

Production et conversion d'énergie électrique

Présenté par Charles Paleo

Correcteurs : Mickaël Melzani¹ et Hervé Gayvallet.

Commentaires généraux

Le montage présenté est d'un bon niveau et il apparaît clairement que le travail fourni a été important.

Quelques commentaires et remarques :

- Le tableau était bien tenu et organisé. Il faudrait toutefois ajouter un schéma des dispositifs utilisés afin d'identifier les différents éléments et rendre l'exposé plus clair. Ajouter également un schéma électrique lorsque nécessaire.
- Il est important que le jury puisse voir les appareils de mesure depuis son bureau. Essayer donc de tourner les wattmètres vers le jury et non pas vers le tableau.
On peut même pousser les choses plus loin et écrire sous chaque wattmètre s'il mesure l'inducteur ou l'induit.
- Lors de l'ajout d'un point de mesure à un ensemble de points pris en préparation, il faut absolument indiquer sur le graphique où est situé le nouveau point.
- Il faut globalement davantage décortiquer le fil de l'exposé, en le présentant et en justifiant les mesures effectuées.

Par exemple lors de l'étude de la génératrice il faut annoncer d'emblée que cette machine est un quadripôle (grandeurs Γ , ω , U , I), décrite par deux équations intrinsèques² de fonctionnement : l'équation électrique et l'équation mécanique. Il s'agit de modèles (avec des simplifications, et écrits en régime permanent donc pas d'auto-inductance ni de moment d'inertie du rotor).

(i) On va réaliser des mesures pour vérifier si ces modèles sont acceptables (première étape lors d'une régression linéaire sur les données : on dit clairement si oui ou non la modélisation affine ou linéaire est correcte).

(ii) On va en profiter pour déterminer les paramètres physiques qui apparaissent dans ces équations (deuxième étape lors d'une régression linéaire : on lit les coefficients a et b), c'est-à-dire le couple résistif, le terme $k\Phi$, la résistance d'induit.

(iii) On va étudier le rendement et, pour le point où le rendement est maximal, on va utiliser les paramètres déterminés précédemment pour faire un bilan détaillé des pertes.

À propos du plan

Le choix du plan est toujours une affaire délicate et personnelle.

- Il semble difficilement envisageable sans dégrader la qualité des études conduites d'aborder à la fois la génératrice CC, le transformateur et le redresseur.
- Il semble que le titre (production d'énergie électrique, conversion d'énergie électrique) invite à présenter un dispositif de production d'énergie électrique, et un dispositif de conversion d'énergie électrique - électrique.
- On peut donc envisager d'aborder la machine CC et le transformateur, en explorant plus à fond un des deux. Ou bien la machine CC et le redresseur.

Ne pas oublier que la machine CC ou le transformateur peuvent donner lieu chacun à un grand nombre de mesures.

Retour sur le montage

1 – Production : génératrice à courant continu

Remarque sur l'alimentation et le démarrage/arrêt du moteur CC :

1. (mickael.melzani@gmail.com)

2. Deux équations pour quatre grandeurs : ceci ne suffit donc pas à spécifier l'état de la machine. Il faut y ajouter deux autres équations qui proviennent de contraintes extérieures : le lien entre U et I imposé par la charge, du type $U = RI$ si la charge est purement résistive (ce qui n'est pas le cas le plus général), et le lien entre Γ et ω .

On a l'habitude d'utiliser ce banc moteur en excitations séparées : l'inducteur et l'induit sont alimentés par deux alimentations indépendantes. Il est alors inutile d'utiliser un rhéostat de démarrage (et cela serait mal vu par le jury). Il faut par contre bien alimenter d'abord le circuit inducteur afin de fournir un flux Φ et démarrer sous charge minimale. Puis augmenter progressivement la tension aux bornes de l'induit. Ceci évite une sur-intensité dans le circuit de l'induit. Il faut dire tout ceci à l'oral en l'effectuant, en particulier mentionner que l'on se passe de rhéostat de démarrage (ceci afin d'éviter toute mauvaise interprétation de la part du jury, pas forcément spécialiste des moteurs).

De même pour arrêter le moteur il faut d'abord ramener l'alimentation de l'induit à zéro. Puis couper l'alimentation de l'inducteur. Ceci évite un emballement du moteur.

On retiendra donc que l'inducteur doit être alimenté en premier et coupé en dernier.

1.2 – Étude électrique à vide

À vide, le circuit de l'induit est ouvert et donc le courant qui le parcourt est nul. L'équation électrique est alors $U_g = \Phi_g \omega$, sans terme $r_g I_g$, donc on s'attend à une ordonnée à l'origine nulle. Il faut donc d'abord faire une régression en $y = ax + b$, voir si la valeur zéro est dans les incertitudes pour b , et si c'est le cas le dire et recommencer avec un modèle en $y = ax$.

1.3 – Étude électrique en charge

Il y a eu une confusion dans cette partie, où a été effectuée l'étude de l'équation mécanique du moteur. C'est plutôt l'équation mécanique de la génératrice qu'il faut étudier.

Celle-ci s'écrit $C = \Phi_g I_g + C_r$, et on en déduit une seconde mesure de Φ_g que l'on compare à celle trouvée en 1.2.

1.4 – Rendement

Présenté ici : tracé de la courbe $\eta = \frac{U_g I_g}{C\omega + U_e I_e}$ en fonction de la résistance de charge $R = U_g / I_g$ à ω fixé.

