

ENRS8AB : Éléments de base du génie électrique

S. Dufour

2A - Département Energie - Année 2024/2025



Sommaire

1	Machine asynchrone	3
1.1	Principe de fonctionnement	3
1.2	Modèle équivalent	3
1.3	Synthèse du modèle	5
1.4	Utilisations du moteur	6
1.5	Moteur asynchrone monophasé	7
1.6	Exercices	9

Introduction et plan de l'enseignement

Le propos de l'enseignement est de décrire l'essentiel de ce qu'il faut savoir des différents objets du génie électrique ainsi que de leurs connexions en vue d'utilisations usuelles. Ce polycopié a été élaboré par G. Vinsard et S. Dufour spécifiquement pour dans ce but.

Il y a sept séances école et une séance de travaux pratiques, correspondant à

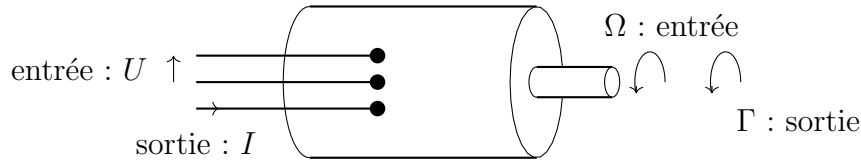
1. les circuits électriques monophasés ; le couplage inductif ;
2. les circuits électriques triphasés équilibrés ;
3. la production, le transport et la consommation d'énergie électrique (modèles de réseaux électriques) ;
4. la transformation de l'énergie électrique (convertisseurs statiques : transformateurs et dispositifs électroniques) ;
5. la machine asynchrone (son fonctionnement du point de vue de l'utilisateur) ;
6. l'alternateur synchrone ;
7. une séance de démonstration (à l'ENSEM) où les objets et leur fonctionnement seront montrés ;

1 Machine asynchrone

Le moteur asynchrone triphasé (justement dénommé induction motor en anglais) est le type de moteur le plus courant de par sa fiabilité, son entretien faible et sa simplicité de mise en œuvre.

1.1 Principe de fonctionnement

Le but n'est pas ici d'explicitier la genèse du modèle électromécanique du moteur asynchrone, mais de donner son modèle externe d'un point de vue utilisateur. L'utilisateur maîtrise la tension d'entrée et la vitesse de la machine. Le modèle équivalent donne le courant et le couple en fonction de la tension et de la vitesse.



Tout mouvement relatif d'un cadre par rapport à un champ magnétique crée des courants induits dans le cadre. Il s'exerce un couple (action entre le champ et les courants induits) qui tend à amener le cadre dans une direction perpendiculaire au champ. *Ce principe est utilisé pour le moteur asynchrone.*

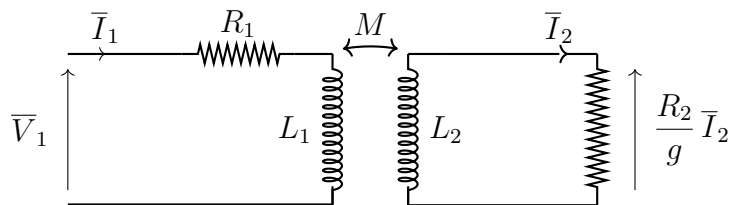
Les conducteurs du stator (partie fixe) sont alimentés par des tensions triphasées équilibrées. La périodicité géométrique de chaque phase est p , également appelé nombre de paires de pôles.

Les conducteurs du rotor (partie mobile) sont court-circuités. Ces conducteurs sont soit des barres reliées entre elles par des anneaux de court-circuit (rotor à cage), soit des enroulements reliés de chaque côté en étoile décalés de $2\pi/3$ (rotor bobiné).

De par le décalage temporel de l'alimentation statorique, le champ magnétique du stator est qualifié de "tournant". Sa "vitesse" de rotation est équivalente à ω/p . La vitesse rotorique Ω est légèrement inférieure à ω/p . Le glissement $g = 1 - p\Omega/\omega$ (calculé en %) est une grandeur utile pour le schéma équivalent.

1.2 Modèle équivalent

Le modèle monophasé équivalent classique du moteur asynchrone triphasé est :



où 1 désigne les grandeurs statoriques et 2 les grandeurs rotoriques, R les résistances d'une phase, L les inductances cycliques, M la mutuelle stator-rotor, V_1 la tension d'alimentation de phase, et (I_1, I_2) les courants de phase statoriques et rotoriques.

