

# TP II : Energie electrique

Boris Alexandre Baudel - M1 Mécatronique - ENS Rennes

October 2023

## 1 Introduction

Ce TP a pour objectif d'analyser les caractéristiques et le fonctionnement d'une machine triphasée à induction à rotor bobiné. Nous commencerons par examiner les paramètres fondamentaux de la machine, tels que sa puissance nominale, sa vitesse nominale, son couple nominal, sa tension nominale de phase, et son courant nominal. Ensuite, nous étudierons le schéma équivalent monophasé de la machine et ses implications sur son fonctionnement et ses performances. Cette étude permettra non seulement de comprendre les principes de base de l'électromécanique, mais aussi de développer des compétences pratiques essentielles dans la manipulation et l'analyse de machines électriques complexes.

## 2 Paramètres de la machine utilisées pour l'étude

On considère une machine triphasée à induction (machine asynchrone) à rotor bobiné. On relève sur sa plaque signalétique les caractéristiques suivantes :

Caractéristique	Symbole	Valeur
Puissance nominale	P <sub>nom</sub>	3,4 kW
Vitesse nominale	N <sub>nom</sub>	1390 tr.min <sup>-1</sup>
Couple nominal	C <sub>nom</sub>	20,4 N.m
Tension nominale de phase	V <sub>s,nom</sub>	230/400 V à 50 Hz
Courant nominal	I <sub>s,nom</sub>	6,8 A

TABLE 1 – Caractéristiques du moteur à induction

Le schéma équivalent monophasé équivalent est rappelé sur la figure 1.

## 3 Schéma équivalent monophasé

Le schéma équivalent monophasé équivalent est rappelé sur la figure 1.

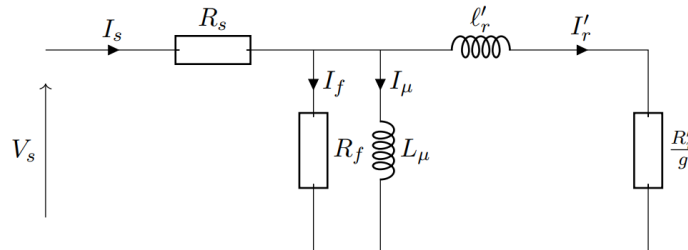


FIGURE 1 – Schéma monophasé équivalent du moteur à induction

La signification et la valeur des paramètres de ce schéma équivalent sont donnés dans le tableau suivant :

## 4 Machine à induction alimentée par un onduleur

On alimente la même machine à travers un variateur de vitesse, comprenant un onduleur triphasé et sa commande. L'onduleur est alimenté par un bus continu de 650V et a une fréquence de commutation de 20 kHz. Il permet d'appliquer des tensions de fréquence et d'amplitude réglables. On cherche à travailler en permanence à faible glissement.

Paramètres	Symbole	Valeur
Résistance des bobinages du stator	$R_s$	$0,9 \Omega$
Résistance représentant les pertes fer	$R_f$	$1100 \Omega$
Inductance de magnétisation	$L_\mu$	$411 \text{ mH}$
Résistance des bobinages du rotor	$R'_r$	$2,47 \Omega$
Inductance de fuite	$r$	$72,5 \text{ mH}$
Rapport de transformation rotor/stator	$k$	$1$
Glissement	$g$	<i>valeur</i>

TABLE 2 – Paramètres du schéma équivalent monophasé

### Question 1

Le rendement de la machine est donnée par  $1-g$  avec  $g$  le glissement. Ainsi, plus le glissement est faible, plus le rendement est élevée.

### Question 2

Montrer que pour des faibles glissements, le couple peut être considéré comme étant proportionnel à la pulsation rotorique  $\omega_r$  :

$$C = K_1 \cdot \omega_r$$

On a, comme le glissement est faible :

$$C = \frac{2 \cdot C_m}{\frac{g}{g_m} + \frac{g_m}{g}} = \frac{2 * C_m * g}{g_m} \quad (1)$$

Il vient :

$$C = \frac{3pw * \frac{V_s^2}{\omega_s}}{R_r} \quad (2)$$

La valeur de  $K$  est donc donnée par :

$$K = \frac{3p * \frac{V_s^2}{\omega_s}}{R_r} \quad (3)$$

### Question 3

En quoi est-il pertinent de travailler à ratio  $\frac{U}{f}$  constant (c'est-à-dire avec une amplitude de la tension d'alimentation proportionnelle à la fréquence d'alimentation) ? Quel ratio  $\frac{V_s}{\omega_s}$  serait-il pertinent de choisir ?

