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'ETUDE 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 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 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 <u>électrique</u> permanente de 2 kW et une puissance <u>électrique</u> 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 $N_{\max} = 3000$ tr/min).

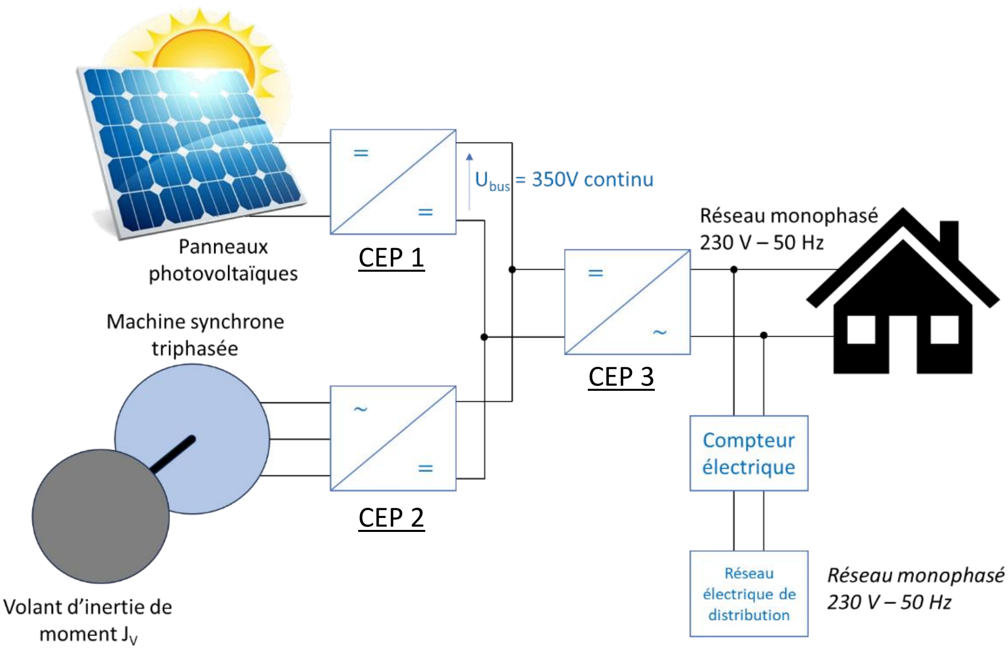


Figure 1. Vue d'ensemble du système

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

On rappelle que le moment d'inertie d'un cylindre est J = 0,5 M R² avec M sa masse et R son rayon. Ici, le cylindre est supposé n'être fait que de béton (masse volumique de 2300 kg/m³), 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.

$$E = 0{,}5\, J\, \Omega^2$$

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 ?

$$J = \frac{2E}{\Omega^2} = 730\ kg.m^2$$

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.

$$J = 0{,}5\ M\ R^2 = 0{,}5\ \rho_{beton}\ V\ R^2 = \mathbf{0{,}5\ \rho_{beton}\ L\ \pi\ R^4}$$

Donc $R = \left(\frac{2\,J}{\rho_{beton}\,L\,\pi}\right)^{1/4} = 0{,}67\ m = \mathbf{67\ cm}$

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).

Après 2h : il restera 10-4,26 = **5,74 kWh**, soit une vitesse de rotation de **238 rad/s (2274 tr/min)**.

Après 4h : il restera 10-8,52 = **1,48 kWh**, soit une vitesse de rotation de **121 rad/s (1155 tr/min)**.

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} ?

Il faudra fournir respectivement **6,8 Nm**, **13,6 Nm** et **33,9 Nm**.

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} ?

$E = 0{,}5\ J\ (0{,}2\ \Omega_{\max})^2 = \frac{4}{100} \times 0{,}5\ J\ \Omega_{\max}^2$ => **4% de l'énergie**

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

Cela est peu intéressant, car :

- cela oblige à atteindre des couples très élevés pour la machine
- il y a très peu d'énergie à récupérer.

2 – ETUDE 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 $\Omega = \omega / p$.

La vitesse de rotation N de la machine synchrone étant liée à la fréquence d'alimentation par la formule $N = \frac{60\times f}{p}$, on a

$$\boldsymbol{f_{\min} = \frac{p\times N_{\min}}{60} = \frac{10\times 0{,}2\times 3000}{60} = 100\ \text{Hz d'où}\ \omega_{\min} \approx 628\ \text{rad/s}}$$

$$\boldsymbol{f_{\max} = \frac{p\times N_{\max}}{60} = \frac{10\times 3000}{60} = 500\ \text{Hz d'où}\ \omega_{\max} \approx 3142\ \text{rad/s}}$$

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 ?