Ce modèle correspond directement à celui d'un moteur à rotor bobiné. Il est également utilisé pour les moteurs à cage en se ramenant à des grandeurs équivalentes.

Ce modèle est qualifié de "transformateur à champ tournant" de par sa proximité avec celui d'un transformateur.

Les équations correspondantes sont :

$$\begin{cases} \bar{V}_1 &= (R_1 + jL_1\omega)\bar{I}_1 - jM\omega\bar{I}_2 \\ 0 &= jM\omega\bar{I}_1 - \left(\frac{R_2}{g} + jL_2\omega\right)\bar{I}_2 \end{cases}$$

En pratique la résistance R_1 est négligée pour les moteurs à partir de quelques kW , ce qui simplifie les équations. Dans ce cas :

$$\begin{pmatrix} \bar{I}_1 \\ -\bar{I}_2 \end{pmatrix} = \frac{\bar{V}_1}{(M^2 - L_1L_2)\omega^2 + j\frac{R_2}{g}L_1\omega} \begin{pmatrix} \frac{R_2}{g} + jL_2\omega \\ -jM\omega \end{pmatrix}$$

Puissances

La puissance apparente est alors :

$$\bar{S} = P_a + jQ = 3\bar{V}_1\bar{I}_1^* = 3\left(\frac{R_2}{g}|\bar{I}_2|^2\right) + j3\left(L_1\omega|\bar{I}_1|^2 - L_2\omega|\bar{I}_2|^2\right)$$

Comme les pertes Joule du moteur sont :

$$P_j = 3R_2|\bar{I}_2|^2$$

la puissance mécanique P_m *théorique* disponible sur l'arbre est

$$P_m = P_a - P_j = 3R_2|\bar{I}_2|^2 \left(\frac{1-g}{g}\right)$$

le rendement *théorique* (majorant du rendement réel) est :

$$\eta_{th} = 1 - g > \eta = \frac{P_m}{P_a}$$

En exprimant le courant $\bar{I}_2$ en fonction de $\bar{V}_1$, et après simplifications la puissance mécanique s'exprime comme :

$$P_m = (1-g)P_a = \frac{3p\Omega}{\omega} \left(\frac{M\omega}{L_1\omega}\right)^2 |\bar{V}_1|^2 \frac{R_2}{\frac{R_2^2}{g} + (\sigma L_2\omega)^2 g}$$

avec σ qui désigne le coefficient de dispersion :

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_1L_2}$$

Couple

En posant :

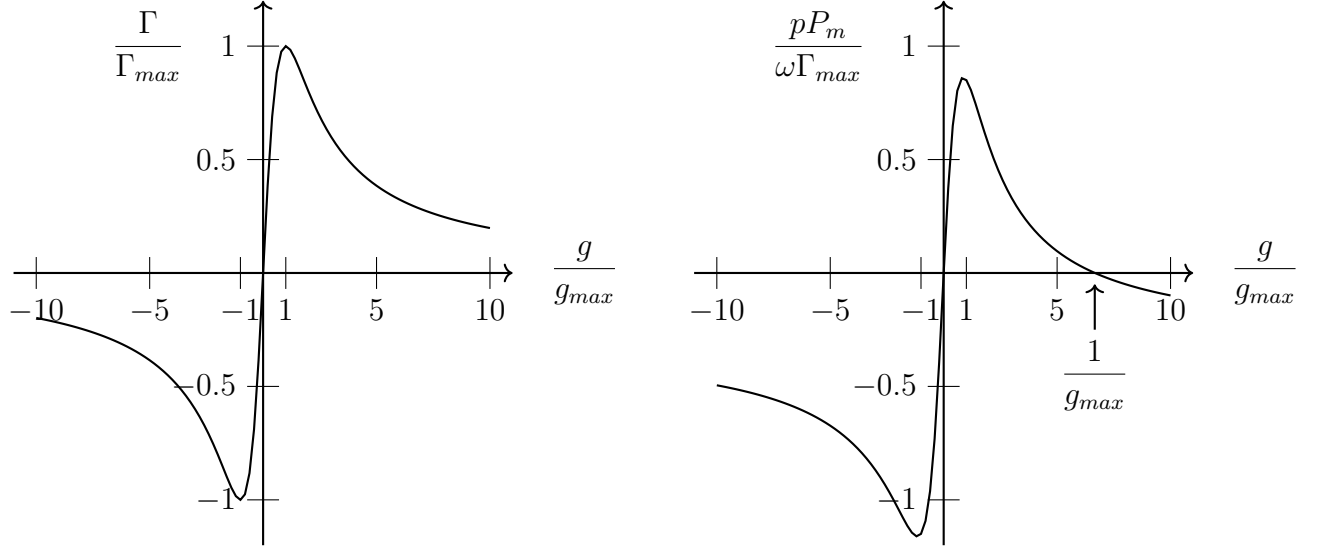
$$g_{max} = \frac{R_2}{\sigma L_2\omega} \quad \Gamma_{max} = \frac{3p}{2\omega} \left(\frac{M}{L_1}\right)^2 \frac{|\bar{V}_1|^2}{\sigma L_2\omega} = \frac{3p}{2\omega} (1-\sigma) \frac{|\bar{V}_1|^2}{\sigma L_1\omega}$$

