

Session S3
Génie électrique

Électrotechnique
Unité APP 5

Machines électriques tournantes

Département de génie électrique et de génie informatique
Faculté de génie
Université de Sherbrooke

Été 2023

Tous droits réservés © 2018, 2023 Département de génie électrique et de génie
informatique, Université de Sherbrooke

Guide de l'étudiant

Note : En vue d'alléger le texte, le masculin est utilisé pour désigner les femmes et les hommes.

Document S3E_APP5.docx

Version 6, 6/27/23

Mise à jour par Minh C. Ta – Été 2021, Automne 2021, Été 2022, Été 2023

Document préparé par Serge A. Kodjo, João P. Trovão et Maxime Dubois

Copyright © 2018, 2023

Table des matières

1- Éléments de compétence de la session S3 visés par l'unité.....	4
2- Énoncé de la problématique.....	5
3- Connaissances nouvelles à acquérir par la résolution de cette problématique	19
4- Références obligatoires à consulter	20
5- Activités liées à la problématique et au laboratoire	28
6- Livrables	29
7- Formation à la pratique procédurale #1 (1 ^{ère} semaine)	31
7.1- Énoncés des problèmes à résoudre	31
8- Formation à la pratique procédurale #2 (2 ^e semaine).....	34
8.1- Énoncés des problèmes à résoudre	34
9- Formation à la pratique procédurale #3 (3 ^e semaine).....	36
9.1- Énoncés des problèmes à résoudre	36
10- Évaluation.....	38
10.1- Rapport de la problématique.....	39
10.2- Compte-rendu de Laboratoire.....	40
10.3- Examens.....	40
11- Utilisation des téléphones cellulaires, iPod et ordinateurs.	41

1- Éléments de compétence de la session S3 visés par l'unité

GEL-345 Machines électriques tournantes

1. Évaluer la performance des machines électriques tournantes;
2. Choisir un moteur en fonction des caractéristiques et spécifications de l'application visée.

GEL-362 Thermique

1. Appliquer les notions d'échange de chaleur au refroidissement des dispositifs et des systèmes en électrotechnique.

2- Énoncé de la problématique

Moteurs de véhicule électrique monoplace

Mise en contexte

Votre équipe de 3 personnes doit faire le choix d'une motorisation appropriée pour un véhicule électrique monoplace. Le véhicule électrique que l'on vous soumet possède les paramètres suivants :

- surface frontale A [m^2];
- coefficient de trainée aérodynamique C_d ;
- coefficient de résistance au roulement $k_r = 0,004$;
- masse totale maximale m_t [kg];
- rayon de la roue $d_{roue} = 0,2$ m;
- vitesse maximale du véhicule $v_{max} = 60$ km/h.

La motorisation électrique que vous devez sélectionner est constituée de deux moteurs électriques placés sur l'essieu arrière du véhicule (propulsion arrière). Le premier de ces deux moteurs actionne la roue arrière gauche et le second de ces deux moteurs, identique au premier, actionne la roue arrière droite. Dans l'analyse de cette motorisation, votre équipe doit prendre en considération les forces suivantes agissant sur le véhicule (voir annexe A) :

- force de trainée aérodynamique (due à la friction de l'air);
- force de résistance au roulement (due au frottement des pneus sur la route);
- force d'accélération demandée par le conducteur.

Votre équipe recevra trois paramètres de véhicule, qui seront uniques à l'équipe. Ces paramètres sont : la surface frontale A , le coefficient de trainée aérodynamique C_d et la masse totale du véhicule m_t .

Description de votre mandat

Les éléments du mandat à intégrer au rapport sont identifiés en caractère italique dans le texte.

Dans cette problématique, deux types de moteur électrique doivent être considérés : moteur asynchrone à cage d'écureuil et moteur à courant continu. Vous devez donc effectuer une analyse comparative de la performance d'une motorisation asynchrone et d'une motorisation à courant continu (CC). Votre comparaison devra être appuyée par une analyse théorique des rendements de puissance et des puissances consommées pour des vitesses de véhicule v_{max} , ainsi que $0,8v_{max}$, $0,6v_{max}$, $0,4v_{max}$ et $0,2v_{max}$.

- **Puissance motrice en fonction de la vitesse et accélération.**

En utilisant Excel ou Matlab, vous pouvez *tracer la courbe de la force résistive en fonction de la vitesse*. La force résistive est la somme de la force de frottement aérodynamique et de la force de résistance au roulement. *On déterminera alors le couple et la puissance mécanique (en watt et en HP) que devra fournir chaque moteur pour chacune de ces vitesses, afin de vaincre cette force résistive.*

Ensuite, *déterminez le temps que mettra le véhicule pour passer de 0 à 60 km/h dans le cas d'une motorisation asynchrone et dans le cas d'une motorisation à courant continu*, sachant que le couple du moteur ne peut pas excéder sa valeur de couple nominal. On rappelle que la puissance nominale de la machine est la puissance qu'elle développe avec son couple nominal lorsqu'elle tourne à sa vitesse nominale.

- **Analyse de performance du moteur asynchrone (Semaine 1)**

Si les moteurs asynchrones étaient envisagés pour le véhicule, chacun de ces deux moteurs asynchrones serait alimenté par une batterie $V_{batt} = 350 \text{ Vcc}$ reliée à un onduleur de tension, permettant de convertir la tension V_{batt} en une tension sinusoïdale de valeur efficace E_{Seff} et de fréquence f , afin d'alimenter le moteur asynchrone, tel qu'illustré à la figure 1. Pour établir la performance de cette motorisation, vous devez *déterminer de façon expérimentale le schéma équivalent de la machine asynchrone disponible au laboratoire (pour les réactances de fuites, on considère : $X_1 = X_2$)*. Pour ce faire, les essais suivants doivent être effectués en laboratoire : essai à vide et essai à rotor bloqué ; mesure de la résistance du stator ; mesure des pertes mécaniques. Vous devez absolument préparer ces essais avant d'arriver au laboratoire, par la lecture préalable de la section 35.10 du livre Wildi. Pour la mesure des pertes mécaniques, on se référera à l'annexe B de ce guide, qui décrit l'essai à effectuer.

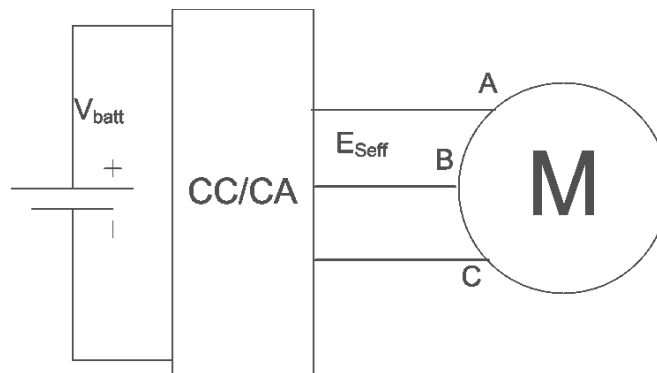


Figure 1 : Configuration batterie-onduleur-moteur asynchrone.

En se basant sur le schéma électrique équivalent et sur l'expression mathématique du couple moteur T de la machine asynchrone qui sont présentés dans le guide de l'étudiant en fonction du glissement s , *on déterminera* :

- la tension efficace E_{seff} ,
- la fréquence f ,
- le glissement s requis,
- le courant de phase statorique I ,
- le facteur de puissance FP à l'entrée du moteur,
- le rendement η de chacun des deux moteurs.

permettant de maintenir le véhicule à chacune des vitesses constantes v_{max} , ainsi que $0,8v_{\text{max}}$, $0,6v_{\text{max}}$, $0,4v_{\text{max}}$ et $0,2v_{\text{max}}$. Dans cette analyse, vous devrez également tenir compte des pertes mécaniques dans le moteur asynchrone dues au frottement visqueux de l'air et à la friction dans les roulements à billes. L'expression du **couple** développé par la machine pour vaincre ces pertes mécaniques est fournie à l'annexe B.

Important: considérer que le rapport E_{seff}/n_s est gardé constant. Cette méthode est fréquemment utilisée afin de ne pas saturer le circuit magnétique de la machine.

- **Analyse de performance du moteur à courant continu (CC) (Semaine 2)**

Dans le cas où les moteurs à courant continu étaient choisis, chacun des deux moteurs CC du véhicule sera alimenté par une batterie $V_{\text{batt}} = 350 \text{ Vcc}$ connectée à un hacheur de tension CC/CC. Le hacheur de tension convertit la tension V_{batt} en une tension continue $V_{\text{induit_DC}}$ de valeur ajustable et inférieure à V_{batt} . Le hacheur permet donc d'alimenter le moteur CC à tension variable, tel qu'illustré à la figure 2.

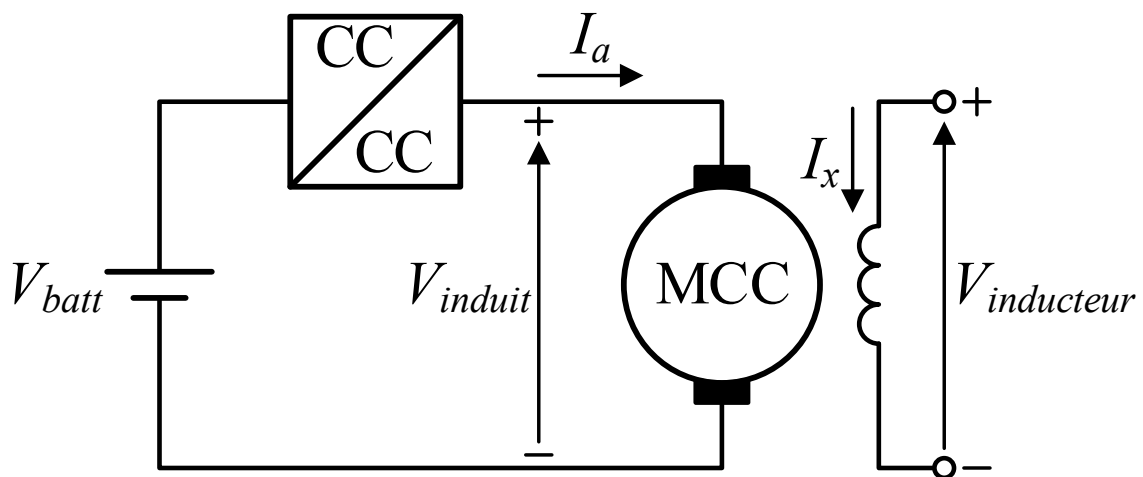


Figure 2 : Configuration batterie-hacheur-moteur à courant continu.