La puissance électrique a pour expression $P = \sqrt{3}U.I.\cos\varphi$ d'où $\boldsymbol{I = \frac{P}{\sqrt{3}U.\cos\varphi} = \frac{P}{\sqrt{3}U} = \frac{4000}{\sqrt{3}\times 273} = 8{,}45\ \text{A}}$

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

La puissance mécanique étant de 4000/0,94 = 4255 W, on en déduit que le couple est égal à 4255/(2π x 10)=**67,7 N.m**.

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

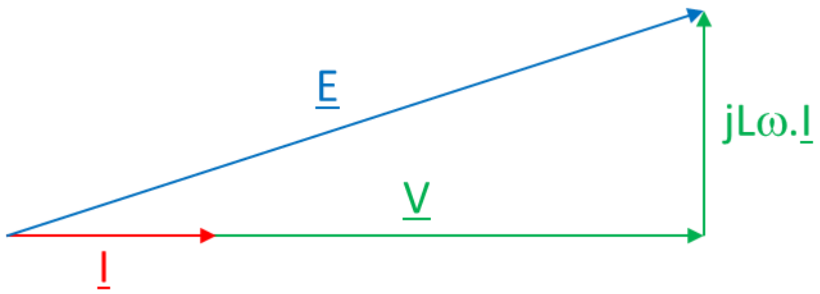
On en déduit donc **k_C=67,7/8,45=8,01 Nm/A.**

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

La tension simple est égale à $\frac{273}{\sqrt{3}} = 157{,}6$ V

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

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 le module de $\underline{E}$. En déduire le coefficient k_V tel que $|\underline{E}|$ = $k_V.\Omega$. **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 a un triangle rectangle dont la base est connue (157,6 V) et la hauteur peut être calculée (Lω.I=0.01 x 2π x 100 x 8,45 = 53 V). On en déduit la valeur de $\boldsymbol{E} = \sqrt{\mathbf{157{,}6^2 + 53^2}} \approx \mathbf{166{,}3}$ **V**

On en déduit un k_V = 166,3/(0.2*3000/60*2pi) = **2,65 V_{eff}/rad/s**

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.

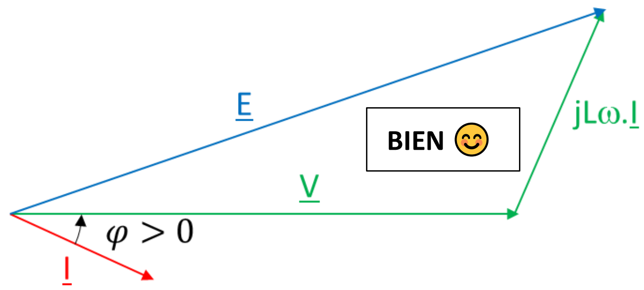
A puissance et vitesse maximales, on a un couple divisé par 5 (puisque la vitesse est multipliée par 5). On a donc **13,54 Nm**. Cela nécessite alors un courant de **1,69 A**.

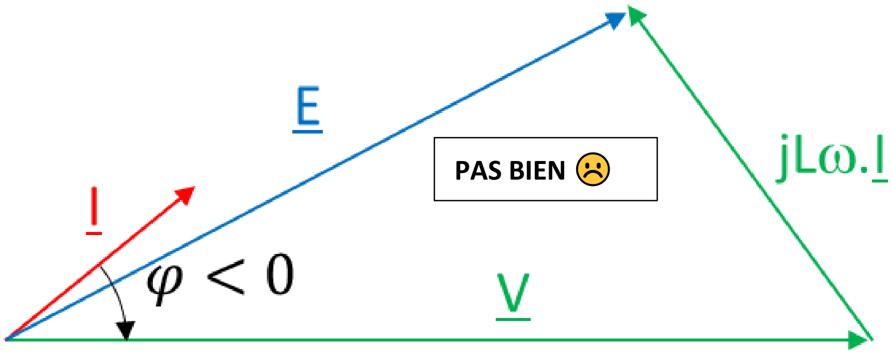
2.9 Si l'on considère un coefficient k_V = 2,65 V_{eff}/rad/s constant pour toute la plage de vitesses considérée, quelle devraient être la f.e.m. simple, la tension simple et la tension composée à appliquer pour atteindre la vitesse maximale (toujours à facteur de puissance unitaire) ? Sachant que le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