on obtient le couple à partir de la puissance mécanique sous la forme :

$$\Gamma = \frac{P_m}{\Omega} = p \frac{P_a}{\omega} = \frac{2\Gamma_{max}}{\frac{g}{g_{max}} + \frac{g_{max}}{g}}$$

On peut distinguer trois fonctionnements possibles (figure suivante) :

- moteur ($\Gamma > 0, \Omega > 0$) pour $g \in [0, 1]$ soit $\Omega \in [0, \omega/p]$. Cela correspond à $P_m > 0$ et $P_a > 0$: la machine fournit de la puissance mécanique et reçoit du réseau de la puissance électrique (convention moteur). Le rendement théorique est $\eta = P_m/P_a = 1 - g$.
- génératrice ($\Gamma < 0, \Omega > 0$) pour $g < 0$ soit $\Omega > \omega/p$. Cela correspond à $P_m < 0$ et $P_a < 0$: la machine reçoit de la puissance mécanique et transmet au réseau de la puissance électrique. Le rendement théorique est $\eta = P_a/P_m = 1/(1 - g)$.
- frein ($\Gamma > 0, \Omega < 0$) pour $g > 1$ soit $\Omega < 0$. Cela correspond à $P_m < 0$ et $P_a > 0$: la machine reçoit de la puissance mécanique de l'arbre et de la puissance électrique du réseau. Le rendement théorique est $\eta = -P_m/(P_a - P_m) = 1 - 1/g$.



Le fonctionnement de la machine en régime permanent est stable si à tout écart de vitesse correspond un écart de couple qui ramène la machine à sa vitesse initiale, soit (si Γ_{ch} désigne le couple de charge) :

$$\frac{d\Gamma}{d\Omega} - \frac{d\Gamma_{ch}}{d\Omega} < 0 \quad \text{ou} \quad \frac{d\Gamma}{dg} - \frac{d\Gamma_{ch}}{dg} > 0$$

Pour un couple de charge constant, le fonctionnement est donc stable pour $-g_{max} < g < g_{max}$, ainsi qu'en mode frein.

Le courant statorique est :

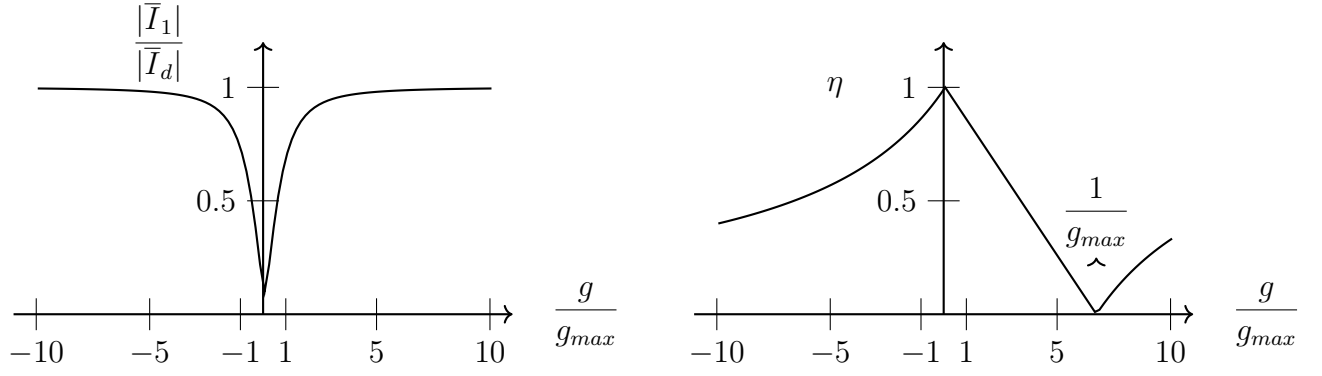
$$|\bar{I}_1| = \frac{|\bar{V}_1|}{\sigma L_1 \omega} \sqrt{\frac{\sigma^2 + \left(\frac{g}{g_{max}}\right)^2}{1 + \left(\frac{g}{g_{max}}\right)^2}} \simeq |\bar{I}_d| \sqrt{\frac{\sigma^2 + \left(\frac{g}{g_{max}}\right)^2}{1 + \left(\frac{g}{g_{max}}\right)^2}}$$