La configuration du moteur CC illustrée sur cette figure est appelée « Machine à Courant Continu à Excitation Séparée ». Dans cette application, vous devez choisir une seule valeur de tension $V_{\text{inducteur_DC}}$ qui sera la même pour toutes les vitesses du véhicule. Toutefois, la valeur de $V_{\text{inducteur_DC}}$ ne vous est pas fournie. Vous devrez choisir $V_{\text{inducteur_DC}}$ de manière à minimiser les pertes dans la machine.

Votre mandat consiste également à *déterminer* :

- la tension $V_{\text{induit_DC}}$ pour chacune des 5 vitesses de véhicule;
- le courant d'induit pour chacune des 5 vitesses de véhicule;
- le rendement η des moteurs à CC pour chacune des 5 vitesses de véhicule.

Dans cette analyse, vous devrez également tenir compte des pertes mécaniques dans le moteur à CC dues aux frictions (des balais et les roulements à billes) et au frottement visqueux de l'air. L'expression du **couple** développé par la machine pour vaincre ces pertes mécaniques est fournie à l'annexe B.

Pour remplir votre mandat, vous devez d'abord *déterminer par des mesures expérimentales, le schéma équivalent de la machine à courant continu disponible au laboratoire*. La détermination du schéma équivalent passe par les mesures expérimentales suivantes : mesure de la résistance de l'enroulement inducteur ; mesure de la résistance de l'induit. Pour effectuer cette dernière, on procèdera dans un premier temps à la mesure de la caractéristique à vide $E_0(I_x)$ de la machine CC lorsqu'elle est utilisée en génératrice entraînée par un moteur asynchrone. On notera la vitesse de rotation n du moteur à l'aide d'un tachymètre. Dans un deuxième temps, on procèdera en faisant un essai en court-circuit sur la machine CC entraînée en génératrice par la machine asynchrone (voir annexe C).

- **Recommandation finale**

En prenant en considération le rendement global calculé sur le profil de vitesse d'un cycle d'analyse fourni à l'annexe D, *faites une recommandation sur le meilleur choix de moteur pour ce véhicule électrique*.

Supplément : Fonctionnement d'un entraînement industriel/ Identification des paramètres d'une machine synchrone à rotor bobiné (3^e séance de laboratoire) – voir annexe E.

Annexe A

Notes mathématiques obligatoires :

Force de frottement aérodynamique d'un véhicule F_a

La force de frottement aérodynamique est égale à

$$F_a = \frac{\rho_{air}}{2} C_d A v^2$$

Où $\rho_{air} = 1,2 \text{ kg/m}^3$ est la densité de l'air et v est la vitesse du véhicule en $[\text{m/s}]$.

Force de résistance au roulement F_r d'un véhicule

La force de résistance au roulement est égale à

$$F_r = k_r m_t g$$

Force d'accélération F_i

La force d'accélération demandée par le conducteur est égale à

$$F_i = m_t a$$

Où m_t = masse totale du véhicule en $[\text{kg}]$, et a est l'accélération demandée par le conducteur en $[\text{m/s}^2]$.

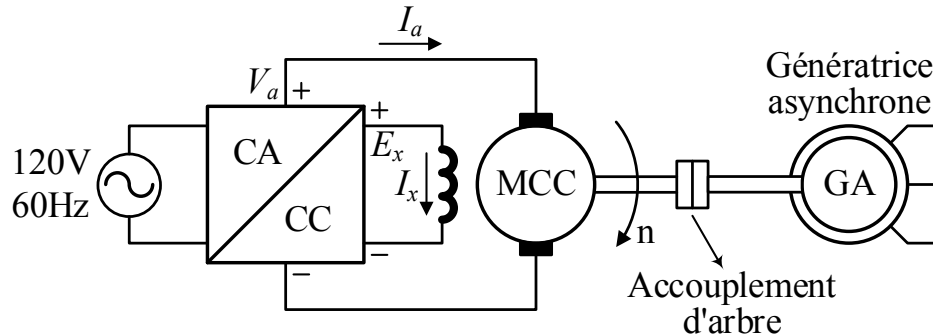
Annexe B

Procédure pour mesurer les pertes mécaniques (pertes rotationnelles) dans la machine asynchrone

On mesurera les pertes mécaniques dues au frottement visqueux de l'air et à la friction dans les roulements à billes dans la machine asynchrone, en faisant comme suit :

Pertes rotationnelles de la machine asynchrone

On fait tourner le moteur à CC alimenté avec une tension V_a variant de 0 à 125 V CC générée par le convertisseur CA/CC Lab-Volt à la vitesse n égale à 1800 RPM. Cette vitesse pourra être ajustée en modifiant la tension V_a . On détermine les pertes par ventilation et friction (pertes rotationnelles P_{rot}) de la machine asynchrone à partir de la différence de la mesure de puissance consommée par le moteur CC lorsque celui-ci tourne seul et lorsqu'il est couplé mécaniquement à la machine asynchrone. Pour cela, on mesurera dans les deux cas pour $n=1800$ RPM la tension d'induit V_a et le courant d'induit I_a du moteur CC. On répète l'expérience pour n égale à 900 RPM.



Moteur CC seul (sans charge mécanique) à $n=1800$ RPM

n	V_{a1}	I_{a1}
1799RPM	125.80V	0.404A

Moteur CC couplé mécaniquement à la machine asynchrone à $n=1800$ RPM

n	V_{a2}	I_{a2}
1795RPM	122.50V	0.438A

Annexe B (suite)

Moteur CC seul (sans charge mécanique) à $n = 900$ RPM

n	V_{a1}	I_{a1}
913.70RPM	66.30V	0.342A

Moteur CC couplé mécaniquement à la machine asynchrone à $n = 900$ RPM

n	V_{a2}	I_{a2}
913.40RPM	66.90V	0.372A

On en déduit les pertes mécaniques et le couple des pertes mécaniques pour les 2 vitesses.

Machine Asynchrone

n (RPM)	ω (rad/s)	P_{rot} (W)	T_p (N.m)
900	915.67	2.2122	0.023
1800	188.18	2.8318	0.015

Mesures des pertes mécaniques (pertes rotationnelles) dans la machine à courant continu.

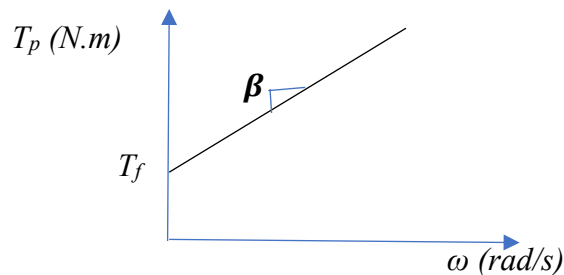
À partir des expériences précédentes, lorsque la machine à courant continu tourne seule on peut déduire les pertes mécaniques ou pertes rotationnelle (P_{rot}) en négligeant les pertes magnétiques (les pertes fer) dans la machine à courant continu. On déduit ensuite le couple des pertes mécaniques T_p

Machine à courant continu

n (RPM)	ω (rad/s)	P_{rot} (W)	T_p (N.m)
900	95.68	22.67	0.237
1800	188.39	50.83	0.269

Pour la machine asynchrone et pour la machine à courant continu : relation entre couple des pertes mécaniques et la vitesse de rotation ω (en rad/s)

Couple des pertes mécaniques en N.m : $T_p = T_f + \beta \omega$



Annexe B (suite et fin)

Couple des pertes mécanique en N.m : $T_p = T_f + \beta \omega$

Couple des pertes par friction : T_f

Couple des pertes par frottement visqueux de l'air : $\beta \omega$

Coefficient de frottement visqueux : β

Paramètres des couples de pertes mécaniques

Machines	T_f (N.m)	β (N.m.s/rad)
M. asynchrone	0.0313	-0.00009
M. à courant continu	0.204	0.0003

Annexe C

Procédure pour l'essai en court-circuit de la machine à CC

Réduire la valeur du courant de champ I_x à 0. Entraîner la machine à CC en générateur, en utilisant la machine asynchrone en moteur. Varier le courant de champ I_x de la machine à CC, jusqu'à obtenir une valeur de courant d'induit de la machine CC $I_a = I_{\text{nominal}}$. Mesurer le courant d'induit I_{a2} , le courant de champ I_{x2} et la vitesse d'entraînement n_2 de la machine à CC.

Machine CC en génératrice

I_{a2}	I_{x2}	n_2
I_{nominal}	0.085 A	872.9 rpm

Annexe D

Profil de vitesse sur un cycle d'analyse

	0,2vmax	0,4vmax	0,6vmax	0,8vmax	vmax
Vitesse en (km/h)	12	24	36	48	60
Pourcentage de temps sur un cycle d'analyse (%)	5	5	10	30	50

Note : les durées pour les accélérations et les décélérations sont négligées sur ce profil. Votre étude sera faite en régime statique.

