le banc ?

Vos réponses à ces questions :

$$U_i = k_\phi \Omega$$

pour avoir U_i aux bornes du schéma équivalent il faut que $I = 0$.

ensuite on mesure U et Ω et on retire k_ϕ

on alimente la MAS sur le réseau et on a 1 point de mesure

1.1 Moteur DC

1.2 Machine asynchrone

1.3 Effectuer la mesure et déduire kphi

N = 1497; % Vitesse [tr/min] (mesurée avec le banc)
 U_i = 378; %380 % Tension DC [V]

Déduire kphi

$$\Omega = 2\pi N / 60 \text{ % [rad/s]}$$

Omega =
156.7655

$$k_\phi = U_i / \Omega \text{ % unité ?}$$

kphi =
2.4112

1.4 kphi déterminé à partir de la plaque signalétique

Mesurer R_r

$$R_{mes} = 3.8; \text{ % [Ohm]}$$

Lire la plaque signalétique

U_n = 400; % [V]
 N_n = 1500; % [tr/min]
 I_n = 7.3; % [A]

Que vaut kphi selon la plaque signalétique ?

$$k_\phi_{\text{plaque}} = (U_n - R_{mes} I_n) / (N_n * 2\pi / 60)$$

kphi_plaque =
2.3699

Ecart en % entre les 2 kphi

$$\text{Ecart_en_pourcent} = (\text{abs}(k_\phi - k_\phi_{\text{plaque}}) / k_\phi_{\text{plaque}}) * 100$$

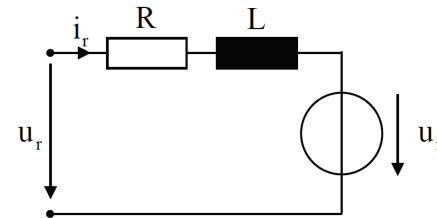
Ecart_en_pourcent =
1.7454

Commentaire :

On retombe sur nos pieds entre plaque et théorie.

4. Essai de démarrage

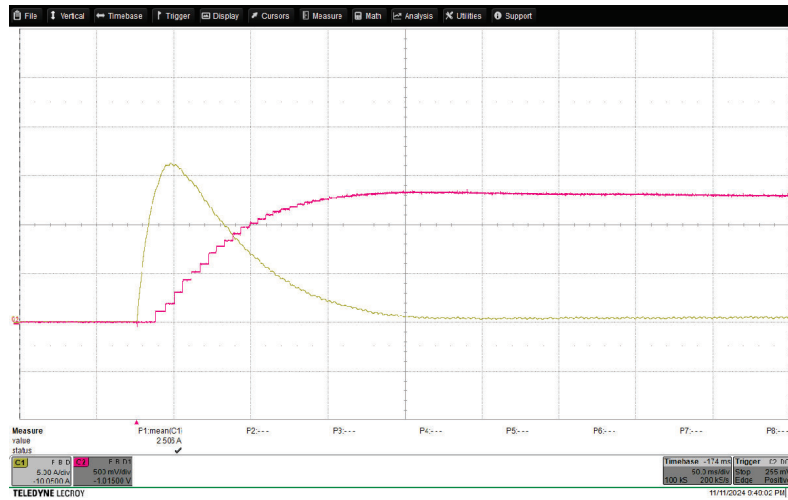
Schéma équivalent du moteur DC pour l'essai de démarrage



4.1 Préparation de l'essai

4.2 Essai de démarrage

Copie d'écran ici



Comparaison entre le démarrage de la préparation et celui que vous venez d'effectuer

Commentaire :

La forme correspond à la théorie et à la simulation faite en préparation.

