Étude expérimentale sans danger de moteurs électriques

par Claude MORAND et Michel POUCHOT
Université Joseph Fourier, 38000 Grenoble

RÉSUMÉ

On propose 2 types de bancs de mesures pour permettre à une quinzaine d'étudiants d'effectuer simultanément sans danger des travaux pratiques sur des moteurs électriques : un banc pour moteur et génératrice à courant continu et un banc pour moteur asynchrone, alternateur et moteur synchrone. Par économie, par sécurité (faibles tensions et faibles couples) on a chosi du matériel de récupération automobile, de manière aussi à familiariser l'étudiant avec du matériel industriel courant.

INTRODUCTION

Les programmes des Maîtrises de Sciences et Techniques (électronique, informatique, mécanique...) comportent un enseignement de moteurs électriques qui n'est souvent que théorique (cours et travaux dirigés) car les travaux pratiques sont difficiles à réaliser pour un grand nombre d'étudiants. Même si on avait les moyens de s'offrir assez de bancs de mesures sur les moteurs habituels de quelques kilowatts, il ne serait pas prudent de faire manipuler un groupe de 12 à 16 étudiants peu expérimentés simultanément sur des machines où les risques électriques et mécaniques sont importants pour eux,... et pour le matériel. Cet argument est encore plus fort lorsqu'il s'agit d'une initiation expérimentale pour les étudiants du DEUG deuxième année, dont c'est le seul contact à l'Université avec l'électricité industrielle.

Nous avons donc mis en place 8 bancs de mesures (4 en continu et 4 en alternatif) où les tensions électriques n'excèdent pas 15 V et les couples mécaniques atteignent 2 Nm au maximum. Afin d'abaisser les coûts (hors oscilloscope environ 6 000 F par banc à courant continu et 10 000 F par banc à courant alternatif) et faire connaître à l'étudiant

des machines de la vie courante, nous avons utilisé du matériel de récupération automobile (dynamos 12 V de R4 Renault, alternateurs triphasés de 104 Peugeot, ampoules 41 et 21 watts de phares et veilleuses pour les rhéostats, ou autre (dynamos de vélo comme tachymètres). Pour éviter les problèmes de batteries d'accumulateurs (sécurité et entretien) nous avons fabriqué des alimentations de courant redressé 12 V, 30 A (1 000 F pièce).

Les machines électriques sont fixées sur une planche d'aggloméré plastifié, posée elle même sur une plaque de polystyrène expansé qui ramène le niveau acoustique d'un banc de 70 à 65 dBA. Tous les appareils de mesures (ampèremètres et voltmètres de tableau, wattmètres), les rhéostats, les interrupteurs, les borniers, les transformateurs... etc, sont vissés à ce même bâti et leurs connexions électriques aux machines sont aussi fixées (sauf exception en alternatif). Si l'absence de branchements à réaliser fait perdre en pédagogie (on demande cependant de relever le schéma électrique de l'installation en justifiant en particulier la section des fils), elle fait gagner en sécurité pour le matériel, et en temps consacré à la réflexion et aux mesures.

Ainsi ces 8 bancs permettent à 16 étudiants de manipuler simultanément en présence d'un seul enseignant. L'étudiant de licence consacre 16 H (8 H en continu et 8 H en alternatif) à cette étude expérimentale des moteurs électriques. L'étudiant de DEUG A2 y passe 32 H dans le cadre de l'option Physique Expérimentale qui remplace les travaux pratiques classiques.

MACHINES À COURANT CONTINU

Pour cette partie nous nous sommes naturellement fortement inspirés de l'article de P. Girondeau [1] en apportant les modifications suivantes (cf. schéma nº 1).

L'accouplement mécanique entre moteur et génératrice se fait par simple paulstra (couplage ou désaccouplage faciles). Les rhéostats - de démarrage du moteur et de charge de la génératrice - sont constitués de 9 ampoules (21 W et 8 × 41 W) d'automobile pouvant être mises en parallèle par 5 interrupteurs. C'est la même alimentation électrique qui délivre les courants d'excitation des 2 machines et le courant d'induit du moteur. Le schéma nº1 montre cependant que le moteur est bien à excitation indépendante.