Dans un moteur à induction, la tension appliquée et la fréquence d'alimentation influencent directement le flux magnétique dans le noyau de fer. Un ratio  $U/f$  constant assure que le flux magnétique reste à peu près constant à différentes vitesses de fonctionnement. Nous allons utiliser le ratio :

$$K = \frac{V_s}{\omega_s} = 23/100 * \pi = 0,73 \quad (4)$$

### Question 4

Proposer un algorithme de commande en boucle ouverte permettant de régler la valeur du couple de la machine et en analyser les performances par simulation. On utilisera pour la simulation de la machine, les paramètres réels donnés dans le tableau.

Nous allons tous d'abord enlever l'onduleur, et faire marcher la machine en boucle ouverte grâce aux bloque simulink dans la figure II.



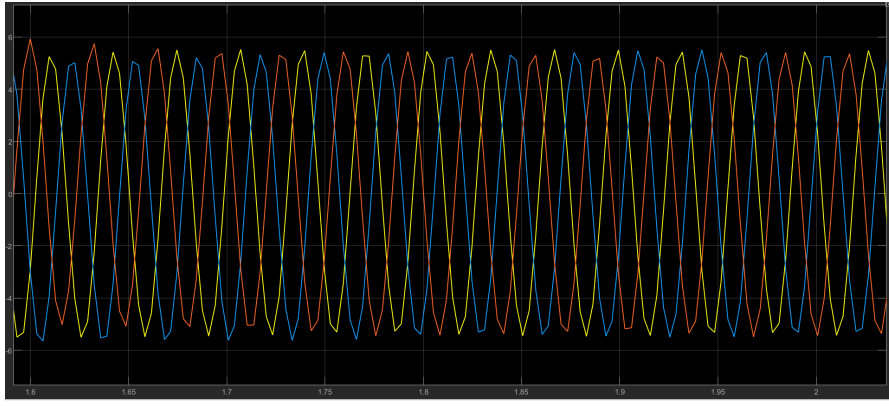


FIGURE 5 – Sortie triphasée en courant

On peut comparer la consigne et la commande (sans onduleur) et sans correcteur :

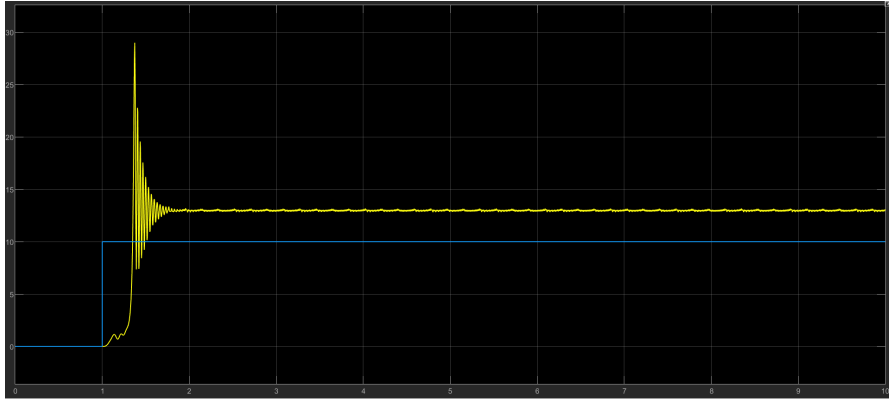


FIGURE 6 – Réponse à une consigne de type step

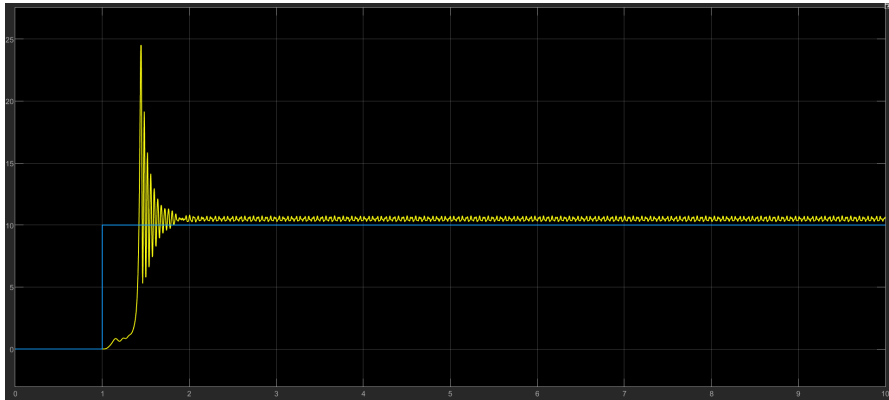


FIGURE 7 – Amélioration face à une consigne de type Step

On remarque qu'il ya des ecarts entre la consigne et la commande qui est donnée au système. Nous allons donc implémenter une correction à l'aide d'un PID.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

$$U(s) = (K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s) E(s)$$

Dans notre cas, nous avons choisi 10 pour le proportionnel, 1 pour le dérivateur et 0 pour l'intégrateur. Les valeur on été choisi par effet erreur.