Annexe E

GEL345 Machine électriques tournantes | Université de Sherbrooke | été 2023

3^e Session de Laboratoire

Fonctionnement d'un entraînement industriel

Identification des paramètres d'une machine synchrone à rotor bobiné

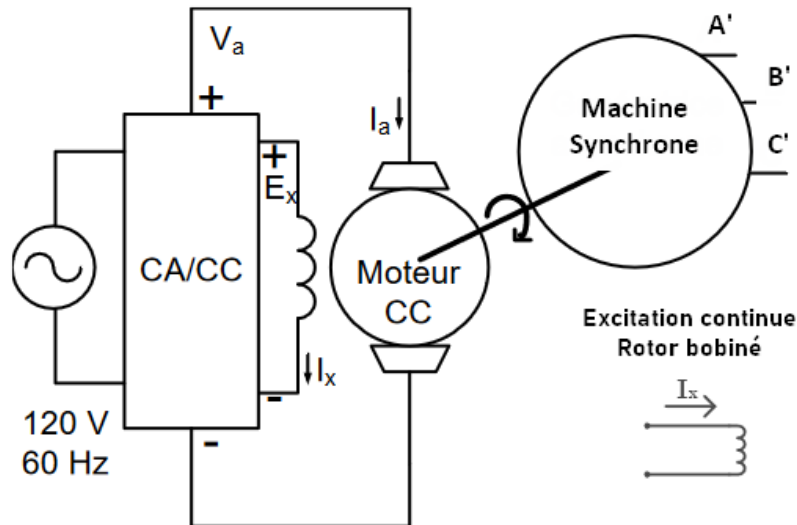
Identification de l'équipe :

Nom : <u>Mathieu Desautels</u>	CIP <u>DESM1210</u>
Nom : <u>Mathys Plante</u>	CIP <u>PLAM1001</u>
Nom : <u>Félix Boivin</u>	CIP <u>BOIF1302</u>

Expérience 1 : mesure de la force électromotrice d'une machine synchrone.

Dans cette expérience, on utilisera la machine à courant continu comme moteur pour entraîner la machine SYNCHRONE à rotor bobiné en génératrice synchrone (ou alternateur). En procédant de cette manière, il sera possible de relever la caractéristique à vide de la force électromotrice de la machine synchrone en fonction du courant d'excitation rotorique I_x et de la vitesse de rotation n .

Assurez-vous d'être hors tension. Coupler mécaniquement la machine synchrone à la machine à courant continu. Relier le stator de la machine synchrone en étoile. Brancher la sonde différentielle entre la phase A et le neutre de la machine synchrone. La figure suivante illustre le montage à effectuer.



Mettre la machine à courant continu sous tension et la faire tourner à 600 rpm. À l'oscilloscope, vous observez la force électromotrice obtenue sur l'alternateur. Noter la fréquence de la f.é.m telle que mesurée à l'oscilloscope 20.5764 Hz

Calculer le nombre de pôle de la machine synchrone 4.11528 donc 4 pôles

Noter la valeur efficace de la f.é.m. en fonction du courant d'excitation au rotor :

Courant d'excitation rotor I_x	Valeur efficace f.é.m.
0,1 A	6.80
0,2 A	12.54
0,3 A	18.00
0,4 A	25.22
0,5 A	30.55
0,6 A	35.39
0,7 A	39.83
0,8 A	43.17
0,9 A	46.34
1,0 A	48.80

Expliquer en quelques mots la raison du phénomène de plafonnement de la f.é.m. que vous observez :
La raison de ce plafonnement est que le fer est saturé. Le fer ne peut plus conduire autant.

Expérience 2 : mesure des paramètres du modèle équivalent d'une machine synchrone.

Dans cette expérience la machine synchrone sera aussi entraînée par le moteur à courant continu, mais cette fois à 1800 rpm. Pour les essais, dans un premier temps le stator de l'alternateur synchrone sera court-circuité (essai en court-circuit) afin de mesurer le courant de court-circuit statorique I_{sc} pour une valeur I_x permettant d'avoir $I_{sc}=I_{nominal}$. Ensuite, on mesure la valeur efficace de la tension à vide de l'alternateur pour la même valeur de I_x (essai à vide). À partir du courant de court-circuit et de la tension à vide par phase, on pourra déduire la valeur de l'inductance synchrone L_s .

Essai en court-circuit :

Assurez-vous d'être hors tension. Relier le stator de la machine synchrone en étoile. Brancher les phases A, B et C en court-circuit. Faire passer le courant de la phase A par un ampèremètre numérique afin de mesurer la valeur du courant de court-circuit I_{sc} .

Ajuster le potentiomètre de l'excitation rotorique de telle sorte que $I_x = 0$ avant la mise sous tension. À partir de la plaque signalétique de la machine synchrone, indiquer ici le courant de phase nominal (sa valeur efficace) de la machine synchrone utilisée 1.1A

Mettre la tension la machine à courant continu et la faire tourner à 1800 rpm. Augmenter graduellement la valeur de I_x jusqu'à ce que le courant mesuré sur la phase A' atteigne le courant nominal de la machine à l'essai $I_{sc}=I_{nominal}$. Indiquer ici la valeur de I_x obtenue 0.699A

Mesurer la vitesse de rotation au tachymètre 1756 rpm

Sans modifier le courant I_x , arrêter le moteur à courant continu et ouvrir le disjoncteur. Enlever le court-circuit du stator de l'alternateur pour faire l'essai à vide.

Essai à vide :

Mettre la tension la machine à courant continu et la faire tourner à 1800 rpm. Ajuster la valeur de I_x à la valeur de I_x obtenue précédemment en court-circuit (si cela avait été modifié) et mesurer E_0 la tension à vide d'une phase de l'alternateur.

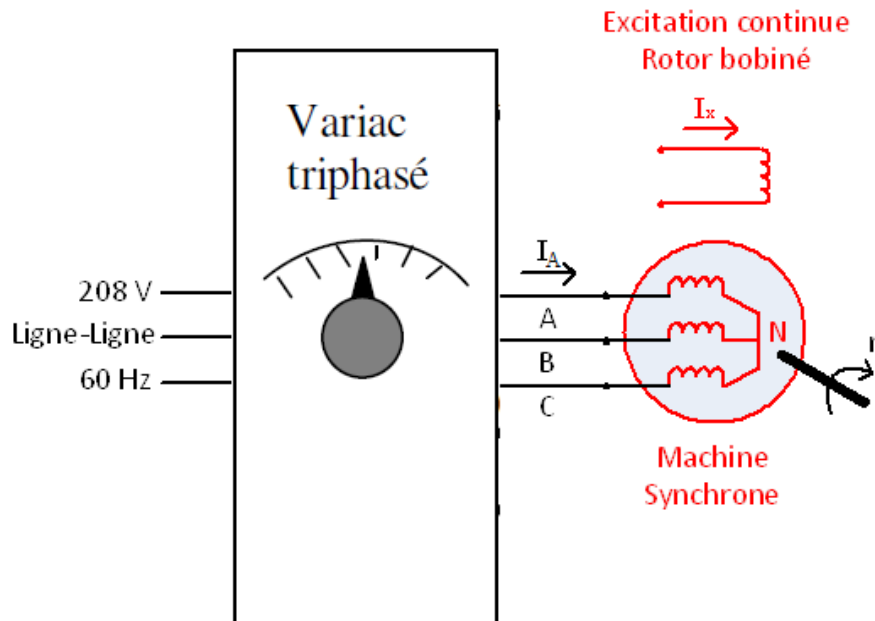
D'après les mesures effectuées précédemment, déterminer la valeur de la réactance synchrone X_s : 173.82 ohms, ainsi que la valeur de l'inductance synchrone L_s : 0.461 H

À l'aide d'un ohmmètre, déterminer hors tension la résistance d'une phase de la machine synchrone 4.7 ohms

Dessiner le modèle équivalent d'une phase de la machine synchrone en faisant apparaître la valeur des paramètres mesurés : E_0 , R_s et X_s .

Expérience 3 : opération d'une machine synchrone en moteur.

Dans cette expérience, on utilisera la machine synchrone en moteur et on examinera l'effet du courant d'excitation sur la puissance apparente consommée par le moteur. On en tirera une courbe en V typique. Le stator du moteur synchrone sera toujours branché en étoile. La figure suivante illustre la configuration à utiliser.



Ajuster le potentiomètre de l'excitation rotorique de telle sorte que $I_x = 0.1$ A lors de la mise sous tension. Avec le variac, démarrer à tension réduite le moteur synchrone puis augmenter graduellement la tension statorique ligne-ligne à 208 V.

En utilisant le tachymètre, mesurer la vitesse de rotation du moteur synchrone 1799 rpm. Déduire le nombre de pôle de la machine synchrone 4.0022 donc 4 pôles

Courbe en V:

Augmenter graduellement le courant d'excitation I_x du moteur synchrone à 1 A, ensuite relever le courant de phase du stator I_A , la puissance apparente $S_{3\Phi}$ et la puissance réactive $Q_{3\Phi}$ en fonction de I_x pour des valeurs de courant allant de 1 A à 0,1 A.