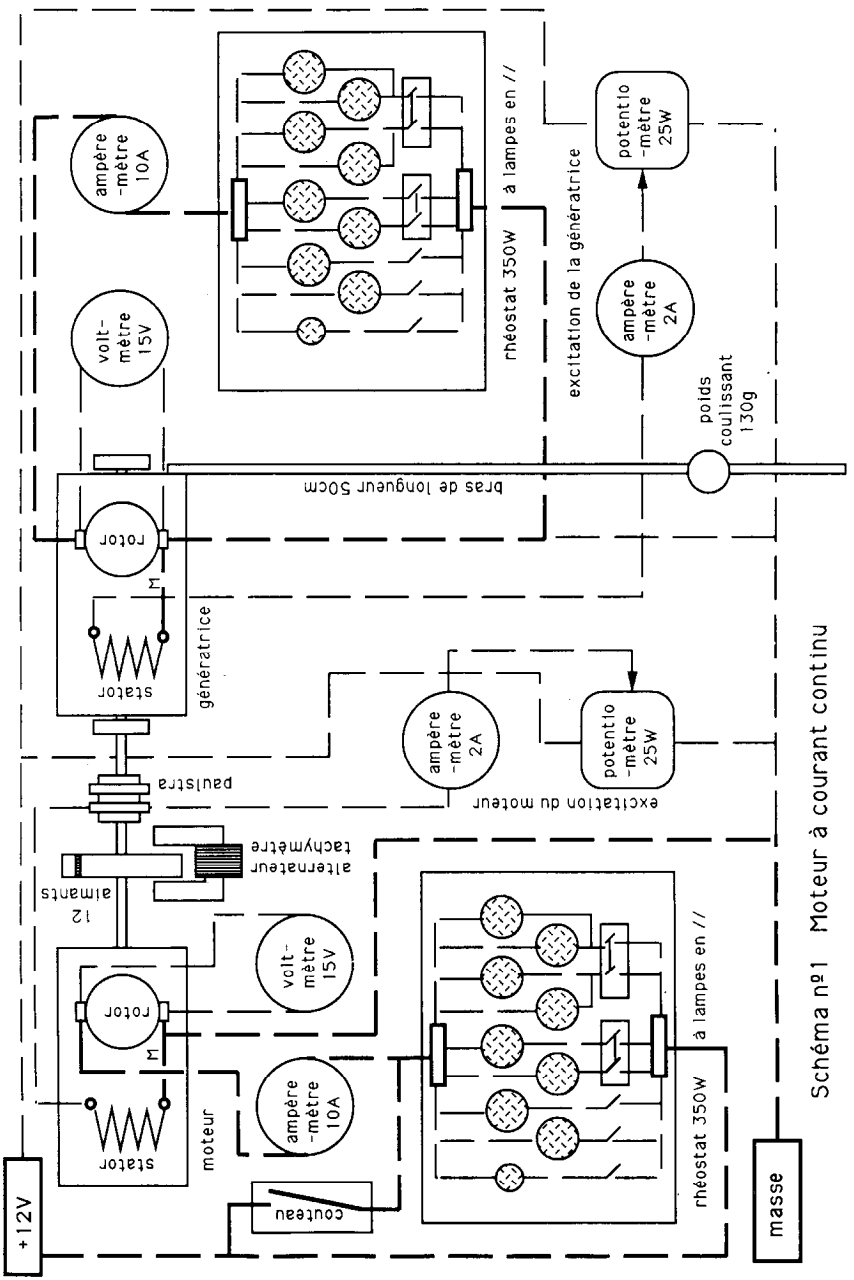


Schéma n°1 Moteur à courant continu

Schéma 1 : Banc de mesures pour moteur à courant continu

En traits pleins figurent les pièces mécaniques là où elles sont vissées sur le bâti de bois aggloméré : moteur et génératrice, rhéostats et appareils de mesures. Sur l'axe de rotation reliant moteur et génératrice se trouvent le paulstra d'accouplement et le disque d'aluminium où sont sertis 12 petits aimants ($l = 10$, $\phi = 5$ mm) qui, en défilant devant le circuit magnétique d'une bobine de «flipper», y induisent une fém dont la période mène à la vitesse de rotation. La carcasse de la génératrice, montée sur roulements à billes, est munie d'un bras gradué portant un poids coulissant pour mesurer le couple utile du moteur.

Le câblage électrique fixe est représenté en pointillés. A gauche on trouve celui du moteur et à droite celui de la génératrice. L'alimentation 12 V, 30 A non figurée ici permet les excitations des 2 machines et l'alimentation du rotor du moteur. Les courants statoriques d'excitation sont réglables entre 0 et 1,8 A grâce aux 2 potentiomètres 25 W. Le rhéostat à ampoules côté moteur sert au démarrage et à l'arrêt du moteur, ou à faire varier sa tension d'alimentation rotorique ; en régime normal il est court-circuité par un couteau. Côté droit le rhéostat à ampoules sert de charge à la génératrice. Pour les 2 machines on mesure les courants d'excitation et les tensions et courants rotoriques sur des ampèremètres et voltmètres branchés en permanence.

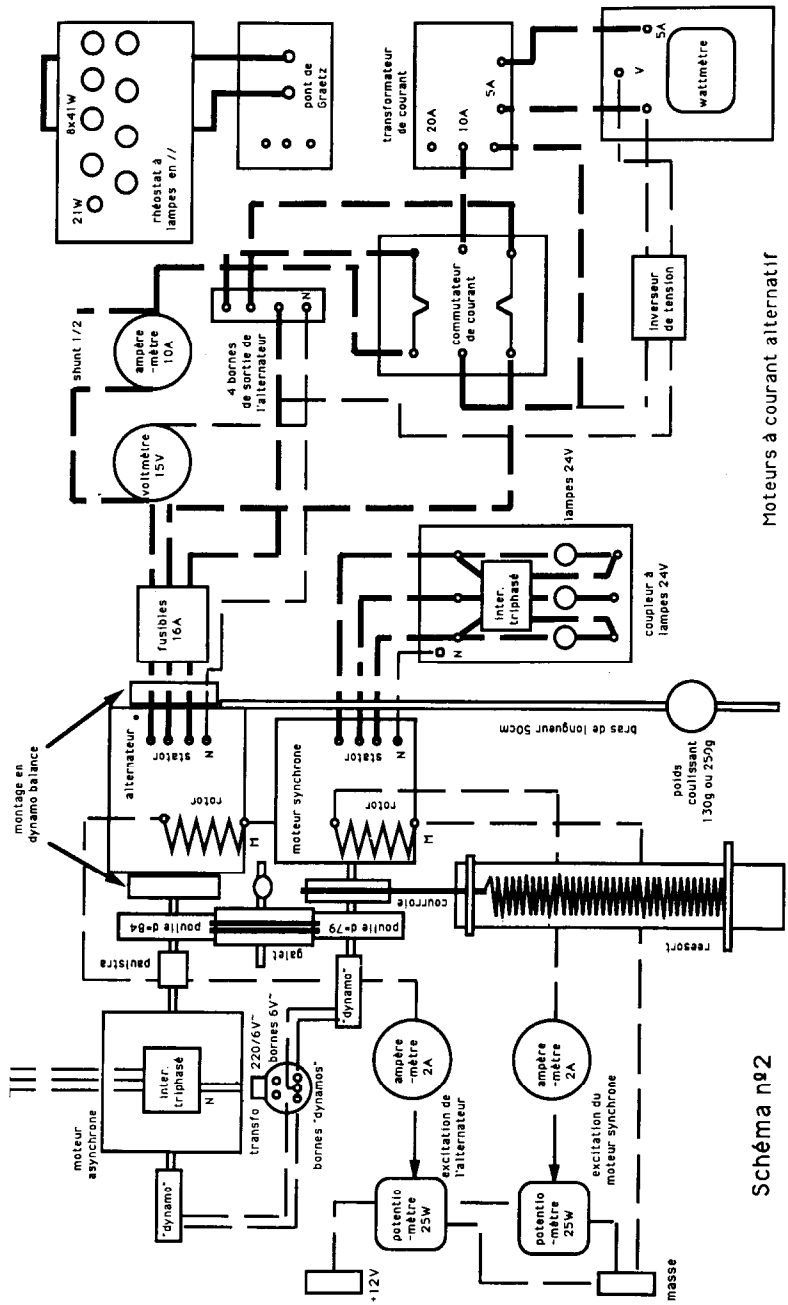
Schéma 2 : Banc de mesures pour moteurs à courant alternatif