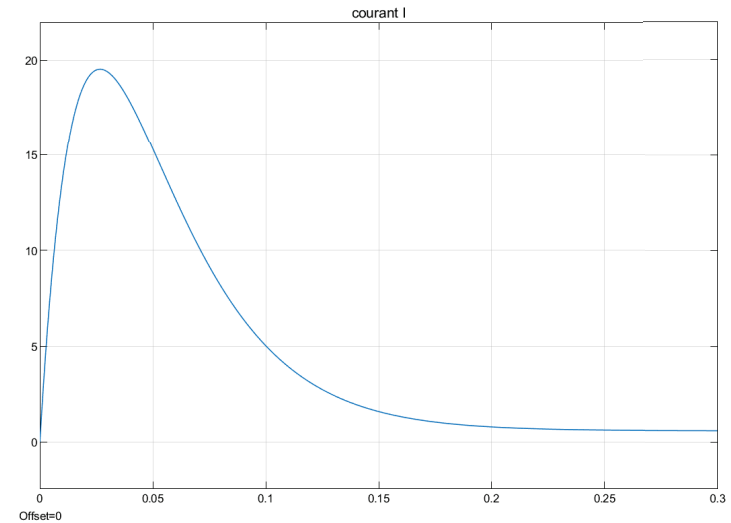
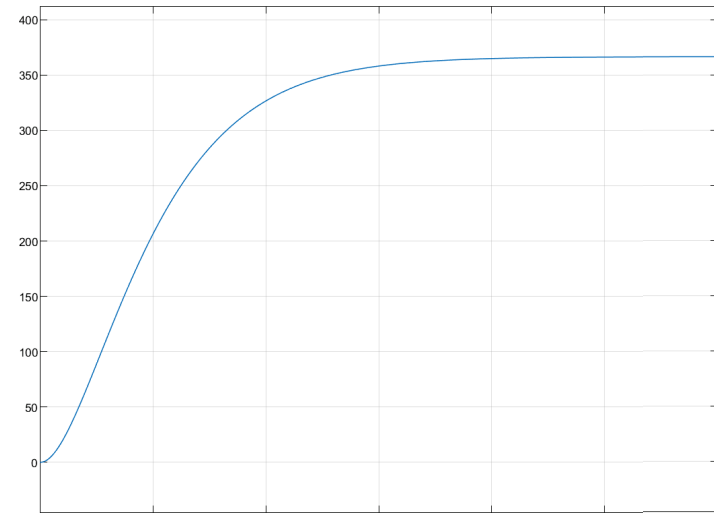
La montée exponentielle du début, c'est que on applique un saut de tension à un circuit RL, donc comme le 1er TP bluebox et courant monte exponentiellement. Comme le couple est proportionnel au courant, le couple augmente il devient assez grand pour décoller les rotors des 3 machines et commencer à tourner et donc le courant décroît car la tension induite de mouvement augmente et que si on reprend le schéma équivalent, plus U_i augmente plus la tension aux bornes de RL diminue ($U-U_i$) et donc plus le courant diminue (et plus le couple diminue aussi).

Le courant ne va pas à 0 car il y a les frottements des 3 rotors des 3 machines.

Simulation adaptée :

```

Kphi = 400/(1500*2*pi/60); % 2.5465
R = 3.8; % ça match mieux la mesure, car 3.2 va au delà des 20A
L = 0.050;
J = 1.5*0.060; % car on a 3 machines et j'avais fais le démarrage avec 2
% donc augmenter de 3/2
    
```

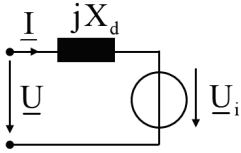


Fin du TP ;-)

TP Machine Synchronne

1. Essai à vide

Schéma équivalent de la machine synchronne



L'équation liant l'amplitude de la tension induite de mouvement à la vitesse de rotation et au courant d'excitation est: $U_i = k_{tI} \omega \Omega$

But de cet essai: Afficher la caractéristique de tension induite en fonction de la vitesse et du courant d'excitation.

Nous souhaitons donc afficher :

- $U_i(I_f)$ à **vitesse constante** (§1.1).
- $U_i(N)$ à **courant d'excitation constant** (§1.2).

D'après la figure ci-dessus, quelle condition (essai à vide) permet de mesurer U_i ?

Réponse : Sans courant, U_i se retrouve au bornes de la machine on peut donc le mesurer

A vide c'est "sans charge" ni active ni réactive donc courant nulle.

La tension induite mesurée est une tension induite de:

```
"ligne";
```

Le schéma équivalent que nous utilisons est un schéma équivalents par phase.

Pour avoir la tension induite de phase de ce schéma, par quel coefficient devons nous multiplier la tension induite mesurée par le voltmètre ? Ce coefficient est utilisé pour affichés les plots ci-dessous correctement.

```
coeffUi = 1/sqrt(3);
```

1.1 Caractéristique $U_i(I_f)$ à vitesse constante (Nn)

Cette première caractéristique est à la vitesse nominale :

- Que vaut la vitesse nominale ? (plaque signalétique)
- Pouvez-vous en déduire le nombre de paires de pôles ?

