

LELEC1310 - Convertisseurs électromécaniques

Laboratoire : Machine asynchrone

Caytan Antoine, **Delait** Louis, **Delcoigne** Ben, **Dufromont** Célestin

Groupe 30 - Avril 2020

1 Introduction

Ayant étudié la machine asynchrone au cours magistraux, le laboratoire s'est voulu être une étude plus détaillée de celle-ci. Malgré le confinement, l'équipe enseignante a décidé de maintenir cette activité et en a donc préparé une version virtuelle. Cela se justifie amplement, les machines asynchrones étant abondamment utilisées dans le domaine de l'industrie.

Ce laboratoire a comme objectif principal d'étudier une machine asynchrone. Pour ce faire, le travail se déroule en trois phases.

La première sert à relever les caractéristiques suivantes du moteur, sur base de notions théoriques:

- Le couple utile C_{ut} en fonction de la vitesse N [tr/min].
- Le facteur de puissance $\cos(\phi)$ en fonction de la puissance utile P_{ut} .
- le rendement η en fonction de la puissance utile P_{ut}

La seconde phase, sert à déterminer les différents éléments du circuit équivalent monophasé grâce à trois essais :

- L'essai à rotor bloqué : permet de calculer les éléments séries.
- L'essai à faible charge standard : permet de calculer la valeur de X_μ .
- L'essai à faible charge non-standard : permet de calculer la valeur de R_p et C_p .

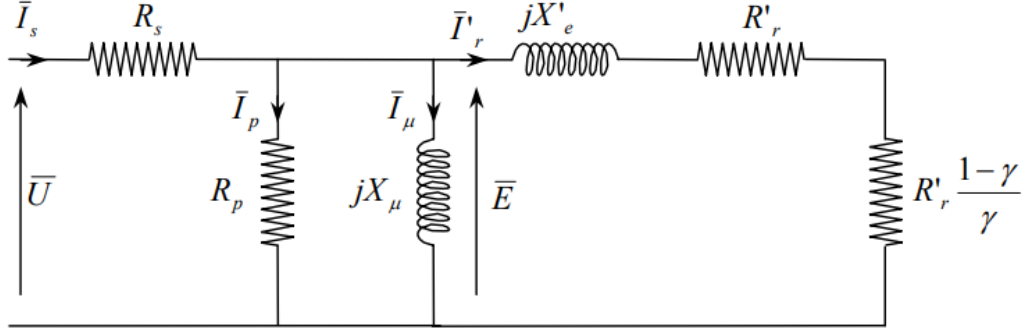


Figure 1: Schéma équivalent monophasé

Enfin, la phase 3, compare nos résultats théoriques trouvés en phase 1, avec nos mesures expérimentales obtenues en phase 2.

Quant au rapport, celui-ci s'articule de la manière suivante. Tout d'abord, le set-up expérimental est présenté ainsi que quelques calculs sur base des informations de la plaquette signalétique. Ensuite, les résultats des différents essais effectués sont expliqués et analysés. Et finalement, une conclusion reprend les grands points de ce rapport.

2 Set up expérimental

2.1 Détermination du type de connexion et des valeurs nominales

La machine étudiée est en fonctionnement moteur. Durant le laboratoire virtuel, les bornes de celui-ci étaient montées à la source en triangle. Quant à la plaquette signalétique, elle nous informe des informations suivantes (en valeurs nominales) :

Connexion	Étoile
f_s [Hz]	50
N_{nom} [tr/min]	1423
P_{ut} [W]	1500
V_{nom} [V]	400
I_{nom} [A]	3.4
f.p $\cos(\phi)$	0.85

De ces données, nous pouvons d'ailleurs déduire le nombre de pôles de la machine :

$$p = \frac{\omega_s}{\omega_{mot}} = \frac{2\pi \cdot 50}{\frac{2\pi}{60} \cdot 1423} \approx 2$$

2.2 Câblage et calibres

Chacune des lignes est connectée à un ampèremètre au travers d'un transformateur de courant. Ils sont utilisés pour calibrer l'échelle de mesure et ainsi obtenir une meilleure précision lors de la lecture. Un voltmètre mesure la différence de tension entre la ligne R et

S. Enfin, un wattmètre triphasé mesure la puissance triphasé au travers de la tension et du courant de ligne des liaisons.