Cela permet de comparer le courant de démarrage au courant d'utilisation de la machine : le courant de démarrage est très supérieur au courant nominal de la machine. La machine en marche normale est utilisée pour de faibles glissements : le rendement nominal est proche de 1.

1.3 Synthèse du modèle

Le glissement est lié à la vitesse par :

$$g = \frac{\omega/p - \Omega}{\omega/p} \quad \leftrightarrow \quad \Omega = \frac{\omega}{p}(1 - g)$$



le couple s'obtient comme :

$$\Gamma = \frac{2\Gamma_{max}}{\frac{g}{g_{max}} + \frac{g_{max}}{g}}$$

avec

$$g_{max} = \frac{R_2}{\sigma L_2 \omega} \quad \Gamma_{max} = \frac{3p}{2\omega} \left(\frac{M}{L_1} \right)^2 \frac{|\bar{V}_1|^2}{\sigma L_2 \omega} = \frac{3p}{2\omega} (1 - \sigma) \frac{|\bar{V}_1|^2}{\sigma L_1 \omega}$$

Les puissances sont déterminées par :

$$P_m = \Gamma \Omega \quad P_a = 3\mathcal{R}e(\bar{V}_1 \bar{I}_1^*)$$

Pour un moteur, le rendement est :

$$\eta = \frac{P_m}{P_a} < \eta_{th} = 1 - g$$

En pratique le rendement est inférieur à $1 - g$, du fait des pertes Joule statoriques, des pertes fer (non présentées dans le modèle), et des pertes mécaniques de l'arbre tournant.

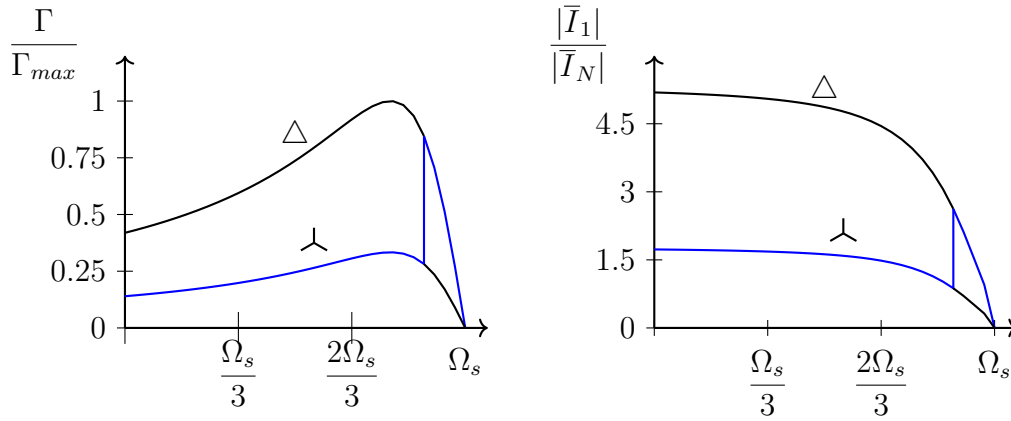
1.4 Utilisations du moteur

Vitesse fixe

Le moteur est branché tel que au réseau triphasé (BT pour une puissance inférieure à $130kW$, HTA pour des puissances inférieure à $10MW$). Sa vitesse de rotation est quasiment fixe : elle est comprise entre sa vitesse nominale (pour un couple nominal) et sa vitesse de synchronisme (ω/p , pour un couple nul), soit une variation de quelques pour-cent. Pour un réseau $50Hz$, les vitesses courantes sont $3000 - 1500 - 1000 tr/mn$.

