

IMPORTANT : Soigner la présentation de votre copie ! Cela entrera dans la notation.

Une feuille de notes personnelles recto-verso, une calculatrice et un dictionnaire sont autorisés.

0 – CONTEXTE DE L'ÉTUDE ET DONNEES

Cet examen porte sur une installation électrique comportant un système de stockage d'énergie à volant d'inertie, associé à une production photovoltaïque ($V_{PV} = 120 \text{ V}$ continu au maximum) et une maison individuelle fonctionnant sous 230 V efficace en alternatif monophasé (Figure 1). Les différents éléments sont interconnectés grâce à un « bus continu » régulé en permanence à $U_{bus} = 350 \text{ V}$ continu. Une machine synchrone triphasée et son CEP permettent de convertir l'énergie mécanique du volant d'inertie en énergie électrique dans les deux sens. La maison ne fait que consommer de l'énergie électrique, en la prenant soit du réseau, soit de l'installation électrique avec panneaux photovoltaïques et volant d'inertie.

Les panneaux photovoltaïques utilisés sont supposés avoir un rendement de 18%, les trois CEP de l'installation électrique sont supposés avoir des rendements identiques de 95%. La machine utilisée est une machine synchrone à $p=10$ paires de pôles, elle est conçue pour pouvoir délivrer en mode générateur une puissance électrique permanente de 2 kW et une puissance électrique maximale de 4 kW. Son rendement sera considéré comme constant et égal à 94% pour l'ensemble des points de fonctionnement considérés (entre $N_b = 0,2 \times N_{max}$ et $N_{max} = 3000 \text{ tr/min}$).

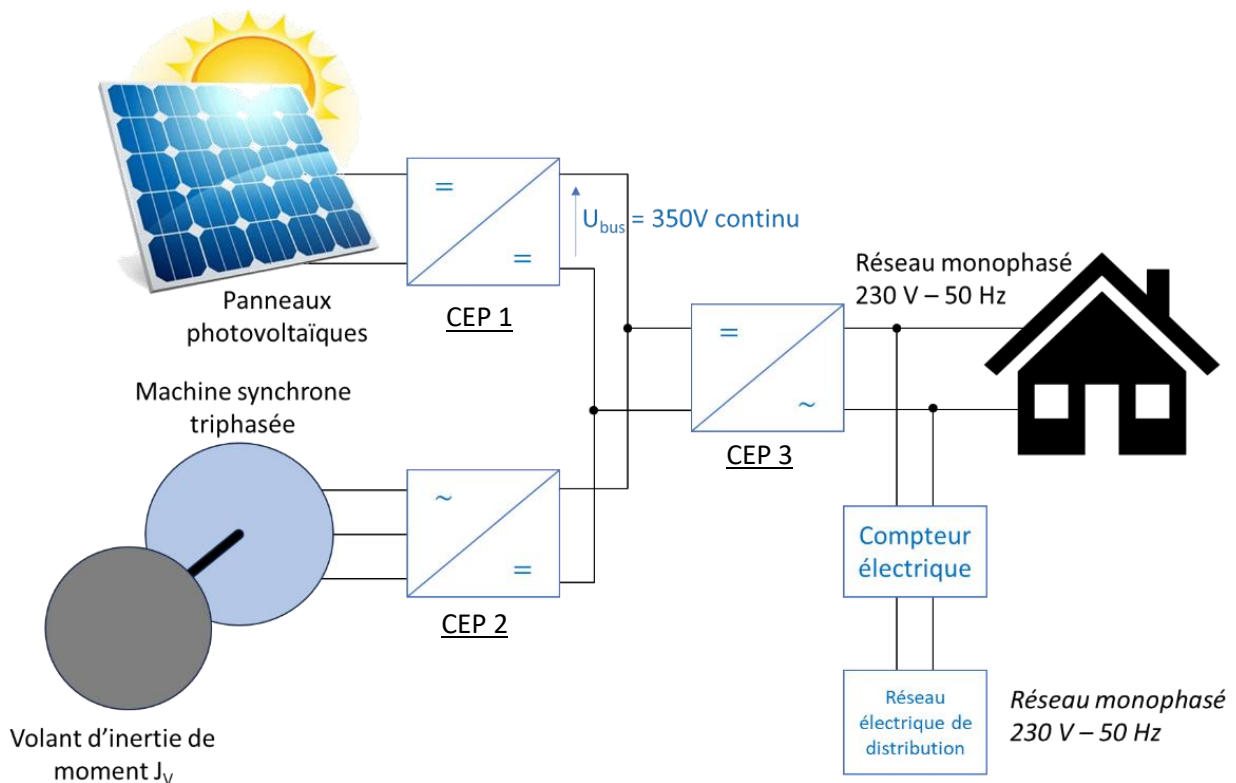


Figure 1. Vue d'ensemble du système

1 – ÉTUDE DU VOLANT D'INERTIE (30 MIN)

On rappelle que le moment d'inertie d'un cylindre est $J = 0,5 M R^2$ avec M sa masse et R son rayon. Ici, le cylindre est supposé n'être fait que de béton (masse volumique de 2300 kg/m^3), bien qu'en réalité il soit entouré de fibres pour sa bonne tenue mécanique. La longueur de ce cylindre est fixée à 1 m.