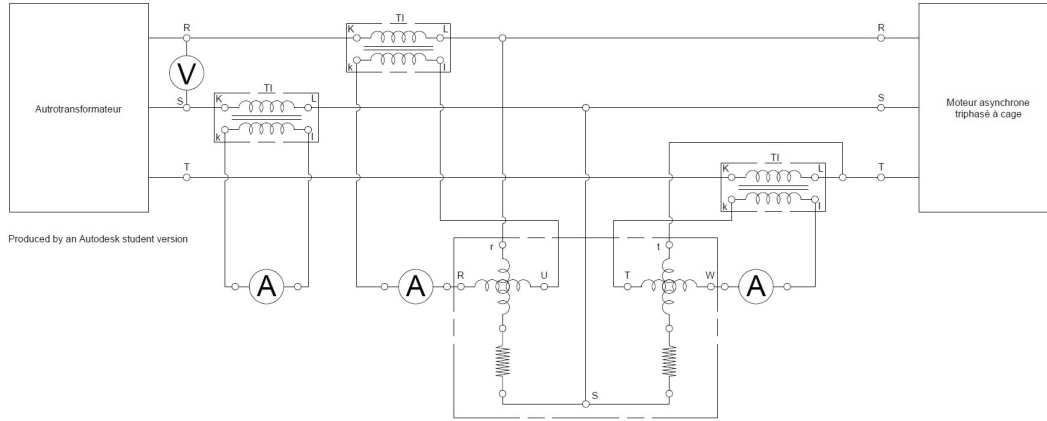


Figure 2: Schéma du banc de mesure

3 Mesure DC

La résistance R_s est obtenue à partir de la mesure de la résistance DC : $R_{DC} = 8.8[\Omega]$. Cette valeur nous a été fournie, même si normalement nous aurions dû la mesurer grâce à un pont de Wheatstone. R_s , dans le schéma équivalent monophasé, correspond à la résistance des enroulements statoriques. Il ne faut pas oublier de diviser cette valeur par 2, la mesure étant prise entre 2 phases d'un système triphasé.

$$R_s = \frac{R_{DC}}{2} = \frac{8.8}{2} = 4.4[\Omega]$$

4 Essai à rotor calé

Cet essai a pour but de déterminer les éléments séries du circuit équivalent monophasé : X_e et R'_r .

4.1 Déroulement

Le rotor est bloqué à l'aide du frein, réglé au maximum. On augmente la tension jusqu'à obtenir un courant proche du courant nominal (3.4 [A] dans notre cas). On mesure ensuite la tension et la puissance obtenues à ce niveau de courant.

4.2 Hypothèses de calcul

Étant donné que le rotor est bloqué, le glissement γ vaut 1. On peut dès lors simplifier le schéma équivalent monophasé puisque la résistance $R'_r \frac{1-\gamma}{\gamma}$ vaut 0 et se comporte comme un court-circuit.

De plus, on considère que les valeurs des éléments parallèle R_p et X_μ sont élevées et que le courant passant dans ces branches peut être négligé. Ces hypothèses vont être validées dans la suite.