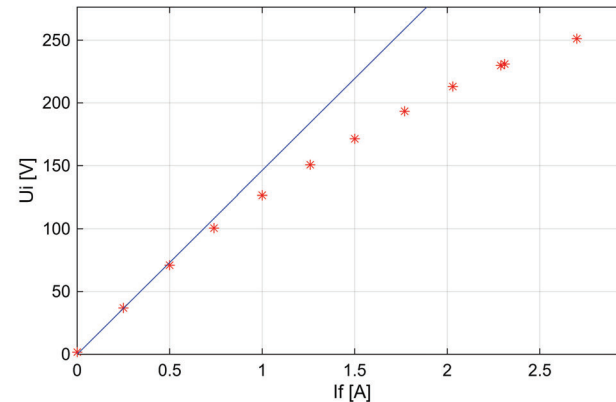
Vitesse nominale (Nn) = 1500 tr/min ? (la déduire de la plaque signalétique)

En déduire le nombre de paires de pôles de la machine synchronne. Regarder la plaque signalétique pour voir la fréquence nominale et la vitesse nominale et de là en déduire de nombre de paire de pôles

```
NbPairesDePoles = "2";
```

Mesures

```
If = [0, 0.25, 0.5, 0.74, 1, 1.26, 1.5, 1.77, 2.03, 2.29, 2.31, 2.7];  
Ui_If = coeffUi*[3, 64, 123, 174, 219, 261, 297, 335, 369, 398, 400, 435];  
  
% Plot de la figure  
figure; plot(If, Ui_If, 'r*'); grid on; xlim([0 1.1*max(If)]); ylim([0 1.1*max(Ui_If)]);  
xlabel('If [A]'); ylabel('Ui [V]'); hold on  
  
% A l'aide du slider, ajuster la droite pour qu'elle passe par les 2-3 premiers points  
ydroite = 395;  
x = [0 max(If)]; y = [0 ydroite]; plot(x,y,'b');
```



La relation entre la tension induite et le courant d'excitation est-elle linéaire ?

Non, car on dépend du monde magnétique et du fer en particulier qui fait rentrer en jeu des non linéarités dans sa caractéristique B-H, qu'on appelle saturation.

1.2 Détermination de I_{f0} (courant d'excitation à vide)

Rappel : I_{f0} est le courant d'excitation à vide, c'est donc le courant d'excitation qui donne la tension nominale lorsque le rotor tourne, à vide, à la vitesse nominale.

On rappelle ici l'équation de tension induite de mouvement.

$$U_i = k_{tI} \omega \Omega$$

But : déterminer I_{f0} .

Normalement, vous avez déjà fait la mesure de I_{f0} dans les mesures du point précédent, car, comme dit juste avant, I_{f0} est le courant d'excitation qui vous donnait la tension nominale lorsque vous tournez à la vitesse nominale.

Si vous n'avez pas fait cette mesure, rajoutez là dans le tableau du point précédent.

$I_{f0} = 2.3 \text{ A}$

1.3 Caractéristique $U_i(N)$ à I_{f0}

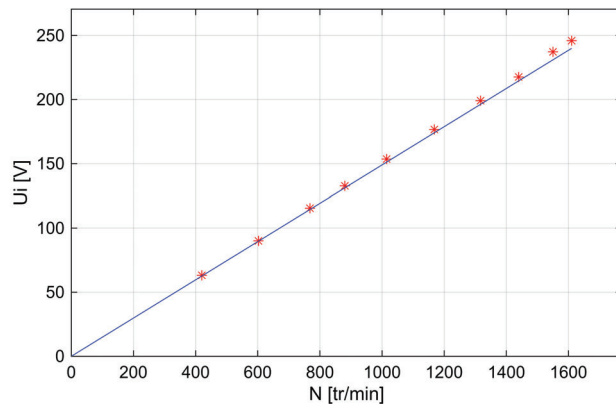
Mesures

```
% Faire varier N en mesurant  $U_i$ , SANS DEPASSER LA TENSION NOMINALE
% et reporter les mesures dans le tableau ci-dessous

N = [420, 602, 768, 880, 1015, 1168, 1317, 1440, 1550, 1610 ];
Ui_N = coeffUi*[109.5, 156, 200, 230, 266, 306, 345, 377, 411, 426 ];

% Plot de la figure
figure; plot(N, Ui_N, 'r*'); grid on; xlim([0 1.1*max(N)]);
ylim([0 1.1*max(Ui_N)]); xlabel('N [tr/min]'); ylabel('Ui [V]'); hold on

% Avec le slider, ajuster la droite pour passer par les 2-3 premiers points
ydroite =240;
x = [0 max(N)]; y = [0 ydroite]; plot(x,y,'b');
```



La relation entre la tension induite et la vitesse est-elle linéaire ?

Oui car ici on ne dépend que de la vitesse de rotation et les choses sont donc parfaitement linéaires. 2x plus vite = 2x plus de tension induite.

2. Synchronisation au réseau

```
true;% se synchroniser au réseau avec le simulateur
true;% se synchroniser au réseau sur le banc avec l'aide d'un/e assistant/e
```

Fin du TP ;-)