En traits pleins figurent les pièces mécaniques à leur place sur le bâti. L'accouplement mécanique de l'alternateur au moteur asynchrone se fait par simple paustra. La carcasse de l'alternateur, montée sur roulements à billes, porte un bras gradué avec poids coulissant pour mesurer le couple utile du moteur asynchrone. Le moteur synchrone peut être entraîné mécaniquement par la rotation de l'alternateur en abaissant un galet portant 2 joints toriques en caoutchouc frottant sur 2 poulies solidaires chacune d'un axe et, selon la pression exercée, on peut faire varier le rapport des vitesses de rotation autour de 1. Les diamètres des poulies sont respectivement de 84 et 79 mm pour tenir compte du glissement caoutchouc sur métal. Le moteur synchrone peut être mis en charge par frottement sur une poulie d'une courroie tendue par un ressort dont l'allongement change avec sa position d'accrochage. En bouts d'arbres sont montées 2 «dynamos» de vélo, petits alternateurs auxiliaires à 4 paires de pôles, pour mesurer la vitesse de rotation.

Le câblage électrique fixe est représenté en pointillés. Le moteur asynchrone est alimenté en triphasé et une tension prise entre phase et neutre est abaissée au moyen d'un petit transformateur 220/6 V, pour être comparée sur l'oscilloscope à celle délivrée par la «dynamo» afin de mesurer le glissement du moteur asynchrone.

L'alimentation continue 12 V fournit les courants d'excitation rotoriques de l'alternateur et du moteur synchrone, réglables entre 0 et 1,8 A au moyen de potentiomètres 25 W. Pour les 2 machines synchrones les 3 phases et le neutre des enroulements statoriques sont sortis sur des borniers.

Un voltmètre et un ampèremètre fixes permettent de mesurer tension simple et


Moteurs à courant alternatif
Schéma n°2
montage en dynamo balance
alternateur
stator
rotor
N
moteur synchrone
bras de longueur 50cm
poids coulissant 130g ou 250g
contrôle
ressort
poulie d=64
poulie d=79
galet
poulie
"dynamo"
bornes "dynamos"
transfo 220/6V~
bornes 6V~
inter. triphasé
moteur asynchrone
ampère-mètre 2A
excitation de l'alternateur
excitation du moteur synchrone
potentio-mètre 25W
+12V
masse
fusibles 16A
voltmètre 15V
ampère-mètre 10A
shunt 1/2
4 bornes de sortie de l'alternateur
commutateur de courant
inverseur de tension
lampes 24V
couplage à lampes 24V
transformateur de courant
20A
10A
5A
V
wattmètre
pont de Graetz
rhéostat à lampes en //
8x41W
21W

courant de ligne de l'alternateur protégé par des fusibles 16 A. On peut aussi mesurer les puissances active et réactive grâce à un wattmètre dont le circuit courant est alimenté, après abaissement éventuel dans un transformateur de courant, par la phasé 1 ou par la phase 2 selon la position du commutateur de courant. Le circuit tension du wattmètre est alors soumis soit à la tension composée entre les phases 1 et 3, soit à celle entre les phases 2 et 3. La puissance active est la somme des 2 lectures. L'inverseur de tension rend possibles les lectures qui seraient négatives sur le wattmètre.

Pour que l'alternateur travaille en charge résistive, on doit relier les 3 phases de sorties aux 3 entrées d'un pont de Graetz suivi d'un rhéostat à ampoules 350 W. Pour que la charge soit inductive la liaison est faite avec les 3 bornes d'entrée statorique du moteur synchrone à l'arrêt ou en rotation mais non accroché.

En plus des mesures indiquées par P. Girondeau (génératrice à vide et en charge, moteur à vide et en charge), on peut réaliser la séparation des pertes fer et pertes mécaniques de la génératrice et mesurer le rendement du moteur.

MACHINES À COURANT ALTERNATIF

Description

Un moteur asynchrone triphasé (220 V, 2 750 tr/mn, 370 W) peut entraîner un alternateur de 104 Peugeot (4 000 tr/mn, 10 A, 500 W, 6 paires de pôles) monté sur roulements à billes en génératrice balance (cf. schéma nº2). Un autre alternateur identique, d'axe parallèle au premier, peut être utilisé en moteur synchrone.

En plus des tension simple et courant de ligne de l'alternateur, on peut mesurer les puissances active et réactive grâce à la méthode des 2 wattmètres avec... un seul wattmètre au moyen d'un commutateur de courant suivi d'un transformateur de courant (20 A ; 10 A/5 A). Le commutateur de courant est un inverseur à couteaux bricolé ; le wattmètre est l'appareil le plus cher du banc (2 700 F), le transformateur de courant CECLA de classe 1,5 ne coûte que 270 F.

Entraîner des machines synchrones par un moteur asynchrone devrait conduire à des corrections de vitesse, faciles à effectuer, sur les fém et réactances synchrones. Cependant l'incertitude des mesures avoisine 5% et les corrections s'avèrent alors inutiles si le glissement reste inférieur à 5%. Et pour les quelques mesures effectuées avec un glissement supérieur, l'absence de corrections ne nuit pas à la compréhension globale des phénomènes.