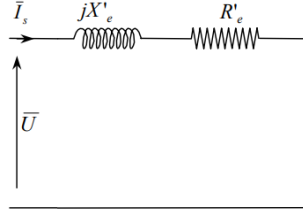


Figure 3: Schéma équivalent monophasé simplifié

4.3 Détermination des éléments série

Le schéma obtenu suite aux simplifications est illustré à la figure 3, avec $R'_e = R'_r + R_s$. Nous pouvons trouver la valeur de l'impédance Z_e composée de la résistance R'_e et de l'inductance X'_e en appliquant la loi d'Ohm à ce circuit. Nous trouvons:

$$Z'_e = \frac{U_{ph}}{I_{ph}} = \frac{\frac{U_L}{\sqrt{3}}}{I_{nom}} = \frac{\frac{78}{\sqrt{3}}}{3.38} = 13.32[\Omega] \quad (1)$$

Grâce à la puissance qui nous a été donnée, nous pouvons retrouver le facteur de puissance $\cos \phi$.

$$P = 3U_{ph}I_{ph} \cos \phi \Leftrightarrow \cos \phi = \frac{\sqrt{3}}{3} \frac{P}{U_L I_{ph}} = 0.7008 \quad (2)$$

Ce qui donne un $\phi = 45.51^\circ$. Cet angle nous permet de trouver X'_e et R'_e :

$$\begin{cases} R'_e &= Z'_e \cos \phi &= 9.324[\Omega] \\ X'_e &= Z'_e \sin \phi &= 9.5[\Omega] \end{cases} \quad (3)$$

De R'_e et R_s , nous pouvons déduire la valeur de R'_r :

$$R'_r = R'_e - R_s = 9.324 - 4.4 = 4.924[\Omega] \quad (4)$$

4.4 Vérification des hypothèses

Les essais en charge nous donnent des valeurs pour R_p et X_μ de $1204[\Omega]$ et $91 [\Omega]$ qui sont donc bien plus élevées que les valeurs qui sont trouvées ci-dessus. Elles peuvent donc bien être négligées puisque le courant qui y passe est très faible.

5 Essai à faible charge standard

5.1 Déroulement et objectif de l'essai

L'essai à faible charge standard se déroule en appliquant un frein (via la molette du dispositif mécanique) minimum.

De ce fait, on peut considérer un glissement proche de 0 ($\gamma \simeq 0$) ce qui implique une résistance $R'_r \frac{1-\gamma}{\gamma}$ de très grande valeur.

Le but de cet essai est de déterminer la valeur de la réactance jX'_μ et la tension imposée est comme l'indique le terme "standard" égale à la tension nominal soit

$$U_l = U_N = 400[V]$$

5.2 Hypothèses de calcul

Nous supposons pour cet essai que, la résistance $R'_r \frac{1-\gamma}{\gamma}$ étant de très grande valeur, nous pouvons négliger la partie imaginaire de l'impédance dans la branche "de droite" du circuit équivalent monophasé (cfr Figure2) devant sa partie réelle.

5.3 Détermination de X_μ

Les valeurs mesurées sont les suivantes:

U_l	I_R	I_s	I_T	I_l	P_{elec}	C_{ut}	P_{ut}	N
400V	2,6A	2,65A	2,5A	2,58A	275W	0,36Nm	35W	1472t/m

Figure 4: Mesures essai à faible charge standard

Suite à nos hypothèses, on peut considérer X_μ comme le seul élément réactif du circuit. Etant en parallèle avec les éléments réactifs on trouve:

$$X_\mu = \frac{U_l}{\sqrt{3} \cdot I_l \cdot \sin(\phi)} = 90.59[\Omega]$$

Avec $\phi = (\frac{P_{elec}}{\sqrt{3} \cdot U_l \cdot I_l}) = 81.15^\circ$

5.4 Vérification des hypothèses

On trouve directement suite aux mesures la valeur du glissement

$$\gamma = \frac{\omega_s/p - \omega_m}{\omega_s/p} = \frac{2\pi 50/2 - 1472/60 \cdot 2\pi}{2\pi 50/2} = 0.0187$$

Avec la valeur de p qu'on a identifiée à 2. On remarque que l'essai à faible charge est bel et bien à faible glissement.