I_x (A)	I_A (A)	$S_{3\Phi}$ (VA)	$Q_{3\Phi}$ (VAR)
1	0.510	182.4	-179.4
0,9	0.372	132.0	-128.2
0,8	0.228	80.4	-74.8
0,7	0.108	38.5	-25.8
0,6	0.108	39.1	27.4
0,5	0.240	86.4	81.8
0,4	0.394	141.9	138.9
0,3	0.538	193.1	190.9
0,2	0.677	243.4	241.3
0,1	0.825	295.8	293.9

À partir des valeurs mesurées, tracer sur le graphique cartésien suivant la courbe de I_A en fonction de I_x .
 Déduire de ce graphique pour quel courant d'excitation I_x obtient-on un facteur de puissance $FP=1$ 0.664 ?
 Sachant que le stator de la machine synchrone est alimenté sous une tension de 208 V ligne-ligne à 60 Hz, déterminer la puissance active (en watts) absorbée par le Stator du moteur lorsque celui-ci opère à vide (sans charge mécanique) à un FP de 1 27.5 W ? (Expliquer)

$$(207.3/\sqrt{3}) * 0.078 * 3 = 28.00$$

$\sqrt{3}$ et $\times 3$ parce que triphasé

Puisque nous avons un facteur de puissance de 1, toute est en puissance active

Quelle est la valeur des pertes Cuivre au stator à $FP = 1$ 0.0857 W ? (Expliquer)

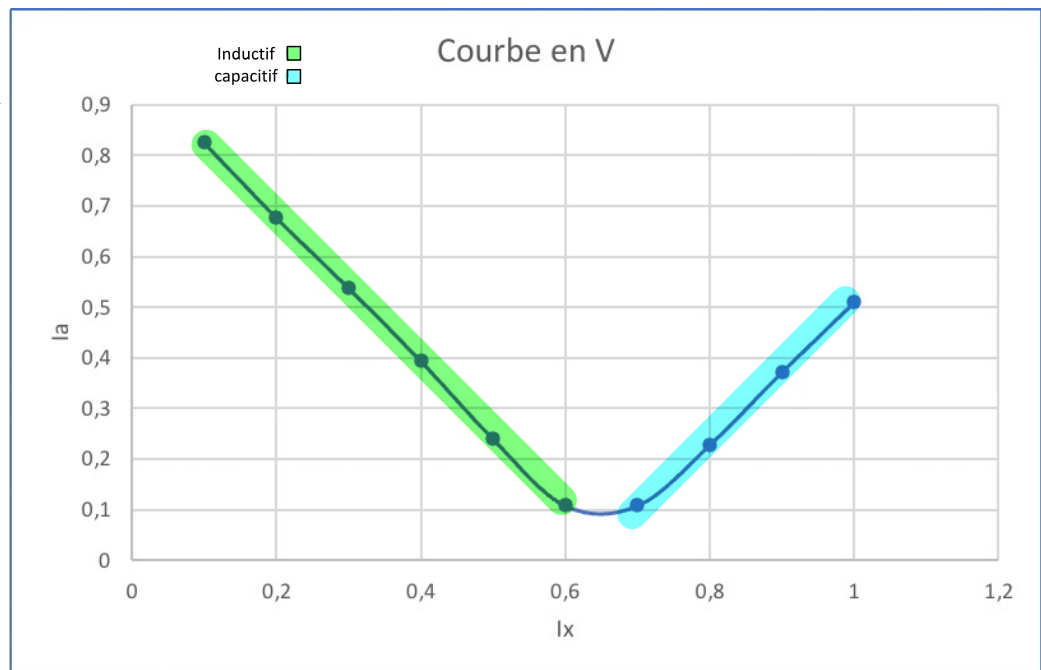
$$I^2 * R_f * 3 = 0.078^2 * 4.7 * 3 = 0.0857$$

Les pertes en chaleur sont liées à R_f , donc pertes = puissance dans $R_f \times 3$ car triphasé

Sur le graphique, pour les zones de droite et de gauche, identifiez les zones où de la puissance réactive est absorbée (inductif) ou générée (capacitif).

Courant stator

I_A



I_x

Courant rotor

Quelle est la valeur maximale de puissance apparente fournie par le réseau dans cet essai ? 295.08 VA
 Et quelle est la valeur des pertes Cuivre au stator correspondant à ce point d'opération (puissance apparente maximale)? 9.60 W (Expliquer votre démarche)

$$I^2 * R_f * 3 = 0.825^2 * 4.7 * 3 = 9.60$$

Les pertes en chaleur sont liées à R_f , donc pertes = puissance dans $R_f \times 3$ car triphasé

3- Connaissances nouvelles à acquérir par la résolution de cette problématique

Machines électriques tournantes

Connaissances déclaratives : Quoi

- Circuit équivalent des moteurs et génératrices asynchrones.
- Circuit équivalent des moteurs et génératrice CC.
- Circuit équivalent des moteurs et génératrice synchrone.
- Étude du comportement des machines asynchrones.
- Étude du comportement des machines CC.
- Étude du comportement de moteurs et génératrice synchrone.
- Pertes rotationnelles dans les machines CC.
- Pertes rotationnelles dans les machines asynchrones.
- Champ tournant et vitesse synchrone dans une machine asynchrone triphasée.
- Caractéristique couple-glissement dans une machine asynchrone.
- Puissances active et réactive dans une machine asynchrone.
- Facteur de puissance dans une machine asynchrone.
- Couple électromagnétique et puissance mécanique dans une machine asynchrone.
- Démarrage des machines CC et asynchrones.
- Excitation des machines CC, des machines asynchrones et machines synchrones.

Connaissances procédurales : Comment

- Procédure pour évaluer la caractéristique couple-vitesse d'un véhicule électrique.
- Procédure pour mesurer les pertes par friction et ventilation dans les machines.
- Procédure pour déterminer les paramètres du modèle électrique des moteurs CC et des moteurs asynchrones triphasés.
- Procédure pour démarrer un moteur CC.
- Procédure pour obtenir la résistance du stator et du rotor ainsi que la réactance associée au flux de fuite au stator d'une machine asynchrone.
- Procédure pour obtenir la résistance de fer et la réactance de magnétisation.
- Procédure pour mesurer la réactance synchrone des alternateurs.
- Procédure pour obtenir par la technique des phaseurs le comportement en charge des alternateurs.
- Procédure pour obtenir en laboratoire la courbe à vide des alternateurs.

Connaissance conditionnelle : Quand

- Choix du type de machine pour une motorisation d'un véhicule donné.

4- Références obligatoires à consulter

Volume « Électrotechnique », 4^e édition, Théodore Wildi. Les Presses de l'Université Laval et notes mathématiques de ce guide.

Première semaine : I à VI (46 pages)

Deuxième semaine : VII à X (34 pages)

Troisième semaine : XI et XII (27 pages)

PREMIÈRE SEMAINE (46 pages à lire, 18 exercices de compréhension)

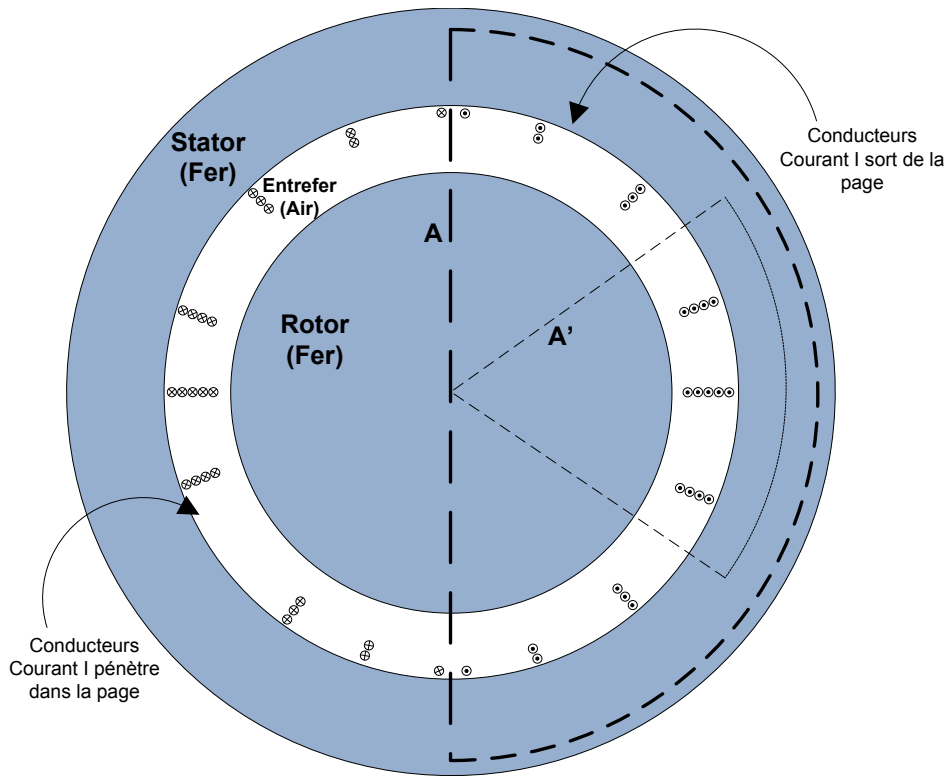
I – Moteur asynchrone triphasé – Construction, principes, champ tournant

LIRE LES SECTIONS SUIVANTES

- Introduction chapitre 33. p. 524
- Section 33.1 : Parties principales. pp. 524-526
- Section 33.2 : Principe de fonctionnement du moteur asynchrone. p. 527
- Section 33.3 : Champ tournant. pp. 527-530
- Section 33.4 : Sens de rotation. p. 530
- Section 33.5 : Nombre de pôles – vitesse synchrone. pp. 530-531

Résoudre les problèmes suivants :

33.A - Déterminer l'induction B dans l'entrefer de la machine de la figure suivante en utilisant la loi d'Ampère selon les parcours A et A' . Considérer que les conducteurs transportent un courant constant $I = 100$ A, que l'entrefer a une épaisseur de 1 mm, que la perméabilité du fer est infinie. On déterminera le nombre de conducteurs d'après l'information contenue sur la figure.



Réponse : A : 1.57 Teslas; A' : 0.82 Tesla.

33.B - Résoudre l'exemple 33-1, page 531.

33.C - Résoudre le problème 33-10, page 552.

II – Moteur asynchrone triphasé – Glissement, tension, fréquence et puissance rotoriques

LIRE LES SECTIONS SUIVANTES

- Section 33.6 : Démarrage du moteur à cage d'écureuil. pp. 531-532
- Section 33.7 : Accélération du rotor et glissement. p. 532
- Section 33.8 : Moteur en charge. p. 532
- Section 33.9 : Glissement et vitesse de glissement. pp. 532-533
- Section 33.10 : Tension et fréquence induites dans le rotor pp. 533-534
- Section 33.13 : Cheminement de la puissance active. pp. 536-539

Résoudre les problèmes suivants :

33.C - Solutionner l'exemple 33-3, page 533.

33.D - Refaire la démonstration de la formule $P_{jr} = sP_r$ du livre en vous aidant de l'encadré de la page 537.

33.E - Solutionner l'exemple 33-5, page 538.

33.F – Résoudre le problème 33-16, page 552.