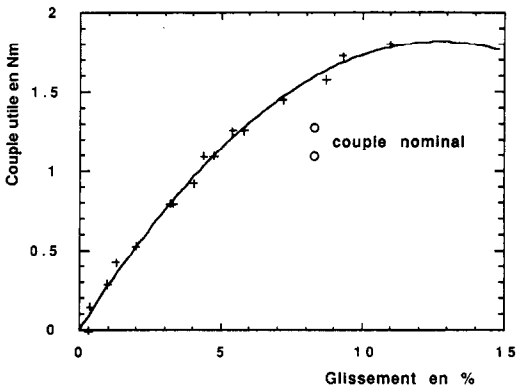
ÉTUDE DU MOTEUR ASYNCHRONE

Son alimentation en triphasé 220 V (seule tension dangereuse) est hors de portée de l'étudiant, mais un petit transformateur 220/6 V permet de disposer du 50 Hz du réseau EDF pour l'étude du glissement. En effet en synchronisant l'oscilloscope sur 50 Hz on peut voir glisser la fém délivrée par la «dynamo» en bout d'arbre. En chronométrant ce défilement on obtient le glissement, impossible à mesurer au stroboscope lorsqu'il est trop faible.

En chargeant l'alternateur (charge résistive) et en mesurant le couple exercé sur son bâti, on peut obtenir le couple utile en fonction du glissement. Les mesures jusqu'à g ~ 5% ont été effectuées à l'oscilloscope et les suivantes au stroboscope.

	mesures sur l'oscilloscope								mesures au stroboscope							
g (%)	0,33	0,40	1	1,25	2	3,2	4,4	5,4	3,3	4	4,7	5,8	7,2	8,7	9,3	11
Γ_u (Nm)	0	0,14	0,28	0,42	0,53	0,8	1,10	1,25	0,8	0,92	1,1	1,25	1,45	1,57	1,72	1,8

On peut constater sur le graphe n°3 $\Gamma_u(g)$ correspondant que le constructeur est pessimiste, qu'on prenne la puissance nominale 370 W pour la puissance utile ou consommée. Dans le cas où l'on modélise une phase rotorique, dans son schéma équivalent ramené au stator, par une résistance r_2/g en série avec une réactance de fuites X_2, la pente à l'origine $d\Gamma_u/dg$ donne $r_2 = 14\Omega$ et le position du maximum du couple ($\Gamma_M = 1{,}8$ N.m pour $g_M = 0{,}13$, valeurs obtenues par ajustement d'une parabole) est compatible avec $X_2 \sim 120\Omega$.



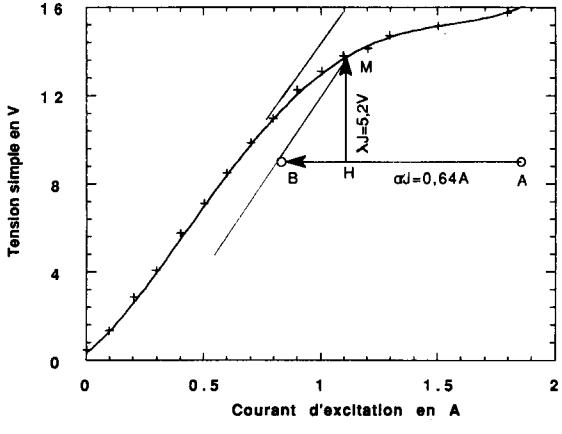
Graphe 3 : Moteur asynchrone

ÉTUDE DE L'ALTERNATEUR À VIDE

Bien qu'il n'y ait que 3 fils sortant du stator de l'alternateur, le démontage (nécessaire pour sa remise en état) a permis de sortir le neutre. La mesure de la tension simple en fonction du courant d'excitation donne sa fém synchrone car la vitesse de rotation du moteur asynchrone d'entraînement varie moins de 1%.

(iA)	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,5	1,8
V(V)	0,5	1,3	2,9	4,1	5,8	7,1	8,5	9,9	11	12,3	13,1	13,8	14,1	14,7	15,2	15,8

Sur le graphe n°4 V(i) on note l'effet d'une induction rémanente (la courbe ne passe pas par l'origine) et la présence du coude de saturation vers i ~ 1A.



Graphe 4 : Caractéristique E(i) de l'alternateur à vide

L'extrapolation de la partie linéaire sert pour i > 0,8 A lorsque l'alternateur est chargé, car la saturation se produit alors pour des AT inducteurs correspondant à des courants certainement plus élevés que 0,8 A. La construction permet de déterminer le cœfficient α d'équivalence des AT statoriques et rotoriques et la réactance de fuites λ nécessaires au diagramme de Potier. A partir de A (i = 1,84 A ; V = 9 V) représentant l'essai en charge inductive donnant saturation, on porte AB = 0,9 A pour retrancher les AT induits J = 16 A ramenés à l'inducteur (sur la caractéristique en court-circuit 16 A induits valent 0,9 A inducteurs). La parallèle à la partie linéaire de E(i) passant par B, coupe E(i) en M de coordonnées (i_r, E_r) représentant l'état résultant de l'alternateur. Et puisque selon Potier pour un essai inductif on doit avoir : $i_r = i - \alpha J$ et $E_r = V + \lambda J$, en abaissant de M la perpendiculaire MH sur AB, les segments HA et HM permettent de calculer α et λ .

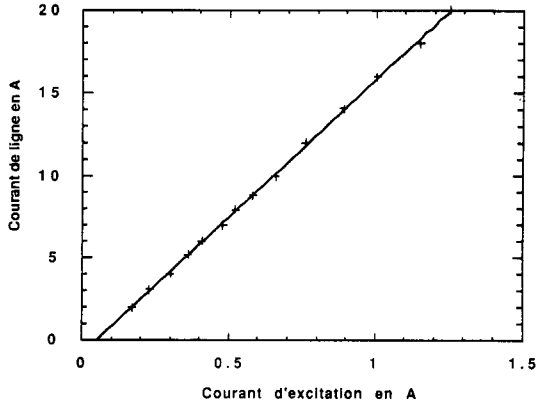
L'observation (période et structure) d'une tension simple de l'alternateur à vide permet de mesurer son nombre de paires de pôles 6 et le nombre d'encoches du stator 36, valeurs vérifiées sur un alternateur démonté. On peut aussi voir le déphasage $2\pi/3$ entre 2 tension simples, mesurer le rapport $\sqrt{3}$ et le déphasage $\pi/6$ entre tensions simple et composée. Ces vérifications sont satisfaisantes bien que la forme des tensions s'éloigne assez de la sinusoïde.