De cette valeur, on tire la valeur de la résistance

$$R'_r \frac{1-\gamma}{\gamma} + R'_s = 4.924 \cdot \frac{1-0.0187}{0.0187} + 4.4 = 263.2617[\Omega]$$

On remarque que $263.2617 \gg X'_e$, l'approximation est donc vérifiée.

6 Essais à faible charge non-standards

6.1 Déroulement et objectif de l'essai

Cet essai se déroule de la même manière que l'essai à faible charge standard mais avec différentes valeurs de tension U_l telles que $200[V] < U_l < 425[V]$.

L'objectif est de déterminer la valeur des paramètres R_p , la résistance modélisant les pertes fer, et C_p , le couple de freinage inhérent au dispositif.

6.2 Hypothèses

La valeur du couple utile n'a pas été mesurée, considérant ce dernier nul.

6.3 Détermination de R_p et C_p

Les valeurs mesurées sont les suivantes:

U_l	I_R	I_s	I_T	I_l	P_{elec}	N
200V	0.88 A	0,92 A	0,96 A	0,92A	120W	1468t/m
300V	1,45 A	1,4 A	1,55 A	1,47 A	175W	1474t/m
350V	1,85 A	1,8 A	1,95 A	1,87 A	215W	1474t/m
375V	2,25 A	2,2 A	2,22 A	2,22 A	250W	1455t/m
400V	2,6 A	2,65 A	2,5 A	2,58 A	275W	1472t/m
425V	3,20 A	3,15 A	3,25 A	3,2 A	375W	1476t/m

Figure 5: Mesures essais à faible charge non-standard

On peut retravailler l'équation du bilan de puissance du moteur :

$$P_{ut} = P_{elec} + P_{js} + P_{mag} + P_{jr} + P_{f,mec}$$

$$\frac{U_l^2}{R_p} + C_p \cdot \frac{\omega_s}{p} = P_{elec} - 3R_s I_s^2$$

Où les paramètres à déterminer sont en rouge et tous les termes de droite, ainsi que U_l sont connus suites aux expériences.

On détermine la valeur des paramètres en trouvant l'équation de la droite qui approxime le mieux, selon le critère de minimisation au sens du moindre carré, le nuage de point formé des doublets $(X, Y) = (U_l^2, P_{elec} - 3R_s I_s^2)$ pour les 6 mesures. Cette droite a pour équation

$$f(x) = aX + b$$

Avec

$$a = \frac{1}{R_p}$$

$$b = C_p \cdot \frac{\omega_s}{p}$$

$$X = U_l^2$$

On trouve finalement les coefficients suivants:

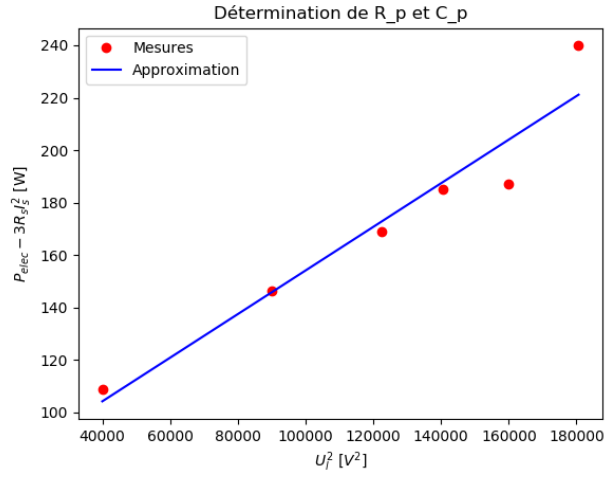


Figure 6: Essai à faible charge non-standard

$$a = 0.000831 \rightarrow R_p = 1.204[k\Omega]$$

$$b = 71.01044 \rightarrow C_p = b \cdot \frac{p}{\omega_s} = 0.45[Nm]$$

7 Essais en charge

7.1 Déroulement et objectif de l'essai

L'essai en charge a pour but de valider le modèle que nous avons déterminé. Il vise à comparer les caractéristiques théoriques, déduites avec le modèle établi précédemment, avec des valeurs expérimentales. Concrètement, on alimente le moteur à sa tension nominale et varie le couple de freinage en veillant à rester sous le courant nominal. Les grandeurs I_l , C_{ut} et N sont mesurées pour différents charges.