III – Moteur asynchrone triphasé – Circuit équivalent complet

LIRE LES SECTIONS SUIVANTES

- Section 35.1 : Le moteur à rotor bobiné. pp. 585-588

Résoudre les problèmes suivants :

35.A - Soit un moteur asynchrone triphasé dont la valeur de réactance de fuite statorique est $x_1 = 2 \Omega$, dont la valeur de la réactance de magnétisation $X_m = 20 \Omega$, la résistance du bobinage de stator est $r_1 = 0.5 \Omega$ et les pertes par courants de Foucault sont modélisés par une résistance $R_f = 1 \text{ k}\Omega$. Déterminer les valeurs de k , z_{th} , x_{th} et r_{th} .

Réponse : $k = 0.909$, $z_{th} = 0.416 + 1.83 j \Omega$, $x_{th} = 1.83 \Omega$ et $r_{th} = 0.416 \Omega$.

35.B - En reprenant les valeurs du problème précédent, dessiner le schéma équivalent en prenant comme réactance de fuite du rotor $x_2 = 2 \Omega$, et une valeur de $r_2 = 0.1 \Omega$ pour la résistance des barres rotoriques. Déterminer la partie réelle et imaginaire de l'impédance vue par la source E_{th} pour un glissement de 1% et 5%.

Réponse : pour $s = 1\%$, partie réelle = 10.4Ω , partie imaginaire = 3.8Ω .
pour $s = 5\%$, partie réelle = 2.4Ω , partie imaginaire = 3.8Ω .

35.C - Déterminer le couple électromagnétique exercé par le moteur pour des glissements de 1% et 2%, en considérant que le moteur est alimenté par une tension d'alimentation de 208 V ligne-ligne et que sa vitesse synchrone est 1800 rpm. Utiliser le modèle complet décrit dans ce document.

Réponse : pour $s = 1\%$, couple = 15.4 Nm .
pour $s = 2\%$, couple = 21.5 Nm .

IV – Moteur asynchrone triphasé – Circuit équivalent simplifié et mesure des paramètres d'un moteur asynchrone

LIRE LES SECTIONS SUIVANTES

Note : Dans ce qui suit, on a simplifié le schéma équivalent, en faisant l'hypothèse $X_m \gg x_1$.

- Section 35.2 : Diagramme vectoriel d'un moteur asynchrone pp. 588-589
- Section 35.3 : Puissance électrique, mécanique et thermique. p. 589
- Section 35.4 : Puissance transmise au rotor et puissance mécanique. p. 589-590
- Section 35.10 : Mesure des paramètres. pp. 595-596.

Résoudre les problèmes suivants :

35.D - En reprenant les valeurs du problème 35.A et 35.B. Déterminer la puissance active P , la puissance réactive Q et le facteur de puissance fournis par la source d'alimentation 208 V_{ligne-ligne}, si le moteur est triphasé, pour des glissements de 1% et 5%. Déterminez ces valeurs en utilisant A) le modèle équivalent complet présenté dans ce document, et B) le schéma équivalent simplifié présenté dans Wildi aux pages 588-589.

Réponse : A) pour $s = 1\%$, $P = 3141 \text{ W}$, $Q = 2940 \text{ Var}$, $FP = 0.73$
 pour $s = 5\%$, $P = 4561 \text{ W}$, $Q = 8449 \text{ Var}$, $FP = 0.48$

 B) pour $s = 1\%$, $P = 3629 \text{ W}$, $Q = 3526 \text{ Var}$, $FP = 0.72$
 pour $s = 5\%$, $P = 4893 \text{ W}$, $Q = 9920 \text{ Var}$, $FP = 0.44$

35.E - Pour le numéro précédent, déterminer les rendements du moteur à $s = 1\%$ et $s = 5\%$, en utilisant le modèle complet .

Réponse : pour $s = 1\%$, $\eta = 91.5\%$.
 pour $s = 5\%$, $\eta = 72.5\%$.

35.F - Résoudre le problème 35-9, page 614. Utiliser le schéma équivalent simplifié décrit dans Wildi pages 588-589.

V – Moteur asynchrone triphasé – Couple de démarrage et de décrochage

LIRE LES SECTIONS SUIVANTES

- Section 40.5 : Procédés de démarrage. pp. 712-714
- Section 40.6 : Démarreurs manuels. p. 714
- Section 40.7 : Démarreurs magnétiques. p. 714-718
- Section 40.9 : Inversion du sens de rotation. p.719
- Section 40.11 : Démarrage à tension réduite. pp. 720-721
- Section 40.12 : Démarrage par résistances pp. 722-723

Résoudre les problèmes suivants :

40.A - Résoudre l'exemple 40-2, page 723.

40.B – Soit un moteur asynchrone triphasé 60 Hz de tension nominale ligne-ligne de 600 V et de courant nominal 10 A, possédant les paramètres suivants : $r_1 = 100 \text{ m}\Omega$, $r_2 = 20 \text{ m}\Omega$, $x_1 = x_2 = 200 \text{ m}\Omega$, $X_m = 1 \text{ k}\Omega$, $R_f = 25 \text{ k}\Omega$. Si on démarre ce moteur en appliquant la tension nominale, quelle sera la valeur du courant de démarrage? En utilisant une tension réduite pour le démarrage, quelle serait la tension initiale à utiliser à 60 Hz, pour limiter le courant à trois fois la valeur nominale?

Réponse : à pleine tension : $I_d = 830 \text{ A}$
 Pour avoir $I_d = 30 \text{ A}$, il faut $V_{LL} = 21,7 \text{ V}$ efficace

VI – Variation de la vitesse d'un moteur asynchrone

LIRE LES SECTIONS SUIVANTES

- Introduction p. 597
- Section 35.11 : Moteur à vitesse variable et couple constant pp. 597-598
- Section 35.12 : Couple et courant en fonction de la vitesse de glissement. pp. 598-601
- Section 35.13 : Modification du circuit équivalent selon la fréquence d'opération. pp. 602-603.
- Section 35.14 : Plage d'opération lorsque la tension et la fréquence sont variables. p. 603.
- Section 35.15 : Flux du stator dans une machine asynchrone et le rapport volts/hertz. pp. 603-604.
- Section 35.16 : Commande du couple et de la vitesse. pp. 604-606.

Résoudre les problèmes suivants :

35.G - Solutionner l'exemple 35-3, page 606.

35.H - Faire le problème 35-15, page 614, en utilisant les expressions mathématiques développées dans ce guide de l'étudiant.

35.I - Faire le problème 35-16, page 614, en utilisant les expressions mathématiques développées dans ce guide de l'étudiant.

DEUXIÈME SEMAINE (34 pages à lire, 8 exercices de compréhension)

VII – Machine à courant continu – Principe de base et construction

LIRE LES SECTIONS SUIVANTES

- Section 17.13 : Génératrice à courant continu, pp. 216 – 218
- Section 17.14 : Amélioration de la forme d'onde p. 218
- Section 27 : Préambule p. 377
- Section 27.1 : Inducteur, pp. 377 – 378
- Section 27.2 : Induit, pp. 378 – 379
- Section 27.3 : Collecteur et balais, pp. 379 – 380

VIII – Génératrice CC : tension induite en excitation séparée et shunt

LIRE LES SECTIONS SUIVANTES

- Section 27.7 : Valeur de la tension induite p. 384
- Section 27.8 : Réaction d'induit pp. 384-386
- Section 27.9 : Pôles de commutation p. 386
- Section 27.10 : Génératrice à excitation séparée p. 38
- Section 27.11 : Fonctionnement à vide, p. 387
- Section 27.12 : Génératrice à excitation shunt, pp. 387-388
- Section 27.13 : Réglage de la tension, p. 388
- Section 27.14 : Génératrice en charge, p. 389

Résoudre les problèmes suivants :

27.A - Solutionner le problème 27-12, page 394.

27.B - Solutionner le problème 27-14, page 394.

27.C - Solutionner le problème 27-17, page 394.

IX – Moteurs à courant continu

LIRE LES SECTIONS SUIVANTES

- Section 28 : Préambule p. 396
- Section 28.1 : Force contre-électromotrice pp. 396-397
- Section 28.2 : Accélération du moteur pp. 397-398
- Section 28.3 : Expression du couple pp. 398-400
- Section 28.4 : Expression de la vitesse p. 401
- Section 28.6 : Réglage de la vitesse par le flux de l'inducteur pp. 403-404
- Section 28.7 : Marche du moteur shunt en charge p. 404
- Section 28.8 : Démarrage d'un moteur shunt pp. 404-405
- Section 28.9 : Démarreur manuel pour moteur shunt p. 405
- Section 28.10 : Moteur série pp. 405 – 406

- Section 28.11 : Réglage de la vitesse d'un moteur série pp. 406- 407
- Section 28.12 : Emploi du moteur série p. 407

Résoudre les problèmes suivants :

- 28.A - Solutionner l'exemple 28-2, page 399
 28.B - Solutionner l'exemple 28-4, page 403
 28.C - Solutionner le problème 28-15, page 420.