1.1 Donner l'expression de l'énergie cinétique en rotation.

1.2 En prévoyant que la machine électrique pourra tourner à 3000 tr/min au maximum, quel est le moment d'inertie nécessaire pour stocker 10 kWh ?

1.3 Exprimer le moment d'inertie en fonction de la densité du béton et du rayon du cylindre, puis calculer le rayon nécessaire pour atteindre le moment d'inertie de la question 1.2.

1.4 En partant d'une vitesse de rotation à 3000 tr/min et afin de fournir une puissance mécanique de 2,13 kW, quelle sera l'énergie restante dans le volant d'inertie après 2 heures ? Après 4 heures ? En déduire sa vitesse de rotation pour chacun de ces deux points (après 2 heures et après 4 heures à 2,13 kW).

1.5 Toujours pour que le volant d'inertie fournisse 2,13 kW, quels couples doivent être fournis aux vitesses suivantes : Ω_{max} , 50% de Ω_{max} et 20% de Ω_{max} ?

1.6 Quel est le pourcentage d'énergie restant dans le volant d'inertie quand celui-ci tourne à 20% de Ω_{max} par rapport à quand il tourne à Ω_{max} ?

1.7 Argumenter et conclure sur l'intérêt de faire travailler le volant d'inertie en-dessous de 20% de Ω_{max} .

2 – ÉTUDE DE LA MACHINE TRIPHASEE (35 MIN)

2.1 A quelles fréquences (et pulsations) doit être alimentée la machine pour les deux vitesses extrêmes de la plage considérée. On rappelle que $\Omega = \omega/p$.

2.2. Si l'on considère que le facteur de puissance est égal à 1 et que l'on admet que les tensions composées ont une valeur efficace de 273 V à la vitesse de base N_b , quel est le courant efficace I par phase requis pour délivrer la puissance maximale ?

2.3 Donner le couple fourni à la puissance maximale et à la vitesse de base N_b .

2.4 Donner le coefficient k_C correspondant à l'expression du couple $C = k_C \cdot I$.

2.5 La tension composée étant de 273 V efficaces, donner la valeur de la tension simple correspondante.

L'expression de la tension simple \underline{V} de la machine étant (en négligeant la résistance des bobinages) : $\underline{V} = \underline{E} - jL\omega \cdot \underline{I}$

2.6 Tracer le diagramme de Fresnel correspondant en tenant compte du fait que le facteur de puissance est égal à 1.

2.7 A l'aide de cette construction, calculer la module de \underline{E} . En déduire le coefficient k_v tel que $|\underline{E}| = k_v \cdot \Omega$. **Indications :** on considèrera que $L = 10$ mH et on rappelle que la pulsation est celle calculée à la question 2.1 pour la vitesse de $0,2 \times N_{max}$.

On étudie à présent le point de fonctionnement à puissance maximale et vitesse maximale.

2.8 Quel est le couple délivré par la machine et le courant correspondant, en supposant le coefficient k_C inchangé.

2.9 Si l'on considère un coefficient $k_v = 2,65$ V_{eff}/rad/s constant pour toute la plage de vitesses considérée, quelle devraient être la f.e.m. simple, la tension simple et la tension composée à appliquer pour atteindre la vitesse maximale (toujours à facteur de puissance unitaire) ? Sachant que le CEP associé ne peut pas produire ou recevoir de tensions supérieures à 273 V efficaces entre phases, est-ce possible ?

Note : on peut réduire artificiellement le coefficient k_v en introduisant un déphasage φ entre \underline{I} et \underline{V} . L'objectif est donc de trouver le signe de cet angle permettant d'éviter l'augmentation de \underline{V} lorsque la f.e.m. \underline{E} augmente, afin de la ramener à un niveau acceptable pour le système.

2.10 (bonus) Retracer le diagramme de Fresnel de la question 2.6 pour $\varphi > 0$ et $\varphi < 0$. Conclure sur la bonne option pour travailler dans la plage de vitesse du volant d'inertie.

2.11. En considérant que la bonne configuration à $N = N_{max}$ conduit à un $\cos \varphi = 0,6$, calculer le courant I fourni toujours pour la même valeur efficace de tensions (273 V efficace entre phases).