7.2 Hypothèses

Concrètement, toutes les hypothèses utilisées pour dresser le modèle théorique restent valables. Cet essai va toutefois nous permettre de les valider.

7.3 Utilisation du schéma

Le schéma utilisé est celui présenté en Figure 2. A noter que la tension U_l mesurée n'est pas celle qui apparaît aux bornes du schéma équivalent. Etant donné que le schéma équivalent se base sur un schéma en étoile, et que la tension de ligne est celle qui est mesurée, la tension qui apparaît aux bornes du schéma équivalente est $U = \frac{U_l}{\sqrt{3}}$. I_l correspond au courant statorique, aucune conversion n'est nécessaire.

7.4 Validation du modèle pour le calcul du couple

Afin de valider le modèle, nous allons comparer le couple électromagnétique produit en fonction de la vitesse avec les valeurs expérimentales et le modèle théorique.

7.4.1 Valeurs expérimentales

Le couple utile a été mesuré expérimentalement. Afin de déterminer le couple électromécanique, la relation suivante est d'application:

$$C_{em} = C_{ut} + C_p \quad (5)$$

7.4.2 Modèle théorique

Le couple électromagnétique est lié à la puissance dissipée dans la résistance $R'_r \frac{1-\gamma}{\gamma}$. Nous avons les équations suivantes

$$P_{ut} = 3R'_r \frac{1-\gamma}{\gamma} I_r'^2 \quad (6)$$

Cette valeur ne dépend pas de la vitesse. En utilisant la relation $\gamma = \frac{N_{synchr} - N}{N_{synhr}}$, l'équation 6 devient

$$P_{ut} = 3R'_r \frac{N}{N_s - N} I_r'^2 \quad (7)$$

Le couple se déduit en appliquant la relation $C_{ut} = \frac{60P_{ut}}{2\pi N}$ à l'équation 7

$$C_{ut} = \frac{60 \cdot 3}{2\pi} R'_r I_r'^2 \frac{1}{N_s - N} \quad (8)$$

Reste à déterminer le courant I_r' . Nous pouvons déplacer R_s du stator au rotor car la chute de tension en son sein est négligeable. En utilisant les lois de Kirchoff: $I_r' = \frac{U}{jX'_e + R'_r + R_s + R'_r \frac{N}{N_s - N}}$

7.5 Validation du modèle de calcul pour le courant statorique

7.5.1 Valeurs expérimentales

Les valeurs expérimentales mesurées pour I_l correspondent au courant statorique, aucune conversion n'est nécessaire.

7.5.2 Modèle théorique

Par la loi de Kirchoff appliquée sur le circuit équivalent monophasé, en déplaçant R_s à droite car la chute de tension sur cette résistance est négligeable, nous trouvons

$$\begin{cases} I_s &= I_p + I_u + I'_r \\ I_p &= \frac{U}{R_p} \\ I_u &= \frac{U}{jX_u} \\ I'_r &= \frac{U}{jX'_e + R'_r + R'_r \frac{N}{N_s - N} + R_s} \end{cases} \quad (9)$$

Toutes les grandeurs sont connues, le seul paramètre variable étant la vitesse, nous pouvons facilement dresser la courbe courant/vitesse.