X – Pertes, échauffements, rendement des machines CC

LIRE LES SECTIONS SUIVANTES

- Section 29 : Préambule p. 422
- Section 29.1 : Pertes mécaniques p. 422
- Section 29.2 : Pertes électriques dans les conducteurs p. 422-423
- Section 29.3 : Pertes électriques dans le fer pp. 423-425
- Section 29.4 : Courants de Foucault dans un noyau stationnaire pp. 425-426
- Section 29.5 : Variations des pertes avec la charge p. 426
- Section 29.6 : Puissance et capacité de surcharge p. 426
- Section 29.7 : Courbe de rendement pp. 426-427
- Section 29.8 : Normes d'échauffement pp. 427-430
- Section 29.9 : Mesure de l'échauffement p. 430

Résoudre les problèmes suivants :

- 29.A - Solutionner l'exemple 29-3, page 430
 29.B - Solutionner le problème 29-8, page 437

Autres références optionnelles :

- Volume « Électrotechnique », 2^e édition, Réal-Paul Bouchard et Guy Olivier, Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, 1999
- I- Chap. 9 : Moteur Asynchrone Triphasé, pages 411-459
- II- Chap. 4 : Circuits triphasés équilibrés, pages 205-221
- Volume « Electrical Power and Controls », 2^e édition, de Tim Skvarenina et William De Witt édité par Prentice Hall
 - Chap. 6 : Introduction to motors and generators
 - Chap. 7 : Three-phase Induction Motors
 - Chap. 11 : DC machines
 - Chap. 12 : Control devices and circuits « Starting DC motors »

TROISIÈME SEMAINE (27 pages à lire, 6 exercices de compréhension)

XI – Alternateurs Triphasés

LIRE LES SECTIONS SUIVANTES

- Section 36.11 : Principe des alternateurs de grande puissance, pp. 616-617
- Section 36.9 : Circuit équivalent d'un alternateur : réactance synchrone, pp. 624-625
- Section 36.10 : Détermination de la valeur X_s , pp. 625-626
- Section 36.13 : Alternateur en charge, p. 628
- Section 36.14 : Courbes de régulation, pp. 628-630
- Section 36.16 : Synchronisation des alternateurs, pp. 631-632
- Section 36.17 : Alternateur branché sur un réseau infini, pp. 632-634
- Section 36.19 : Puissance active débitée, pp. 635-636

Résoudre les problèmes suivants :

36.A - Solutionner le problème 36-16, page 640

36.B - Solutionner le problème 36-17, pages 640-641

36.C - Solutionner le problème 36-17, page 641

XII – Moteur synchrones

LIRE LES SECTIONS SUIVANTES

- Section 37.1 : Construction, pp. 643-644
- Section 37.2 : Démarrage du moteur synchrone, pp. 644-645
- Section 37.4 : Moteur en charge – description, p. 646
- Section 37.5 : Moteur en charge – puissance et couple, pp. 646-648
- Section 37.6 : Angles électrique et mécanique, pp. 648-649
- Section 37.7 : Caractéristique général d'un moteur synchrone, p. 649
- Section 37.8 : Excitation et puissance réactive d'un moteur synchrone, pp. 650
- Section 37.9 : Facteur de puissance : courbes en V, pp. 650-652
- Section 37.10 : Compensateur synchrone, pp. 652-653
- Section 37.13 : Usage du moteur synchrone, comparaison avec le moteur asynchrone, pp. 656-657

Résoudre les problèmes suivants :

37.A - Solutionner le problème 37-12, page 658

37.B - Solutionner le problème 37-14, page 658

37.C - Solutionner le problème 37-17, page 658

Complément : LIRE ÉGALEMENT LES NOTES DE COURS (EN LIGNE) 20 pages :
Notes de cours Machines Synchrones (auteur : Gilles Jasmin)

5- Activités liées à la problématique et au laboratoire

- Première semaine

- Première rencontre de **tutorat 1 (obligatoire)**, C1-5118 mardi 27 juin.
- Étude personnelle (**obligatoire**).
- Formation à la pratique **procédurale 1** (recommandée), C1-3035, mercredi 28 juin, 9:00 – 12:00.
- Travaux pratiques en **laboratoire 1 (obligatoire)**, C1-2055 : mercredi 28 juin (13:00 – 16:00); jeudi 29 juin (9:00 – 12:00) et (13:00 – 16:00)

Objectif à atteindre : identifier les paramètres de la machine asynchrone en vue de la résolution de la problématique.

- Deuxième semaine

- Formation à la pratique **procédurale 2** (recommandée), C1-3035, lundi 3 juillet, 13:00 – 16:00.
- **Consultation facultative** sur la résolution de la problématique, C1-5103, mardi 4 juillet, 13:00–14:30.
- Travaux pratiques en **laboratoire 2 (obligatoire)**, C1-2055, mercredi 5 juillet (13:00 – 16:00); vendredi 7 juillet (9:00 – 12:00) et (13:00 – 16:00)

Objectif à atteindre : identifier les paramètres de la machine à CC en vue de la résolution de la problématique.

- Étude personnelle (**obligatoire**).

- Troisième semaine

- Formation à la pratique **procédurale 3** (recommandée), C1-3035, lundi 10 juillet (13:00 – 16:00)
- Travaux pratiques en **laboratoire 3 (obligatoire)**, C1-2055, mardi 11 juillet (9:00–12:00), (13:00 – 16:00) et mercredi 12 juillet (9:00 – 12:00).

Objectif à atteindre : identifier les paramètres de la machine synchrone en vue de connaître son schéma équivalent et son comportement en moteur et en génératrice.

- Étude personnelle (**obligatoire**).
- Deuxième rencontre de **tutorat 2 (obligatoire)**, C1-5118, vendredi 14 juillet.
- Évaluation **formative**.

- Quatrième semaine

- **Consultation facultative**, C1-3035, lundi 17 juillet, 8:30 – 10:00.
- **Examen sommatif**, lundi 17 juillet, C1-4023 (13:00 – 16:00) et C1-4103 (13:00 – 17:00).

Laboratoires

- **Labo 1:** Machine asynchrone, Annexe B
- **Labo 2:** Machine à courant continue, Annexe C
- **Labo 3:** Machine synchrone, Annexe E

LABORATOIRES :

- la présence aux laboratoires C1-2055 est obligatoire. Les présences seront prises rigoureusement. Une sanction de 25 points par absence sera appliquée sur la note individuelle du rapport d'APP;
- le laboratoire d'électrotechnique comporte des éléments de sécurité importants. De ce fait, des consignes de sécurité seront données au début des laboratoires. Par conséquent, la ponctualité est requise. L'accès au laboratoire sera bloqué après le début de la séance ;
- le port des lunettes de sécurité est obligatoire.



6- Livrables

Livable 1 : **Compte-rendu du laboratoire 3 de l'annexe E : Machine Synchrone**

À remettre : en format électronique

Quand : **Le mercredi 12 juillet.**

Heure limite : 23h59.

Lieu : Sur le site de la session « Dépôt des travaux »; « s3e »; « GEL345- Rapport-Lab3 »

Le compte-rendu de **laboratoire 3 de l'annexe E** a le format suivant : il s'agit uniquement de répondre aux questions énoncées dans le guide du laboratoire concernant l'annexe E et conserver tous les résultats de mesure. Ce rapport devra AU MAXIMUM contenir 6 pages en format *.pdf.

Livable 2 : **Rapport de résolution de la problématique**

À remettre : en format électronique

Quand : **Le samedi 15 juillet.**

Heure limite: 23h59.

Lieu : Sur le site de la session « Dépôt des travaux »; « s3e »; « GEL345-Rapport-APP »

Le rapport de la résolution de la problématique a le format suivant :

- Une introduction décrivant le contexte.
- Un rappel du cahier des charges et des contraintes.
- Les descriptions (brièvement) des montages d'essai et tous les résultats expérimentaux permettant de résoudre la problématique (**laboratoires 1 et 2**).
- Tous les calculs menant aux résultats (y compris les tableaux à compléter dans les annexes B et C).
- Les résultats des points exigés dans la problématique avec la recommandation finale.
- Une conclusion.

Ce rapport devra AU MAXIMUM contenir 14 pages en format *.pdf.

7- Formation à la pratique procédurale #1 (1^{ère} semaine)

Buts de l'activité

- Calcul des éléments du schéma équivalent de la machine asynchrone.
- Calcul du glissement.
- Calcul du couple électromagnétique.
- Calcul du facteur de puissance.
- Calcul de glissement critique.
- Calcul de couple de décrochage.
- Calcul de vitesse de synchronisme.
- Calcul de perte par friction et ventilation.
- Bilan de puissance.

7.1- Énoncés des problèmes à résoudre

Problème 1

Un moteur asynchrone à rotor bobiné a les caractéristiques suivantes :

Couplage du rotor : Y

Couplage de stator : Y

Tension au stator : 208 V_{RMS}

Fréquence : 60 Hz

Nombre de paires de pôle : 4

Résistance du stator : 0,05 Ω

Résistance du rotor vue du primaire : 0,04 Ω

Réactance de fuite au stator : 0,10 Ω

Réactance de fuite au rotor : 0,15 Ω

Réactance de magnétisation : 10 Ω

Perte fer : négligeable

- 1) Calculer le courant et la puissance absorbés pour un glissement de 0,05.
- 2) Quelle résistance additionnelle par phase faut-il prévoir pour obtenir un même couple avec un glissement de 0,12.
- 3) En utilisant le théorème de Thévenin, calculer le glissement critique et le couple de décrochage de la machine.

Problème 2

En utilisant le moteur asynchrone du problème 1, calculer la puissance mécanique P_{mec} que pourra fournir ce moteur pour des valeurs croissantes de glissement s . Déterminer la puissance mécanique maximale que pourra fournir ce moteur et la valeur de glissement correspondante.

Problème 3

Soit un moteur asynchrone triphasé 60 Hz de tension nominale ligne-ligne de 600 V et de courant nominal 10 A, possédant les paramètres suivants : $r_1 = 100 \text{ m}\Omega$, $r_2 = 20 \text{ m}\Omega$, $x_1 = x_2 = 200 \text{ m}\Omega$, $X_m = 1 \text{ k}\Omega$, $R_f = 25 \text{ k}\Omega$. Si on démarre ce moteur en appliquant la tension nominale, quelle sera la valeur du courant de démarrage? En utilisant une tension réduite pour le démarrage, quelle serait la tension initiale à utiliser à 60 Hz, pour limiter le courant à trois fois la valeur nominale?

Problème 4

On donne l'impédance par phase vue du stator, d'un moteur asynchrone 370 HP, 600V (ligne-ligne), 6 pôles, 60 Hz :

$$R_s = 0,0139 \Omega \quad R_r = 0,0360 \Omega \quad X_s = 0,155 \Omega \quad X_r = 0,150 \Omega \quad X_m = 5,52 \Omega$$

Ce moteur atteint sa puissance nominale avec un glissement de 0,034 et un rendement de 93,5%.