ÉTUDE DE L'ALTERNATEUR EN COURT-CIRCUIT

Après mise en court-circuit des 3 phases (et non pas d'une seule si on veut mesurer la réactance synchrone directe qui est une grandeur cyclique), on mesure le courant de ligne J en fonction du courant d'excitation i.

i(A)	0,17	0,23	0,3	0,36	0,41	0,48	0,52	0,58	0,66	0,76	0,89	1,0	1,15	1,25
J(A)	2	3	4	5,2	6	7	8	8,8	10	12	14	16	18	20

La linéarité du graphe n°5 J(i) permet d'affirmer que la saturation est longue à venir dans toute machine électrique où le secondaire est en court-circuit (transformateur de courant, moteur asynchrone) car les ampères-tours (AT) induits s'opposent pratiquement totalement aux AT inducteurs. Sa pente donne le coefficient d'équivalence des AT statorique et rotorique J = 19 (i – 0,05).



Graphe 5 : Alternateur en court-circuit

Par ailleurs la mesure d'une résistance statorique de l'alternateur en étoile donne 0,18 ohm (0,36 ohm entre bornes). En choisissant pour fém synchrone E une valeur non saturée, et en modélisant l'impédance interne d'une phase de l'alternateur par la résistance R = 0,18Ω en série avec la réactance synchrone X, la loi d'Ohm appliquée en court-circuit : $\mathbf{E} = (R + jX)\,\mathbf{J}$ conduit à X ~ 0,9Ω.

ÉTUDE DE L'ALTERNATEUR EN CHARGE

La **charge inductive** est constituée des enroulements statoriques du moteur synchrone à l'arrêt. Pour un courant d'excitation i on mesure le courant de ligne J débité, la tension simple V et les puissances active P et réactive Q par la méthode des 2 wattmètres. Le commutateur de courant (schéma n°2) permet les 2 lectures W1 et W2 sur le wattmètre, lectures toujours rendues possibles par un petit inverseur de tension. Les mesures pour J > 10 A doivent exécutées rapidement car le moteur synchrone à l'arrêt n'est pas ventilé.

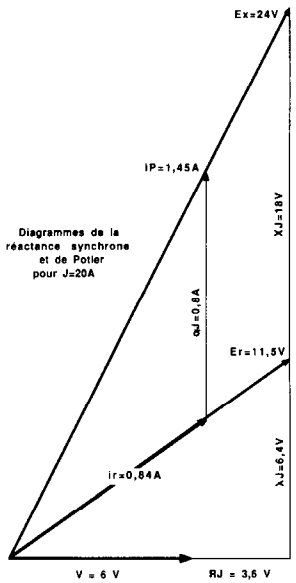
i(A)	i_X(A)	J(A)	V(V)	W1	W2	P(W)	Q(VAR)	$\phi°$
0,50	0,42	5,2	1,1	21	-3	18	42	67
1,05	1,07	9,6	6,5	70	2	72	117	58
1,84	1,65	16	9	176	-24	152	173	49

On constate qu'à excitation élevée la charge est plus résistive car les pertes fer dans le stator et le rotor du moteur synchrone croissent avec le carré de l'induction. D'ailleurs à partir de i = 1 A le rotor du moteur synchrone se met à tourner (si on ne le bloque pas) à cause du couple asynchrone.

La colonne i_X donne les valeurs théoriques du courant d'excitation calculées dans l'hypothèse de non-saturation où R = 0,18 Ω, X = 0,9 Ω et la valeur de la fém synchrone est prise sur la partie linéaire (ou son extrapolation au-delà du coude de saturation) de la caractéristique de l'alternateur à vide. En charge les AT de l'induit compensent au moins partiellement les AT inducteurs et la saturation arrive certainement pour un courant inducteur i beaucoup plus élevé qu'à vide. Sur les mesures précédentes le désaccord entre i_X et i mesuré n'est sensible en effet que pour i = 1,84 A.

Pour ce dernier essai, bien qu'il soit loin d'être purement inductif,

on ose utiliser la théorie de Potier nécessaire dès qu'il y a saturation et la construction sur le graphe n°3 mène à $\lambda = 0{,}32$ ohm pour la réactance de fuites et à un coefficient d'équivalence $\alpha = 0{,}04$ entre les AT statoriques et rotoriques.



Dessin 6 : Diagrammes de l'alternateur en charge résitive

Le diagramme de la réactance synchrone permet de calculer une fém synchrone E_X par $\mathbf{E_X} = \mathbf{V} + R\mathbf{J} + jX\mathbf{J}$ dans l'hypothèse de non-saturation, donc un courant d'excitation i_X lu sur l'extrapolation de la partie linéaire de E(i).

Le diagramme de Potier donne $\mathbf{E}_r = \mathbf{V} + R\mathbf{J} + j\lambda\mathbf{J}$, E_r fém dûe à des AT résultants i_r (la correspondance $E_r(i_r)$ est donnée par la caractéristique E(i) à vide). A ces AT $\mathbf{i}_r$, portés sur $\mathbf{E}_r$, on ajoute vectoriellement les AT induits de fuites ramenés à l'inducteur $\alpha\mathbf{J}$ pour obtenir les AT inducteurs $\mathbf{i_P}$: les AT $\mathbf{i}_r$ résultent des AT inducteurs $\mathbf{ip}$ moins les AT de fuites $\alpha\mathbf{J}$. Pour respecter les phases entre AT et fém induites, le diagramme des AT devrait être tourné de $\pi/2$.

Enfin en faisant tourner, au moyen du galet de couplage, le rotor du moteur synchrone non excité au voisinage du synchronisme, pour i = 1 A on trouve V = 7,4 V et J = 7,2 A soit une réactance synchrone du moteur V/J = 1Ω, très proche de la valeur X = 0,9Ω ci-dessus de l'alternateur non saturé (les 2 machines, de même série industrielle, sont en principe identiques). Bien que les pôles du rotor apparaissent individualisés (pôles saillants ?) on note que J varie très peu autour de

J = 7,2 A, ce qui implique l'égalité des réactances longitudinale et transversale.