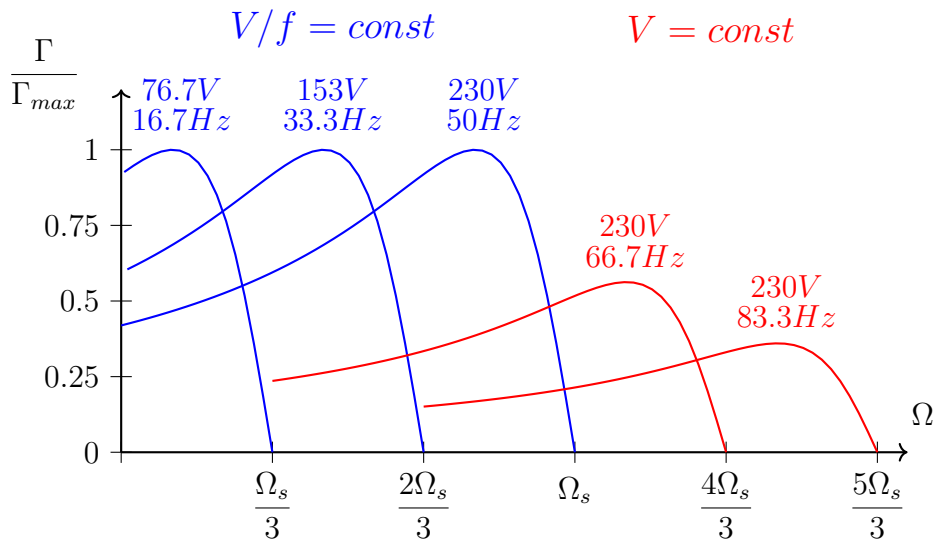
Au démarrage les courants transitoires sont de l'ordre de 7 le courant nominal sous tension nominale. Différentes stratégies sont utilisées pour limiter le courant de démarrage :

- abaissement de la tension statorique par autotransformateur (fortes puissances), grateur (harmoniques de courants, puissances inférieures à $500kW$) : le courant est proportionnel à U , le couple à U^2
- abaissement de la tension statorique par insertion de résistance (BT) ou d'inductance (HTA)
- augmentation de la résistance rotorique (insertion de résistances pour un moteur à rotor bobiné ou double cage rotorique).
- changement du nombre de pôles (faibles puissances)
- changement de couplage des enroulements statoriques étoile-triangle (puissances inférieures à $500kW$)



Vitesse variable

Pour les applications à vitesse variable un redresseur/onduleur est inséré entre le réseau et le moteur. La commande la plus classique est dite scalaire ou à flux constant $V/f = V_n/50$ (où V_n désigne la tension nominale). En abaissant la fréquence, le moteur fonctionne toujours dans la partie stable de la caractéristique couple-vitesse. Comme le couple maximum reste constant quelle que soit la fréquence pour cette commande, cela est adapté à des applications nécessitant un couple de démarrage élevé. Les applications ne doivent pas nécessiter des performances dynamiques élevées (pompes, ventilateurs). Il est également possible de dépasser la fréquence de 50Hz en maintenant la tension à V_n : le flux diminue, et l'on parle de défluxage de la machine. Le couple maximum diminue alors.



Est également utilisée la commande vectorielle. Le principe est de se ramener dans le plan de phase à des courants qui se décomposent suivant deux axes perpendiculaires, pour contrôler efficacement le couple. Les performances dynamiques sont meilleures. Si un capteur de position est apposé, la commande de vitesse est effective dès le démarrage.

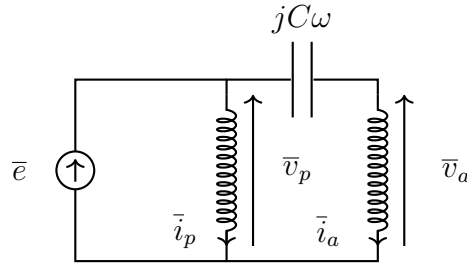
1.5 Moteur asynchrone monophasé

Le principe de fonctionnement est globalement identique à celui du moteur triphasé : le champ statorique crée des courants induits dans des enroulements rotoriques en court-circuit.