3 – ETUDE DE L'INSTALLATION ELECTRIQUE (30 MIN)

3.1 Sachant que l'on peut espérer obtenir un ensoleillement fournissant 4 kWh/jour/m^2 en Picardie et vus les rendements de l'installation électrique, quelle surface de panneaux photovoltaïques faudrait-il pour pouvoir stocker 10 kWh par jour dans le volant d'inertie ?

3.2 Quelle est la puissance maximale fournie au volant d'inertie en prenant un ensoleillement maximal de 1 kW/m^2 en conditions standard ? Est-ce que la surface calculée à la question 3.1 vous paraît satisfaisante ? Justifier.

3.3 Donner les besoins de chaque CEP en termes de réversibilité en tension et courant. Donner les noms des structures nécessaires pour les CEP 2 et 3 (le CP 1 sera étudié dans la partie IV).

3.4 Soit la situation suivante : les tensions V_{PV} et U_{bus} sont strictement constantes (120 V et 350 V respectivement), le volant d'inertie absorbe 2 kW (mécanique) et le CEP 3 fournit 500 W à la maison (son $\cos(\varphi)$ est supposé égal à 1):

3.4.1 Quel est le courant dans le CEP 2 du côté du bus continu ?

3.4.2 Quels sont les courants côté bus continu et côté maison dans le CEP 3 ?

3.4.3 Quelle puissance électrique doivent fournir alors les panneaux photovoltaïques ? La surface calculée à la question 3.1 peut-elle suffire ?

4 – ETUDE DU CEP DES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES (25 MIN)

Le convertisseur requis est celui présenté à la **figure 2**. On considèrera pour l'étude de celui-ci que le transistor T est piloté en MLI à une fréquence $F_d = 1/T_d = 20 \text{ kHz}$ avec un rapport cyclique α réglable (transistor passant (avec $V_T = 0$) sur un intervalle de durée $\alpha.T_d$ et bloqué (en circuit ouvert) pendant $(1-\alpha).T_d$). La diode D est supposée idéale. Lorsqu'elle est passante : le courant circule vers la droite et sa tension est nulle. Lorsqu'elle est bloquée, son courant est nul et sa tension V_D est négative.

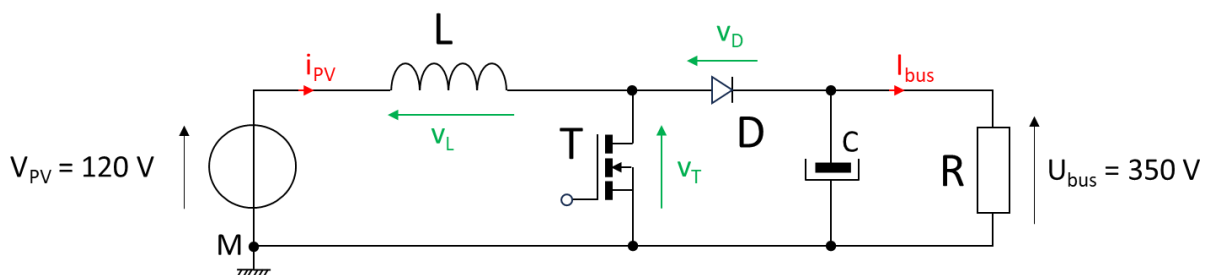


Figure 2. Convertisseur associé aux panneaux photovoltaïques

4.1 Donner l'équation de la maille constituée de la source de tension V_{PV} , de la bobine L et du transistor T. Donner également l'équation de la maille constituée du transistor T, de la diode D et du condensateur C (ce dernier ayant la même tension que R, soit U_{bus}).

Pour les prochaines questions, on admettra que le courant i_{PV} dans la bobine ne s'annule jamais et que la fréquence F_d est suffisamment élevée pour que la tension V_L prenne une valeur constante V_{L1} durant l'intervalle de durée $\alpha.T_d$ et une autre valeur constante V_{L2} durant l'intervalle de durée $(1-\alpha).T_d$.

4.2 Durant l'intervalle de durée $\alpha.T_d$: combien valent V_L et V_D ? Est-ce que la diode est passante ou bloquée ? Est-ce que le courant dans l'inductance augmente ou diminue ?

4.3 Durant l'intervalle de durée $(1-\alpha).T_d$: combien valent V_L et V_D ? Est-ce que la diode est passante ou bloquée ? Est-ce que le courant dans l'inductance augmente ou diminue ?

4.4 En notant V_{L1} la valeur de la tension V_L durant l'intervalle de durée $\alpha.T_d$, et V_{L2} sa valeur durant l'intervalle de durée $(1-\alpha).T_d$, donner l'expression de la valeur moyenne de V_L en fonction de V_{L1} , V_{L2} et α .

4.5 En régime établi (périodique) du convertisseur, justifier pourquoi la valeur moyenne de la tension V_L est nulle. Donner alors la valeur du rapport cyclique α en fonction de V_{L1} , V_{L2} , puis sa valeur numérique.