On peut aussi envisager le même tracé en fonction de la puissance utile $U_g I_g$.

On peut également envisager d'enlever le terme $U_e I_e$ du dénominateur de η , car il sert uniquement à fournir un flux Φ_g qui pourrait être produit par un aimant permanent. En effet, ce terme $U_e I_e$ qui est constant ici, tend à dominer le terme $C\omega$ si ω n'est pas trop grand, et fausse donc un peu l'étude.

Enfin, il peut être intéressant d'effectuer un bilan détaillé des pertes pour un point de fonctionnement donné (celui où η est maximal). On calcule alors numériquement $U_e I_e$, $C\omega$, $\mathcal{P}_{\text{utile}} = U_g I_g$, $\mathcal{P}_{\text{Joules cuivre}} = r_g I_g^2$, $\mathcal{P}_{\text{frottements}} = C_r \omega$. On regarde ensuite si on a $U_e I_e + C\omega \simeq U_e I_e + U_g I_g + \mathcal{P}_{\text{Joules cuivre}} + \mathcal{P}_{\text{frottements}}$, ce qui valide a posteriori les valeurs numériques trouvées pour r_g et C_r en 1.2 et 1.3.

2 – Conversion : transformateur électrique

2.1 – Rappels

Il faut savoir expliquer l'origine physique des lois $U_2 = mU_1$ et $I_2 = I_1/m$ (écrites ici pour les valeurs efficaces).

La première provient de la conservation du flux magnétique total dans le noyau magnétique et de l'application de la loi de Faraday sur l'enroulement primaire et l'enroulement secondaire.

La seconde provient de l'hypothèse d'une transmission intégrale de la puissance du primaire vers le secondaire, ce qui se traduit par $U_1 I_1 = U_2 I_2$. Elle est moins robuste que la première et est mise immédiatement en défaut en essai secondaire à vide.

2.2 – Étude à vide : rapport de transformation

2.3 – Étude en court-circuit : pertes cuivre

Rappelons que l'étude avec le secondaire court-circuité se fait nécessairement avec des tensions U_1 et U_2 faibles, car sinon les courants dépassent vite les valeurs limites.

On est donc à faible tension (ce qui minimise les pertes fer, qui sont $\propto U_1^2$) et courant assez fort (ce qui rend important les pertes joules) : la mesure de la puissance envoyée dans le primaire permet une mesure des pertes joules.

2.4 – Étude en charge : pertes fer et rendement

Peut-être aurait-il fallu faire une étude des pertes fer en 2.4, puis une étude plus générale du rendement en 2.5 ?

Rappelons ici que l'étude avec secondaire en circuit ouvert permet d'être à courants très faibles (ce qui minimise les pertes joules) et à tensions U_1 et U_2 nominales (ce qui rend les pertes fer significatives) : la mesure de la puissance envoyée dans le secondaire permet une mesure des pertes fer.

Comme avec la génératrice CC, on peut compléter l'étude du rendement par un bilan détaillé des pertes pour un point de fonctionnement donné : on mesure P_1 puissance au primaire, P_2 puissance au secondaire, on estime $\mathcal{P}_{\text{joules}}$ et $\mathcal{P}_{\text{fer}}$ avec les méthodes précédentes, puis on voit si $P_1 \simeq P_2 + \mathcal{P}_{\text{joules}} + \mathcal{P}_{\text{fer}}$.

3 – Conversion alternatif-continu : le redresseur

Pas eu le temps d'aborder cette partie.

Retour sur les questions

Les questions posées par le jury (et ici par les correcteurs) ont pour but de revenir sur les points peu clairs du montage, et ensuite de tester plus largement vos connaissances.

On reprend ci-dessous quelques-unes des questions abordées.

- Pourquoi EDF préfère-t-il utiliser des hautes tensions pour le transport d'électricité ?
→ Car on veut transporter une puissance fixée UI tout en minimisant les pertes joules en rI^2 sur les lignes.
- La relation $U_2 = mU_1$ prévoit que lors de l'étude avec secondaire court-circuité ($U_2 = 0$), on a $U_1 = 0$. Pourquoi n'est-ce pas le cas en pratique ?
→ Car la relation utilise des hypothèses qui ne sont plus vérifiées. En particulier les résistances des bobinages ne sont plus négligeables, surtout si les courants sont importants, et engendrent des chutes de tension.
- La relation $I_2 = I_1/m$ prévoit que lors de l'étude avec secondaire ouvert ($I_2 = 0$), on a $I_1 = 0$. Pourquoi n'est-ce pas le cas en pratique ?
→ Encore une fois, certaines hypothèses ne sont plus vérifiées. En particulier comme la tension U_1 n'est pas nul, le cycle d'hystérésis est parcouru et il y a des pertes fer. La puissance dissipée dans ces pertes fer doit bien provenir de quelque part : c'est la puissance envoyée dans le primaire (ce qui nécessite donc $I_1 \neq 0$).

De façon générale on montre que l'on a la relation $n_1 I_1 + n_2 I_2 = n_1 I_0$, avec I_0 le courant magnétisant (voir Quaranta, ou le Cap Prépa ancien programme PSI). Lorsque I_1 et I_2 sont grands devant I_0 , on a bien la relation $I_2 = I_1/m$. Mais pas lorsqu'ils sont faibles. En particulier si $I_2 = 0$ on trouve $I_1 = I_0$. On note que $I_0 \propto 1/\mu_r$, et devient nul dans la limite d'un noyau de perméabilité magnétique μ_r infinie.