Deux enroulements au stator sont alimentés par un système diphasé de tension : ces tensions déphasées de $\pi/2$ dans l'espace de phase. Leur correspondent deux enroulements

rotoriques en court-circuit, ce qui permet un mouvement continu du rotor. Le déphasage entre les deux tensions est réalisé grâce à un condensateur, ce qui permet d'utiliser une même source de tension monophasée. L'enroulement principal (noté p) est connecté directement à la source de tension, l'enroulement auxiliaire (noté a) est mis en série avec le condensateur.

Pour faciliter le démarrage, et diminuer les courants statoriques au démarrage, on insère en parallèle de ce condensateur permanent, un condensateur de démarrage. Ce condensateur de démarrage est mis hors-tension en régime permanent.



- [1] B. Laporte “Machines électriques tournantes”, Ellipses, 2007.
- [2] J. Bonal “Utilisation industrielle des moteurs à courant alternatif”, Tec&Doc, 2002.
- [3] P. Mayé “Moteurs électriques industriels”, Dunod, 2021.

1.6 Exercices

Moteur asynchrone triphasé

La plaque signalétique d'un moteur fournit les données suivantes :
Moteur triphasé fermé *IP55* 400 V, 4 pôles, 50 Hz monté en triangle classe *F* - Service *S1*

Puissance	110 kW
Vitesse	1484 tr/mn
Couple	708 N.m
Courant (de ligne)	197 A
$\cos \varphi$	0.85
Rendement	94.8 %
Courant de démarrage	$I_d/I_N = 7$
Couple de décrochage	$\Gamma_m/\Gamma_N = 2.6$
Masse	670 kg

a) Calculer les puissances mécaniques, active et réactive, les pertes Joule rotoriques à partir des autres données.

b) Calculer le glissement maximum. Tracer le couple en fonction du glissement. Graduer les abscisses également en fonction de la vitesse.

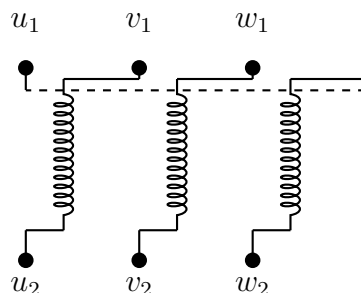
c) Tracer sur la caractéristique couple moteur fonction du glissement, le couple de charge fonction du glissement pour des charges de type $\Gamma = \Gamma_N$, $\Gamma = \alpha\Omega$, $\Gamma = \beta\Omega^2$ avec α et β choisis tels qu'ils passent par le point (g_N, Γ_N) .

d) Le moteur entraîne une charge de caractéristique mécanique $\Gamma = \alpha\Omega$. A vitesse nominale, le couple de charge correspond au couple nominal du moteur. Calculer le couple de charge pour 1000tr/mn.

Pour faire varier la vitesse on préconise une commande en V/f . Commenter l'intérêt. Calculer la fréquence d'alimentation pour avoir une vitesse de l'ensemble moteur-charge de 1000tr/mn. Tracer pour cette fréquence la caractéristique du couple en fonction du glissement.

En déduire le couple de la machine à vitesse nominale si la variation de fréquence est instantanée.

e) Calculer le couple, et l'impédance équivalente au démarrage en supposant que le moteur est couplé en triangle.



f) Les borniers des trois phases notées (u, v, w) sont représentés sur la figure précédente. Indiquer les connexions entre u_1, v_1, w_1 et u_2, v_2, w_2 pour les couplages étoile et triangle. Commenter l'intérêt d'un démarrage du moteur avec un couplage en étoile.

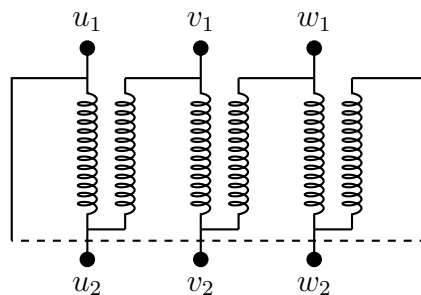
g) Pour avoir le point de fonctionnement à 1000 tr/mn , on suppose que l'on puisse faire varier la résistance rotorique. Calculer la nouvelle valeur de la résistance rotorique pour ce point, les pertes Joule et un majorant du rendement. Conclure. Commenter l'intérêt de l'augmentation de la résistance rotorique lors d'un démarrage du moteur.