## 5 Caractéristiques et Contrôle du Moteur à Induction

### Caractéristiques du Moteur

Les caractéristiques du moteur à induction sont résumées dans le tableau suivant :

Paramètres	Symbole	Valeur
Résistance statorique	$R_s$	$0,9 \Omega$
Inductance magnétisante	$L_\mu$	411 mH
Résistance modélisant les pertes fer	$R_f$	supposée infinie
Inertie du moteur et de sa charge	$J$	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
Couple de charge	$C_{ch}$	$f_v \cdot \Omega \quad f_v = 0,137 \text{ N}\cdot\text{m}/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$

TABLE 3 – Caractéristiques du moteur à induction

### Question 5

Proposer un algorithme de commande pour régler la vitesse du moteur à la valeur constante et égale à  $1000 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$ . Comment pourrait-on modifier l'algorithme précédent pour pouvoir faire monter la vitesse du moteur à  $1800 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$  ?

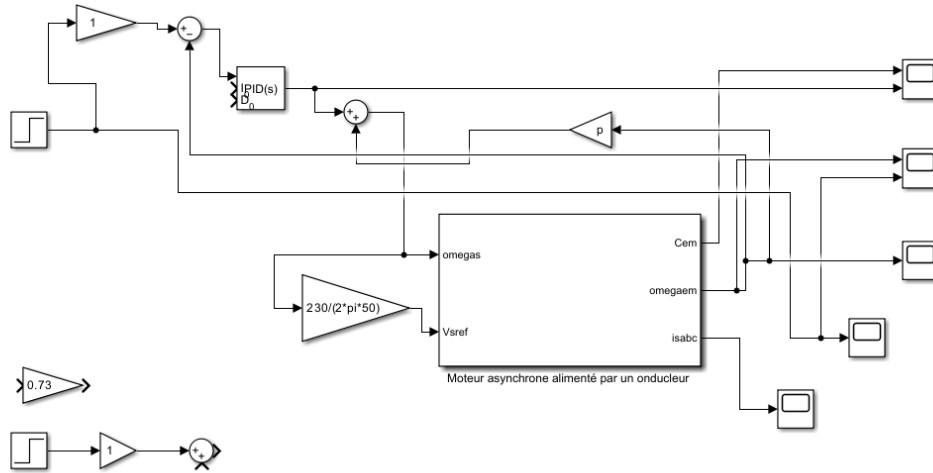


FIGURE 8 – Schéma monphasé équivalent du moteur à induction avec correcteur

Les équations principales de la Machine sont les suivantes :

— **Équation Électrique de l'Induit :**

$$V = E + I_a R_a$$

où  $V$  est la tension d'alimentation de l'induit,  $E$  est la force électromotrice (f.e.m) induite,  $I_a$  est le courant dans l'induit, et  $R_a$  est la résistance de l'induit.

— **Équation de la Force Électromotrice (f.e.m) :**

$$E = K_e \omega$$

où  $K_e$  est la constante électromotrice de la machine, et  $\omega$  est la vitesse angulaire de rotation de l'armature.

— **Équation du Couple Électromagnétique :**

$$T = K_t I_a$$

où  $T$  est le couple électromagnétique, et  $K_t$  est la constante de couple de la machine.

— **Équation Mécanique :**

$$J \frac{d\omega}{dt} = T - T_{\text{load}} - B\omega$$

où  $J$  est le moment d'inertie de l'armature et de la charge,  $\frac{d\omega}{dt}$  est l'accélération angulaire,  $T_{\text{load}}$  est le couple résistant de la charge, et  $B$  est le coefficient de frottement visqueux.