- 1) Calculer les pertes rotationnelles et les pertes fer de la machine lorsqu'elle entraîne sa charge nominale.
- 2) On désire annuler la puissance réactive consommée par le moteur sur le réseau en installant un banc de condensateurs couplés en étoile au stator de la machine. Quelle valeur de la capacitance par phase faudra-t'il dans ce cas.

Problème 5

Un moteur asynchrone à rotor bobiné, 4 pôles de tension de phase nominale 3 kV, 60 Hz, puissance mécanique 1 MW, stator couplé en étoile, rotor couplé en étoile, est soumis à des essais suivants.

- Essais à vide sous la tension nominale :

Courant de ligne au stator = 60 A, Puissance totale consommée = 19 kW, Perte rotationnelle = 6 kW

- Essais en court-circuit rotor bloqué:

Tension au stator 540 V, courant de ligne au stator : 200 A ; Puissance consommée : 28 kW;

- Essai à rotor ouvert, à l'arrêt :

Tension au stator 3 kV; tension au rotor 748 V

Résistance R_1 du stator obtenue par mesure : 0,204 Ω

Déterminer les éléments du schéma équivalent en supposant que la réactance de fuite du stator est deux fois inférieure à réactance équivalente de la machine lorsqu'on réalise l'essai de court-circuit.

Problème 6

Lorsque le moteur du problème 5 délivre à l'arbre une puissance mécanique utile de 1MW sous sa tension nominale avec une vitesse de 1797,9 RPM. Déterminer

- 1) le glissement et le couple électromagnétique à ce point de fonctionnement.
- 2) le courant absorbé par le moteur (courant de ligne) ainsi que le facteur de puissance.
- 3) la puissance totale consommée par le moteur, en watts.

Problème 7

Si le moteur du problème 6 est refroidi par convection forcée. Lorsque l'air circule à travers les enroulements, cet air se réchauffe. Si l'on désire limiter l'augmentation de la température de l'air à une valeur maximale de 20°C, calculer le débit d'air requis en m³/min.

On donne pour le mode de convection forcé :

$$P=1280D(t_2-t_1)$$

Avec :

P : chaleur transportée par convection forcée en W

D : débit d'air refroidissant en m³/s

t₁ et t₂ : température de l'air respectivement à l'entrée et à la sortie en °C

1280 : constante tenant compte des unités

8- Formation à la pratique procédurale #2 (2^e semaine)

Buts de l'activité

- Calcul du flux à l'intérieur d'une machine CC
- Calcul de couple et de puissance dans les machines CC
- Calcul de tension interne dans une machine CC
- Calcul de la vitesse dans une machine CC
- Calcul des pertes rotationnelles dans les machines CC

8.1- Énoncés des problèmes à résoudre

Problème no 1

Une dynamo à 4 pôles et 4 voies d'enroulement comporte 260 conducteurs actifs. Lorsqu'on l'entraîne à 1800 RPM, sa tension à vide vaut 120 V.

- Quel est le flux par pôle?
- Quel est le couple électromagnétique lorsque l'induit consomme un courant $I_a = 30\text{A}$?

Problème no 2

On considère un moteur à courant continu en excitation séparée dont l'induit de résistance $R_a = 0.3\Omega$, est alimenté par une source continue $V_a = 112\text{ V}$. Lorsqu'il tourne à 1000 RPM, il consomme un courant $I_a = 40\text{A}$ et la réaction magnétique vaut $\epsilon = 10\text{ V}$.

- Quel est le couple électromagnétique en joules/radian?
- Quelle est la puissance électromagnétique en HP?

Problème no 3

Une dynamo-shunt 10 KW-240V a une résistance d'induit $R_a = 0.3\Omega$ et une résistance de champ $R_f = 150\Omega$. La réaction d'induit est négligeable.

Quelle est la f.e.m. de cette dynamo lorsqu'elle débite sa puissance nominale sous sa tension nominale?

Problème no 4

Un moteur-shunt est alimenté sous une tension de 230 V, et il fournit une puissance mécanique utile de 20 HP.

La résistance de l'induit vaut $R_a = 0,2 \Omega$ et la réaction magnétique est négligeable. Le courant total consommé sur la ligne est de 75 A et le courant dans l'inducteur est de 3 A.

Quelles sont les pertes rotationnelles?

Problème no 5

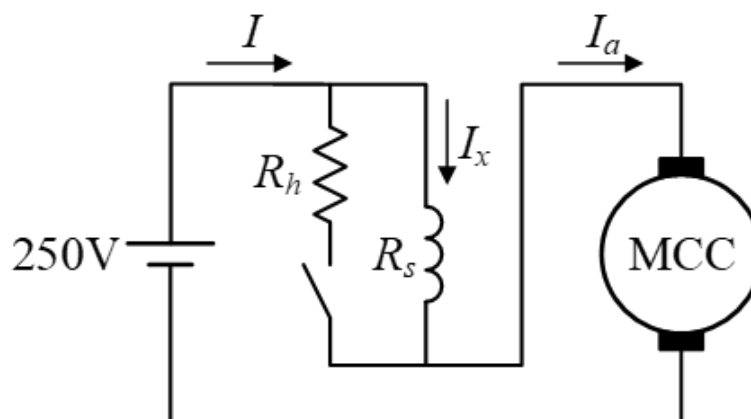
Un moteur-série, alimenté sous 230 V, consomme un courant de ligne de 36 A et tourne à 1200 tr/mn.

La résistance de l'induit vaut $R_a = 0,2 \Omega$, la résistance de l'inducteur-série vaut $R_s = 0,1 \Omega$, la réaction d'induit est négligeable, et le circuit magnétique n'est pas saturé (flux proportionnel au courant).

- a) Quelle serait la vitesse du moteur s'il consommait 20 A?
- b) Quel serait son couple électromagnétique?

Problème no 6

Un moteur alimenté sous 250 V, de résistance d'induit $R_a = 0,2 \Omega$ de résistance d'inducteur $R_s = 0,15 \Omega$ est monté avec un rhéostat de $0,1 \Omega$ en parallèle sur l'inducteur et muni d'un interrupteur. Lorsque l'interrupteur est ouvert, le moteur consomme 40 A et tourne à 800 tr/mn. Quelles sont les nouvelles valeurs du courant consommé et de la vitesse lorsqu'on ferme l'interrupteur et qu'on double le couple?



Observation : On néglige la réaction d'induit, la saturation et les pertes rotationnelles.

9- Formation à la pratique procédurale #3 (3^e semaine)

Buts de l'activité

- Calcul des nombres de pôles, de la f.é.m. par phase et de la tension interne dans une machine synchrone.
- Calcul de la vitesse et du courant d'excitation dans les machines synchrone.
- Calcul de la réactance synchrone dans les machines synchrone.
- Calcul de tension interne, de puissance et d'angle dans un alternateur triphasé relié à un réseau électrique à l'aide de phaseurs
- Calcul de tension interne et de couple dans un moteur synchrone triphasé à l'aide de phaseurs

9.1- Énoncés des problèmes à résoudre

Problème no 1

Le stator d'un alternateur triphasé étoile, de fréquence 60 Hz et de vitesse de rotation 900RPM comporte 576 conducteurs actifs en tout. Le flux inducteur du rotor vaut $\phi_o = 0.04$ Webers, en valeur maximale sous chaque pôle.

- a) Combien l'alternateur a-t-il de pôles?
- b) Quelle est la f.e.m. théorique par phase?
- c) Quelle est la tension à vide entre lignes?

Problème no 2

Un alternateur monophasé, entraîné à la vitesse $n = 360$ RPM, produit une f.é.m. de valeur efficace 110 V et de fréquence 60 Hz, lorsque le courant d'excitation du rotor vaut $I_r = 2$ A.

On souhaite que cet alternateur produise une f.é.m. de valeur efficace 220V et de fréquence 50Hz.

Quelles doivent être les nouvelles valeurs de la vitesse d'entraînement et du courant d'excitation?

Problème no 3

Un alternateur triphasé triangle tourne à vitesse constante en étant excité par un courant rotor constant. Son stator comporte 3 bornes accessibles :

- La tension de circuit ouvert, mesurée entre 2 bornes quelconques, vaut 120 V.
- La résistance mesurée entre 2 bornes quelconques, vaut 1.333Ω .
- Le courant mesuré sur un fil arrivant à une borne lorsque celle-ci est reliée par court-circuit aux 2 autres, vaut 17.32A.

- a) Quelle est la réactance synchrone par phase?
- b) Même question, en supposant que l'alternateur soit monté en étoile.

Problème no 4

Un alternateur monophasé 60 Hz tourne à 150 RPM et son courant d'excitation est maintenu constant à $I_r = 5A$. Le flux par pôle vaut $\phi_o = 0.0142$ Webers. Les bobines du stator comportent $q = 6$ spires par paire de pôles, et leur résistance interne totale vaut $R_s = 3 \Omega$. Le courant de court-circuit vaut $I_{cc} = 100A$.

- a) Quelle est la f.é.m.?
- b) Quelle est la réactance synchrone?
- c) Quelle est la tension aux bornes lorsque l'alternateur débite 50A dans une résistance pure?
- d) Quelle est alors la chute de tension en % ? Quelle est la régulation de tension en %?

Problème no 5

Un moteur synchrone 250 HP, 1800 RPM, 0.8 FP est alimenté par un réseau 460V ligne-ligne. Le moteur a un rendement de 90% et entraîne une charge à sa puissance nominale et à sa vitesse nominale. Sa réactance synchrone vaut 1.1Ω par phase. On considère R_s négligeable et le stator est connecté en étoile.

- a) Quelle est la valeur du courant de ligne si le moteur opère à $FP=1$; à $FP=0.8$ en retard et $FP=0.8$ en avance.
- b) Quelle est la valeur de la force contre électromotrice (f_{cem}) du moteur pour chaque valeur de FP.
- c) Expliquer comment va se comporter le courant d'excitation lorsque le facteur de puissance passe de $FP=1$ à $FP=0.8$ avance.
- d) Quelle est la valeur de l'angle de déphasage interne δ pour $FP=1$.
- e) Si lorsque le moteur opère à $FP=1$, la charge baisse de moitié pendant que le courant d'excitation est resté constant, quelle est la nouvelle valeur de l'angle de déphasage interne δ .
- f) Calculer la valeur de la puissance réactive totale et la valeur du courant de ligne du moteur.
- g) Calculer la nouvelle valeur de FP. Est-ce que le moteur fourni ou absorbe de la puissance réactive?