Moteur asynchrone triphasé multi-vitesses

Le changement de polarité d'un moteur permet d'avoir des vitesses de synchronisme différentes, donc des vitesses de fonctionnement différentes. La plaque signalétique d'un moteur bi-vitesse 4 pôles/2 pôles fournit les données suivantes :

	$P \text{ (kW)}$	$\Omega \text{ (tr/mn)}$	$\cos \varphi$	$I \text{ (A)}$	I_d/I	Γ_d/Γ	Γ_m/Γ	$m \text{ (kg)}$	$J \text{ (g.m}^2\text{)}$
PV	2.6	1440	0.8	5.85	6.1	1.7	2.5	30	7.25
GV	3.1	2900	0.87	6.8	7.3	1.6	2.6		

Chaque phase comporte deux enroulements. Ceux-ci sont mis en série et les phases sont couplées en triangle pour la petite vitesse, en parallèle avec couplage des phases en étoile pour la grande vitesse.



a) Indiquer les connexions entre u_1, v_1, w_1 et u_2, v_2, w_2 pour la petite vitesse et la grande vitesse. Sachant que le couple est proportionnel dans ce cas au nombre de paires de pôles fois la tension d'un enroulement, indiquer le rapport théorique de Γ_{GV}/Γ_{PV} et P_{GV}/P_{PV} . Comparer par rapport aux valeurs pratiques.

b) Tracer le couple en fonction de la vitesse pour la petite et la grande vitesse. Commenter l'intérêt au démarrage et à l'arrêt.

c) Calculer les couples de démarrages théoriques. Les comparer aux valeurs de la plaque signalétique.

Moteur asynchrone monophasé

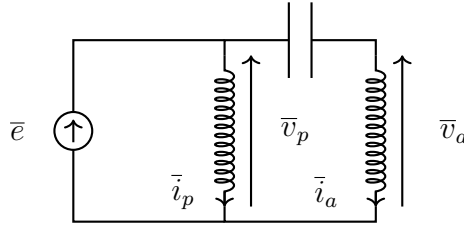
Le moteur est constitué d'un enroulement principal et d'un enroulement auxiliaire au stator. La tension de l'enroulement auxiliaire $\bar{v}_a$ est déphasée par rapport à celle de l'enroulement principal $\bar{v}_p$ à l'aide d'un condensateur $-jx$. Les deux enroulements du rotor sont en

court-circuit. Pour des glissements proches du glissement nominal, les flux des enroulements principaux et auxiliaires sont :

$$\begin{pmatrix} \bar{\varphi}_p \\ \bar{\varphi}_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_p - j\alpha L_{pr}^2 & \beta L_{pr} L_{ar} \\ \beta L_{pr} L_{ar} & L_a - j\alpha L_{ar}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{i}_a \end{pmatrix}$$

où $L_p, L_a, L_r, L_{pr}, L_{ar}$ désignent respectivement les inductances propres des enroulements principal, auxiliaire, rotorique et mutuelles principal-rotorique et auxiliaire-rotorique. $\alpha = (1 - 3j)/4L_r$ et $\beta = (1 + j)/(4L_r)$. Le couple moyen est :

$$\Gamma = \frac{1}{4L_r} \left(L_{pr}^2 |\bar{i}_p|^2 + L_{ar}^2 |\bar{i}_a|^2 - 2L_{ar} L_{pr} \Im(\bar{i}_a \bar{i}_p^*) \right)$$



a) Déterminer les courants $\bar{i}_p, \bar{i}_a$ pour une tension de la source sinusoïdale (50 Hz) de valeur efficace $|\bar{e}| = 230V$. ($R_p = 0.6\Omega, L_p = 0.1H, R_a = 3.4\Omega, L_a = 0.22H, L_{pr} = 0.65mH, L_{ar} = 1mH, R_r = 3.3 \cdot 10^{-5}\Omega, L_r = 5 \cdot 10^{-6}H, -jx = -76j$).

b) Calculer le couple et le rendement du moteur pour un glissement de 2.25%.