— **Relation entre la vitesse de rotation et la f.e.m :**

$$\omega = \frac{E}{K_e} = \frac{V - I_a R_a}{K_e}$$

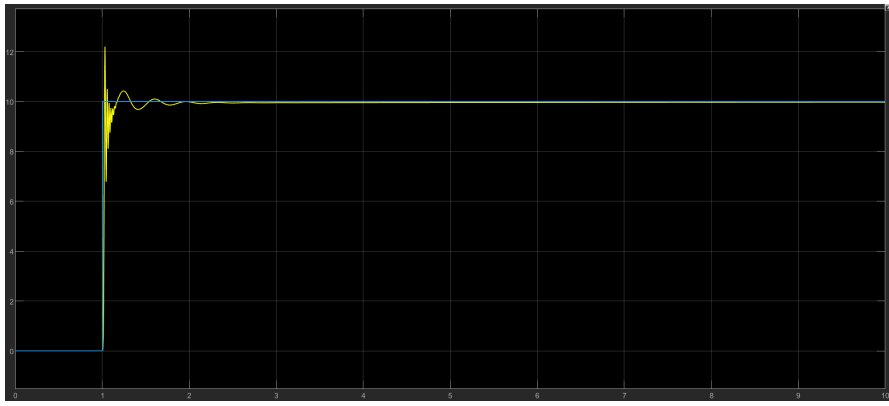


FIGURE 9 – Sortie finale corrigée en vitesse

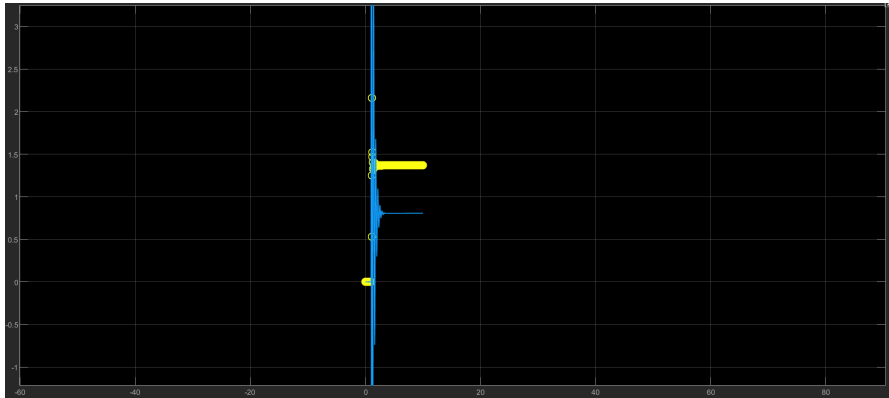


FIGURE 10 – Sortie en couple par rapport à son entrée

La valeur du couple présente quand même un léger écart, comme on le voit dans la figure 10. Nous allons proposer maintenant un modèle muni d'un correcteur qui va permettre d'asservir le système comme on peut le voir sur la figure 8. Malheureusement, par manque de temps, il n'a pas été possible d'asservir le système en position.

## 6 Conclusion

Ce TP en électromécanique a permis une compréhension des caractéristiques et du fonctionnement des machines électriques, en se concentrant particulièrement sur une machine triphasée à induction à rotor bobiné. Nous avons réussi à analyser et interpréter les données de la machine en termes de puissance, de vitesse, et de couple, tout en explorant les implications du schéma équivalent monophasé. La commande en vitesse a été satisfaisante, en revanche, nous n'avons pas pu faire la commande en position par manque de temps. L'utilisation d'un onduleur pour l'alimentation de la machine a également été un point d'étude. Les résultats obtenus ouvrent la voie à des applications plus avancées et à des recherches plus poussées dans le domaine de l'électromécanique.

## 7 Codes Python

```
1 % MotorDat.m*
2 % D finition des param tres pour la simulation du moteur asynchrone
3 % Moteur -----
4 clear;
5 Vsnom=230; %V
6 omega=2*pi*50; %rad.s-1
7 p=2; % nombre de paires de p les
8 Nnom=1390; %tr/min;
9 omeganom=Nnom/60*2*pi; % conversion en rad/s
10 Rs=0.9; %Ohm
11 Lmu=410e-3; %H
12 Rf=1100; % Ohm
13 lr=73e-3; %H
14 Rr=2.5; %Ohm
15 % param tres de simulation (valeurs "vraies" du moteur)
16 Rs_v = 0.9; % Ohm -> r sistance statorique
17 Rr_v = 1.8; % Ohm -> r sistance rotorique
18 Lcr_v = 0.483; % H inductance rotorique
19 k_v = 0.8489; % rapport de transformation rotor/stator
20 lcs_v = 62e-3; % H inductance de fuite ramen e au stator
21 Tr_v = Lcr_v/Rr_v; % constante de temps rotorique
22 Cnom=20; % Couple nominal
23 J=0.006; % inertie m canique du moteur et de la charge
24 fv=Cnom/omeganom; % couple de charge proportionnel la vitesse (vnom= 147 rad/
    s)
25 h=50e-6; % p riode de hachage
26 Vmax=650; % tension d'alimentation de l'onduleur
```

```
1 % MotorDat.m
2 %
3 % D finition des constantes associ es la commande d'un moteur
4 % synchrone
5
6 clear;
7
8 % Moteur -----
9 R = 0.13; % r sistance statorique
10 L = 1.7e-3; % inductance propre stator
11 M = 0.85e-3; % inductance mutuelle stator
12 p=4; % nombre de paires de p les
13 Vmax=530; % Valeur de sortie redresseur triphas aliment sous 220V
14 h=50e-6; % p riode de commutation de l'onduleur
15 fv=0.08; % coefficient de frottement visqueux assurant un couple de
16 % 25 N.m la vitesse nominale de 314 rad.s-1
17 J=0.004; % constante de temps m canique de 50ms
18 % Moteur (valeurs r elles ) -----
19 R_v = 0.13;
20 Lc_v = 2.55e-3;
21 Te_v = Lc_v/R_v;
22 psid0_v = 0.222;
```