10- Évaluation

Les évaluations sommatives et finales porteront sur tous les objectifs d'apprentissage de l'unité. L'évaluation sommative se fera à livres fermés, avec comme seule documentation possible, une feuille de formules écrites à la main de 2 pages maximum (photocopies interdites). Aussi, il est interdit de copier des exercices et des démarches d'exercices sur votre feuille de formules. **La feuille de formules qui ne respectera pas ces consignes sera confisquée au début de l'examen.**

La note attribuée aux activités pédagogiques de l'unité est une note individuelle. L'évaluation portera sur les compétences figurant dans la description des activités pédagogiques. Ces compétences, ainsi que la pondération de chacune d'entre elles dans l'évaluation de cette unité, sont :

Activités et éléments de compétence		Qualités	Rapport Problématique	Compte-rendu Laboratoire	Examen sommatif	Examen final	Total par qualité	Total par compétence
GEL-345 Machines électriques tournantes								
1	Évaluer la performance des machines électriques tournantes;	Q01	10		50	50	110	300
		Q02	30	10	50	60	150	
		Q05	20	20			40	
2	Choisir un moteur en fonction des caractéristiques et spécifications de l'application visée.	Q01	10		50	50	110	300
		Q02	20	10	50	60	140	
		Q05	30	20			50	
Total : GEL345			120	60	200	220		600
GEL-362 Thermique								
1	Appliquer les notions d'échange de chaleur au refroidissement des dispositifs et des systèmes en électrotechnique	Q01			20	10	30	60
		Q02			20	10	30	
Total : GEL362					40	20		60

Comme indiqué à la section 1, l'activité GEL 345 comprend 2 éléments de compétences qui sont désignés par 1 et 2. Il y a deux livrables, rapport de la problématique, rapport de laboratoire. Les qualités et critères du BCAPG concernant cet APP :

- Qualité 1 (Q1) connaissances en génie.
 - Qualité 01 (Q1_2) connaissances dans le champ de l'analyse de problèmes en lien avec les machines électriques ;
 - Qualité 01 (Q1_5) connaissance dans le champ de l'utilisation d'outils d'ingénierie en lien avec les machines électriques ;
- Qualité 2 (Q2) analyse de problèmes.
 - Qualité 02 (Q2_1) définir un problème appliquant des connaissances de machines électriques;
 - Qualité 02 (Q2_3) énoncer les objectifs à atteindre pour résoudre le problème en lien avec les machines électriques ;
 - Qualité 02 (Q2_5) mettre en œuvre la solution retenue pour viabiliser l'application de machines électriques ;
 - Qualité 02 (Q2_6) analyser et interpréter les résultats obtenus pour justifier l'application de machines électriques ;
- Qualité 5 (Q5) utilisation d'outils d'ingénierie.
 - Qualité 05 (Q5_1) sélectionner les techniques, ressources et outils appropriés pour réaliser une tâche dans le domaine des machines électriques ;
 - Qualité 05 (Q5_2) utiliser les techniques, ressources et outils sélectionnés selon les protocoles établis dans le domaine des machines électriques ;
 - Qualité 05 (Q5_3) connaître les limites des techniques, ressources et outils sélectionnés dans le domaine des machines électriques ;

10.1- Rapport de la problématique

Q1 : Critère 5. Connaissances dans le champ de l'utilisation d'outils d'ingénierie en lien avec les machines électriques	20 pts
...utilise des connaissances dans le champ permettant une bonne utilisation des outils d'ingénierie.	100%
...utilise correctement ses connaissances dans le champ pour adapter les outils d'ingénierie à des problèmes complexes, mais qui sont analogues à des problèmes déjà vu.	85%
... utilise correctement ses connaissances dans le champ pour adapter les outils d'ingénierie à des problèmes simples, mais qui sont nouveaux pour lui.	60%
... n'utilise que les connaissances dans le champ pour adapter les outils d'ingénierie pour résoudre des problèmes simples.	25%

Q2 : Critère 6. Analyser et interpréter les résultats obtenus pour justifier l'application de machines électriques	50 pts
... analyse et interprète les résultats obtenus au regard des hypothèses et objectifs préalablement définis et d'autres références théoriques pertinentes.	100%
... analyse et interprète les résultats obtenus au regard des hypothèses et objectifs préalablement définis.	85%
... analyse et interprète partiellement les résultats obtenus.	60%
... n'est pas en mesure d'analyser et d'interpréter les résultats obtenus, mais est capable d'expliquer pourquoi.	25%

Q5 : Critère 3. Connaître les limites des techniques, ressources et outils sélectionnés dans le domaine des machines électriques	50 pts
... connaît les limites des techniques, ressources et outils sélectionnés. Adapte ces techniques, ressources et outils, les combine à d'autres ou en crée pour pallier leurs limites.	100%
... connaît les limites des techniques, ressources et outils sélectionnés. Adapte ces techniques, ressources et outils ou les combine à d'autres pour pallier leurs limites.	85%
... connaît partiellement les limites des techniques, ressources et outils sélectionnés.	60%
... ne connaît pas les limites des techniques, ressources et outils sélectionnés, mais sait qu'il en existe.	25%

10.2- Compte-rendu de Laboratoire

Q2 : Critère 5. Mettre en œuvre la solution retenue pour viabiliser l'application de machines électriques	20 pts
... met en œuvre la solution retenue en se référant aux connaissances et aux principes d'ingénierie nécessaires pour ce faire et en tenant compte de plusieurs autres principes pertinents	100%
... met en œuvre la solution retenue en se référant à la plupart des connaissances et des principes d'ingénierie nécessaires pour ce faire et en tenant compte de quelques autres principes pertinents.	85%
... met en œuvre la solution retenue en se référant à quelques principes d'ingénierie nécessaires pour ce faire.	60%
... n'est pas en mesure de mettre en œuvre la solution retenue, mais est capable d'expliquer pourquoi.	25%

Q5 : Critère 1. Sélectionner les techniques, ressources et outils appropriés pour réaliser une tâche dans le domaine des machines électriques	10 pts
... sélectionne les techniques, ressources et outils appropriés en pouvant justifier ses choix (en connaît la portée et les limites), de même qu'en pouvant inférer la nature du travail à accomplir ou les données à colliger.	100%
... sélectionne les techniques, ressources et outils appropriés en pouvant justifier ses choix (en connaît la portée et les limites).	85%
... sélectionne les techniques, ressources et outils appropriés, sans toutefois pouvoir justifier ses choix.	60%
... n'est pas en mesure de sélectionner les techniques, ressources et outils appropriés, mais en connaît pouvant être utilisés.	25%

Q5 : Critère 2. Utiliser les techniques, ressources et outils sélectionnés selon les protocoles établis dans le domaine des machines électriques	30 pts
... connaît les protocoles établis des techniques, ressources et outils sélectionnés et les respecte lors de leur utilisation. Démontre la capacité à optimiser cette utilisation dans le contexte de la tâche à accomplir.	100%
... connaît les protocoles établis des techniques, ressources et outils sélectionnés et les respecte lors de leur utilisation.	85%
... connaît les protocoles établis des techniques, ressources et outils sélectionnés, mais ne les respecte que partiellement lors de leur utilisation.	60%
... ne connaît pas les protocoles établis des techniques, ressources et outils sélectionnés, mais sait qu'il en existe.	25%

10.3- Examens

Q1 : Critère 2. Connaissances dans le champ de l'analyse de problèmes en lien avec les machines électriques	200 pts
... combine les connaissances de tous les sous-champs afin d'offrir une meilleure solution à la situation proposée.	100%
... utilise des connaissances de tous les sous-champs nécessaires à la résolution de la situation.	85%
... réfère à des connaissances de plusieurs sous-champs dans le champ, et ce, quelle que soit la situation.	60%
... n'utilise que les connaissances d'un sous-champ dans le champ précis, et ce, quelle que soit la situation.	25%

Q2 : Critère 3. Énoncer les objectifs à atteindre pour résoudre le problème en lien avec les machines électriques	220 pts
... énonce des objectifs mesurables et réalisables en lien avec les hypothèses préalablement émises.	100%
... énonce des objectifs mesurables et réalisables.	85%
... énonce des objectifs partiellement mesurables et/ou réalisables	60%
... énonce des objectifs ni mesurables et/ou ni réalisables	25%

11- Utilisation des téléphones cellulaires, iPod et ordinateurs.

L'utilisation des téléphones cellulaires en mode vocal ou pour l'envoi de messages textes est interdite pendant les procédurax, les tutorats, les séminaires, les examens, les séances de laboratoire.

L'utilisation des iPod, iPhone et téléphones intelligents est interdite pendant les procédurax, les tutorats, les séminaires, les examens, les séances de laboratoire. Le port de casques d'écoutes ou d'écouteurs est interdit pendant ces activités.

L'utilisation des ordinateurs est interdite lors des tutorats, à l'exception de l'étudiant scribe. Les énoncés des problématiques seront remis en copie papier lors des tutorats.

L'utilisation des ordinateurs est interdite lors des procédurax, des examens et des séminaires, sans exception. Les énoncés des problèmes à résoudre seront remis en copie papier lors des séances de pratique procédurale.

L'utilisation des ordinateurs lors des séances de laboratoire est autorisée avec restriction. En effet, toute utilisation inappropriée de l'ordinateur est interdite. De manière plus précise, les jeux informatiques, les réseaux sociaux (Facebook, etc.), les bandes dessinées, YouTube sont strictement interdits.

Contrevenir à l'une de ces consignes pourra entraîner une sanction pouvant aller jusqu'à l'expulsion de l'étudiant de l'activité pédagogique ou d'évaluation.