La **charge résistive** se compose d'un rhéostat 350 W à lampes (cf. machines à courant continu) précédé d'un pont de Graetz triphasé récupéré sur l'alternateur de 104 Peugeot. On mesure simultanément le courant d'excitation i, le courant de ligne débité J, la tension simple de sortie V, les puissances active P et réactive Q par la méthode des 2 wattmètres (lectures W1 et W2), le couple d'entraînement Γ_u du rotor de l'alternateur. On en déduit à partir du graphe n°3 $\Gamma_u(g)$, le glissement, la vitesse N, la puissance mécanique P_u fournie par le moteur asynchrone et le rendement η de l'alternateur.

i(A)	i_x(A)	i_p(A)	J(A)	V(V)	W1	W2	P(W)	Γ_u (Nm)	N(tr/mn)	P_u(W)	η
0,32	0,32	0,32	5	0,5	12	13	25	0,11	2985	34	0,7
0,68	0,67	0,67	10	0,9	26	30	56	0,43	2955	133	0,5
1,05	1,03	0,98	15	2,2	68	78	146	1,22	2850	364	0,4
1,46	1,45	1,45	20	6	130	142	272	2,3	2650	640	0,4

La puisssance réactive Q mesurée correspond à un déphasage entre V et J de $\phi = -7°$ maximum. L'examen à l'oscilloscope de la tension simple en pleine charge montre une fonction très éloignée de la sinusoïde, formée d'arcs brisés explicables par la commutation des courants dans le pont redreseur qui engendre des harmoniques donc une puissance réactive. Pour fonctionner en régime linéaire, il faudrait 3 rhéostats montés en triphasé, ce qui coûterait plus cher...

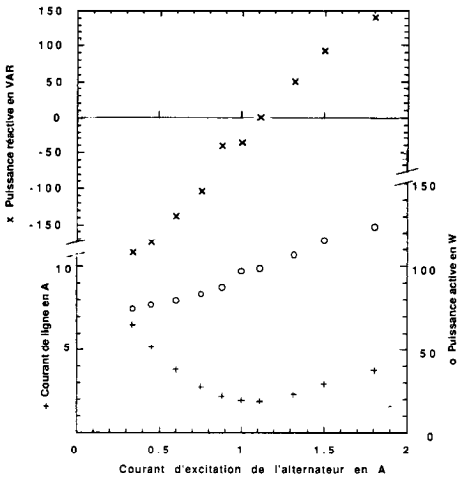
On considère cependant la charge comme résistive pour calculer les courants d'excitation i_X et i_P que permettent de prévoir les diagrammes de la réactance synchrone (machine supposée non saturée $R = 0{,}18\Omega$ et $X = 0{,}9\Omega$) et de Potier respectivement. Le dessin n°6 montre que les diagrammes pour le cas J = 20 A donnent le même résultat satisfaisant.

On constate que l'hypothèse de non-saturation de la machine permet de prédire des valeurs i_X du courant d'excitation aussi satisfaisantes en charge qu'en court-circuit (dans les 2 cas les AT induits compensent assez bien les AT inducteurs). Les valeurs i_P prédites par le diagramme de Potier sont toutes aussi satisfaisantes bien que la valeur $\lambda = 0{,}32\Omega$ de la réactance de fuites ait été obtenue dans un essai pas complètement dewatté.

ÉTUDE DU MOTEUR SYNCHRONE À VIDE

L'accrochage du moteur synchrone sur le «réseau» de l'alternateur se fait pour les 2 courants d'excitation égaux à 0,5A, soit à l'extinction des 3 lampes 24 V, soit sur l'oscilloscope lorsque les 2 tensions simples destinées à être couplées se présentent en phase. Malgré la fréquence élevée des fém (~ 300 Hz à cause des 6 paires de pôles des machines synchrones), l'opération est aisée.

On monte simultanément les 2 courants d'excitation à 1A.

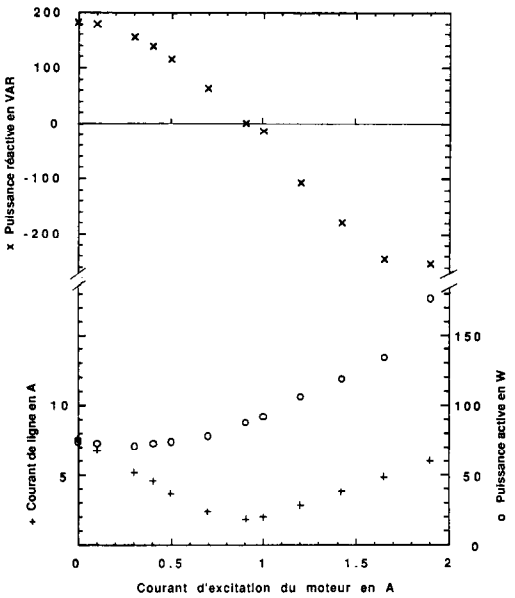


.Graphe 7 : Moteur synchrone à vide pour i_M = 1A

En laissant l'excitation du moteur à i_M = 1A, on fait varier celle i_A de l'alternateur en mesurant le courant de ligne J, la tension simple V et les puissances active P et réactive Q échangées. Le décrochage a lieu pour i_A = 0,3 A. Sur les graphes n°7 on constate bien que $J(i_A)$ passe par un minimum pour i_A = 1,1 A lorsque l'échange de puissance réactive Q est nul. Pour i_A > 1,1 A l'alternateur fournit de la puisssance réactive au moteur ; et pour i_A < 1,1 A le moteur magnétise l'alternateur.

De même en maintenant l'excitation de l'alternateur à i_A = 1A et en faisant varier celle i_M du moteur on obtient encore un minimum de J pour i_M = 0,9 A, mais pas de décrochage du moteur (cf. graphes n°8).