7.6 Validation du facteur de puissance

7.6.1 Valeurs expérimentales

Il n'est pas possible de mesurer le facteur de puissance expérimentalement, toutefois, nous pouvons le déduire des mesures de courant, de tension et de puissance avec la relation

$$\cos\phi = \frac{P_{elec}}{\sqrt{3}U_l I_l} \quad (10)$$

7.6.2 Modèle théorique

Pour déterminer le facteur de puissance du moteur, il nous suffit de connaître l'angle de déphasage entre le courant et la tension et d'en prendre le cosinus. Deux options s'offrent à nous. D'une part nous pouvons trouver Z le phaseur équivalent du schéma monophasé en appliquant la mise en série et en parallèle, d'autre part nous pouvons prendre $Z = \frac{U}{I}$ en grandeurs phasorielles. Nous choisissons la seconde option car le phaseur du courant théorique a déjà été calculé pour la section précédente. Les deux formules sont de toute manière équivalentes. Pour trouver le facteur de puissance, il faut prendre le cosinus de l'angle associé à la phase de Z .

7.7 Représentation des résultats

La figure 7 affiche les courbes des différentes valeurs à comparer. Les formules utilisées sont décrites dans les sous-sections précédentes. Notons que les valeurs expérimentales ne peuvent être mesurées qu'autour de la vitesse nominale de rotation. S'éloigner trop de cette vitesse entraînerait une hausse en courant dépassant le seuil nominal. Il est donc impossible de valider la courbe théorique au-delà de ces valeurs. Nous remarquons toutefois que pour le régime de fonctionnement collent avec le modèle théorique. Les taux d'erreur entre la valeur pratique et théorique sont:

Valeur	Taux d'erreur [%]
C_{em}	4.68
I_s	2.81
$\cos(\phi)$	4.28

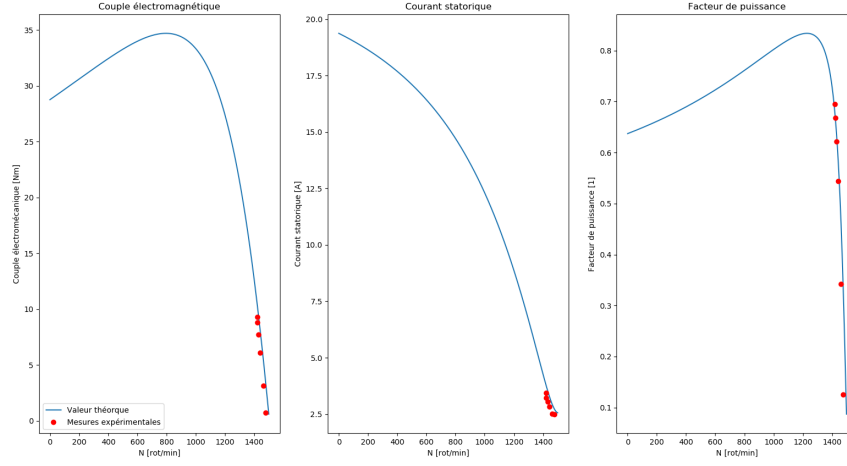


Figure 7: Validation du modèle par les essais en charge

8 Conclusion

En premier lieu, les essais effectués illustrent bien le fait qu'un équilibre sur la vitesse de rotation de la machine doit être trouvé. En effet, l'objectif sera de minimiser les pertes en ayant une vitesse proche de la vitesse de synchronisme tout en conservant un facteur de puissance suffisant en ayant une vitesse inférieure à la vitesse de synchronisme.

Ensuite, malgré certains imprécisions (erreurs de mesure, frottements dans la machine...), le modèle théorique apporte une estimation très proche de ce qui est obtenu expérimentalement.

Les valeurs obtenues pour les éléments du schéma équivalent sont les suivantes :

$R_s[\Omega]$	$R'_r[\Omega]$	$X'_e[\Omega]$	$X_\mu[\Omega]$	$R_p[\Omega]$	$C_p[N.m]$
4.4	4.924	9.5	90.59	1204	0.45

Tableau récapitulatif des éléments du schéma équivalent monophasé