Pour $i_M < 0,9$ A l'alternateur fournit de la puissance réactive au moteur et pour $i_M > 0,9$ A c'est l'inverse : le moteur synchrone joue son rôle de compensateur synchrone



Graphe 8 : Moteur asynchrone à vide pour $i_A = 1A$

Les courbes J(i) dans les 2 cas précédents ne sont pas à proprement parler les courbes en «V» de Mordey puisque la puissance active P n'est pas constante. Cependant elles font comprendre tout l'intérêt du fonctionnement des machines synchrones à Q = 0 qui minimise les courants de lignes J, donc les pertes Joules dans le réseau.

Sur les 2 graphes nº 7 et 8 le minimum de J a lieu pour une valeur de i_A supérieure à i_M. On le comprend au regard du diagramme de la réactance synchrone nº 9a des 2 machines en fonctionnement à Q = 0 : la fém synchrone E_A de l'alternateur est alors plus élevée que celle E_M du moteur car $E_A^2 = (V + RJ)^2 + (XJ)^2$ et $E_M^2 = (V - RJ)^2 + (XJ)^2$ conduisent (avec $R = 0,18\Omega$; $X = 0,9\Omega$; V = 14V et J = 1,9 A) à $E_A = 14,4$ V et $E_M = 13,7$ V soit une différence de 0,7 V sur les fém et 0,1 A sur les courants d'excitation. L'angle θ alors calculé entre les 2 fém synchrones est égal à 12º (cf. moteur synchrone en charge).

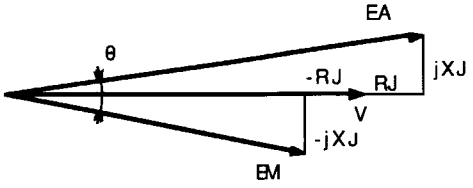


Diagramme 9a
Moteur synchrone à vide
Puissance réactive Q=0
R≠0 , θ = 12°

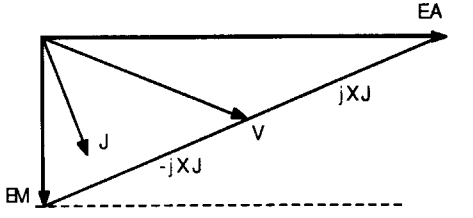


Diagramme 9b
Moteur synchrone en charge
au décrochage θ=π/2
pour R=0

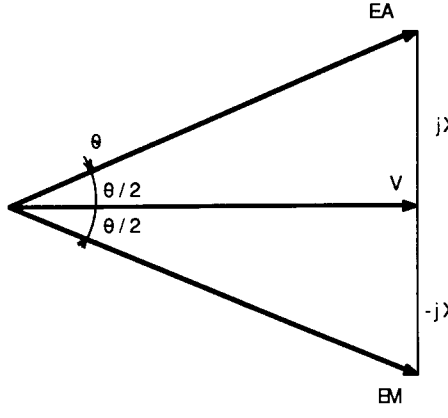


Diagramme 9c
Moteur synchrone en charge
pour R=0 et Q=0
$P = 3\ EA\ EM / 2X \sin\theta$
$J = E / X \sin\theta/2$

Diagrammes n° 9 : Moteur asynchrone alimenté par l'alternateur

Ces 3 diagrammes sont ceux des réactances synchrones des 2 machines non-saturées

Le diagramme n° 9a montre que c'est la résistance R non nulle de l'induit qui entraîne que $E_A > E_M$ (d'où $i_A > i_M$) au minimum des 2 courbes en «V» à vide : $J(i_M)$ à i_A constant ou $J(i_A)$ à i_M constant, minimum dû à un échange nul de puissance réactive.

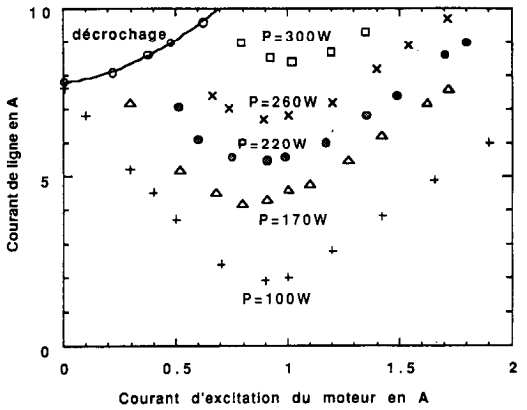
Dans le cas général d'un moteur synchrone alimenté par un alternateur identique, si on suppose R = 0, l'expression de la puissance active $P = 3E_AE_M \sin\theta / 2X$ selon G. Séguier [2]. Le fonctionnement à P constante implique que $E_M \sin\theta = 2PX / 3E_A$ reste constant, c.a.d. que l'extrémité de E_M se déplace sur une parallèle à E_A figurée ici en pointillé. Le diagramme n° 9b montre le décrochage pour $\theta = \pi/2$ lorsque E_M prend la valeur minimum $2PX / 3E_A$.

Le diagramme n° 9c montre le fonctionnement des 2 machines à puissance réactive échangée Q nulle et avec R = 0. Alors en plus de $P = 3E_AE_M \sin\theta/2X$ on a $J = E \sin\theta / 2X$

ÉTUDE DU MOTEUR SYNCHRONE EN CHARGE

Pour que le moteur synchrone exerce un couple constant, on utilise une courroie frottant sur une poulie, et tendue par un ressort accroché à différentes positions. Ce procédé, intéressant du point de vue embrayage de la charge, a l'inconvénient d'échauffer rapidement la poulie et les roulement à billes voisins, si bien que les mesures doivent être brèves. On relève donc les courants i_M et J pour i_A = 1A et différentes tensions (positions 1 à 5 du ressort : la position 1 donne la charge nulle et la position 6 provoque le décrochage du moteur) de la courroie - cf. graphe nº10. P indique la puissance active consommée par le moteur à i_M = 1A. i_D est la valeur expérimentale du courant de décrochage, et i_{th} et i_X sont ses valeurs théoriques.

Position	1	2	3	4	5
P(W)	100	170	220	260	300
I_D(A)	< 0	0,2	0,4	0,49	0,62
i_{th}(A)	0,33	0,53	0,67	0,80	1
i_X(A)	< 0	0,22	0,37	0,49	0,61



Graphe 10 : Moteur synchrone en charge

On retrouve (cf. graphe nº10) encore l'allure en «V» des courbes $J(i_M)$ bien qu'elles n'aient pas été relevées à puissance active P rigoureusement constante. Le décrochage a lieu pour des valeurs i_D du courant d'excitation de plus en plus élevées quand P augmente. C'est

bien ce que donne la théorie de la réactance synchrone sans saturation en négligeant la résistance statorique : le décrochage devrait se produire pour $E_M(i_{th}) = 2XP/3E_A$ car $P = 3\ E_A\ E_M \sin\theta/2X$ selon G. Séguier [2] (diagramme 9b). Si i_{th} croît bien avec P, l'accord avec les valeurs expérimentales n'est pas du tout satisfaisant. Par contre si dans la formule ci-dessus on prend pour P la puissance utile du moteur (après soustraction des 100 W de pertes mesurées à vide) l'accord de i_X ainsi calculé avec i_D mesuré est bien meilleur. Cette amélioration est normale puisque le modèle utilisé néglige pertes Joules, fer et mécaniques.

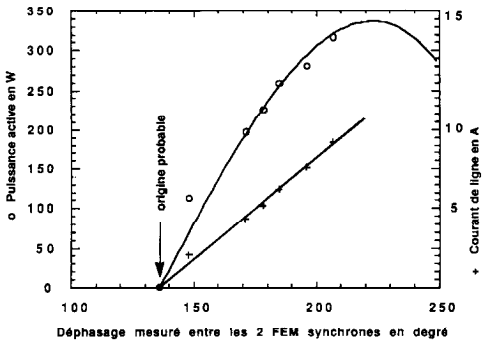
Enfin on peut mesurer **l'angle de déphasage** θ entre les 2 fém synchrones E_A et E_M de l'alternateur et du moteur, en notant sur l'oscilloscope le déphasage Δt entre les 2 fém de période T délivrées par les 2 «dynamos» en bouts d'arbres : $\theta° = 360 \times 6/4 \times \Delta t/T$. Le rapport 6/4 tient compte des 6 paires de pôles des machines synchrones et des 4 paires de pôles des « dynamos». On ne peut malheureusement pas mesurer l'origine des $\theta = 0$, mais sachant que le diagramme de la réactance synchrone donne $\theta = 12°$ pour le point de puissance minimum P = 100 W du moteur à vide, on peut placer l'origine $\theta = 0$ vers 136° mesurés.

Donc en maintenant $i_A = 1{,}15$ A et $i_M = 1$A (valeurs des courants d'excitation permettant un fonctionnement aussi résistif que possible), on fait varier la tension de la courroie par la position de l'extrémité du ressort tout en notant J, P et Q.

Position	0	1	2	3	4	5
J(A)	2,1	4,3	5,2	6,2	7,6	9,2
W1	56	86	95	110	122	134
W2	56	111	130	148	160	182
P(W)	112	197	225	258	282	316
Q(VAR)	0	– 43	– 60	– 66	– 66	– 83
$\phi°$	0	– 12	– 15	– 14	– 13	– 15
T(ms)	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6
Δt(ms)	1,4	1,65	1,75	1,85	2	2,15
$\theta°$	148	171	178	185	196	207

En théorie (cf. diagramme n°9c) les graphes P et J (cf graphe n°11) devraient suivre les lois $P(\theta) = 3\ E_A\ E_M \sin\theta/2X$ et $J(\theta) = E/X \sin\theta/2$ mais le décrochage pour la position n°6 du ressort a lieu avant de

pouvoir observer sérieusement cette variation sinusoïdale. Par extrapolation sur le graphe linéaire P(Δx) de la puissance active P en fonction de l'allongement Δx du ressort, cette position n°6 correspond à une puissance maximum de 345 W. La puissance maximum théorique calculée (avec E_A = 14 V et E_M = 16 V) au décrochage par $P = 3E_AE_M/2X$ est de 370 W. Sur le graphe n°11 on constate qu'une sinusoïde d'amplitude 345 W et d'origine 136° ne passe loin que seulement du point à vide. De même la pente expérimentale de la partie linéaire de J(θ) au voisinage de l'origine est trouvée égale à 7,2 A au lieu de E/2X = 8,3 A théoriques. Les différences entre performances expérimentale et théorique doivent encore pouvoir s'expliquer par les 100 W de pertes (effet Joule, hystérésis, courants de Foucault, frottements mécaniques) dont le diagramme de la réactance synchrone simplifié n°9c ne tient pas compte



Graphe 11 : Moteur synchrone en charge

A cette exception près le modèle de la réactance synchrone où la machine en charge est supposée non saturée, permet d'interpréter simplement les mesures, et une théorie plus élaborée tenant compte de la saturation - ici celle de Potier - ne s'avère pas meilleure.

CONCLUSION

Malgré la modestie des moyens mis en œuvre et le caractère bricolé du matériel de récupération automobile, l'étudiant de DEUGA2 ou de licence peut sans danger s'initier sur ces 8 bancs à la pratique des moteurs électriques. Excepté le problème de commutation sur les

machines à courant continu, tous les points fondamentaux des machines électriques sont abordés. En raison de la non-saturation des machines en charge, les phénomènes rencontrés sur les moteur asynchrone, alternateur et moteur synchrone sont bien expliqués en modélisant une phase simplement par une impédance interne.

Espérons que cela puisse aider l'étudiant dans son expérience professionnelle future ou dans sa vie tout court, où il est sûr de rencontrer des moteurs à courant continu, asynchrones ou synchrones.

Merci à J.P. Perthuis pour ses précieux conseils et à l'atelier de l'Institut des Sciences Nucléaires de Grenoble pour les ébauches mécaniques.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Étude des machines électriques. B.U.P. n°657 (1953) 5 par P. GIRONDEAU
[2] Électrotechnique Industrielle. Lavoisier Tec/Doc. par G. SÉGUIER et F. NOTELET