Pour la fréquence considérée, on a donc une chute de tension Lω.I=0.01 x 2π x 500 x 1,69 = 53 V identique au cas précédent mais la f.e.m. E doit être multipliée par 5 soit 831,5 V. On en déduit alors que la tension d'alimentation requise sera $\boldsymbol{V} = \sqrt{\mathbf{831.5^2 - 53^2}} = \mathbf{829.8}$ **V**. Cela donne une tension composée de **1437 V**. Cette tension est **inaccessible avec l'alimentation disponible**.

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.





Un courant en retard sur la tension V est intéressant pour permettre de réduire la tension simple de la machine et donc permettre d'atteindre des points de fonctionnement à haute vitesse avec un bus continu limité en tension (on parle de défluxage – ou *flux weakening*). Cela se fait par contre au prix d'une dégradation du facteur de puissance.

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).

On reprend la formule de puissance : $P = \sqrt{3}U.I.\cos\varphi$ d'où $\boldsymbol{I} = \frac{\boldsymbol{P}}{\sqrt{3}\boldsymbol{U}.\cos\boldsymbol{\varphi}} = \frac{\boldsymbol{P}}{\sqrt{3}\boldsymbol{U}\times 0{,}6} = \frac{4000}{\sqrt{3}\times 273\times 0{,}6} = \mathbf{14{,}1\ \ A}$

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

3.1 Sachant que l'on peut espérer obtenir un ensoleillement fournissant 4 kWh/jour/m² 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 ?

Il faut tenir compte des rendements : des PV, du CEP des PV, du CEP de la machine synchrone et de la machine synchrone elle-même. Ainsi, pour avoir 10 kWh au niveau du volant, il faut 10/(0.18*0.95*0.95*0.94) = **65,5 kWh**.

Soit **16,4 m²** de panneaux solaires.

3.2 Quelle est la puissance maximale fournie au volant d'inertie en prenant un ensoleillement maximal de 1kW/m² en conditions standard ? Est-ce que la surface calculée à la question 3.1 vous paraît satisfaisante ? Justifier.

Le dimensionnement étant pour 10kWh/jour avec 4 kWh/jour/m², on obtient une puissance de **2,5 kW** avec 1 kW/m² (règle de trois).

La surface pourrait être augmentée, car l'ensemble machine triphasée + volant d'inertie peut absorber plus de puissance. Ou alors on peut considérer que 2,5 kW va déjà faire fonctionner la machine en régime transitoire et qu'elle ne pourra pas le supporter très longtemps.

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 CEP 1 sera étudié dans la partie IV).

Le CEP 1 (celui des PV) n'a **pas besoin de réversibilité en tension, ni en courant**.

Le CEP 2 (celui de la machine synchrone) est **réversible en tension et courant**, puisqu'il fournit de l'alternatif. Il faut un **onduleur triphasé**.

Le CEP 3 (celui vers la maison) est **réversible en tension et courant**, puisqu'il fournit de l'alternatif. Il faut un **onduleur monophasé**.

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(φ) est supposé égal à 1):

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

Le rendement du CEP 2 est de 95% et celui de la machine triphasée vaut 94%, donc l'énergie électrique absorbée par ce CEP vaut :

2000/(0.94*0.95) = U_{bus} * I_{CEP2}, soit un courant I_{CEP2} = **6,39 A**

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

Le rendement du CEP 3 est de 95%, donc l'énergie électrique absorbée par ce CEP vaut :

500/0.95 = U_{bus} * I_{CEP3}, soit un courant entrant I_{CEP3} = **1,50 A**

Pour le courant efficace sortant du CEP 3 : $U_{réseau}$ * I_{maison} = 500 W, donc I_{maison} = 500/230 = **2,17 A_{eff}**

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

On peut repartir des courants précédents, ou utiliser les puissances : la puissance fournie par le CEP 1 est égale à celle consommée par les CEP 2 et CEP 3 :

PCEP1 = PCEP2 + PCEP3 = 2000/(0.94*0.95) + 500/0.95 = 2766 W

Donc au niveau des PV, cela fait 2766/(0.95*0.18) = **16,2 kW**

Les 16,3 m² de PV peuvent suffire lors des conditions standards (car on a alors 1 kW/m²).

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 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.

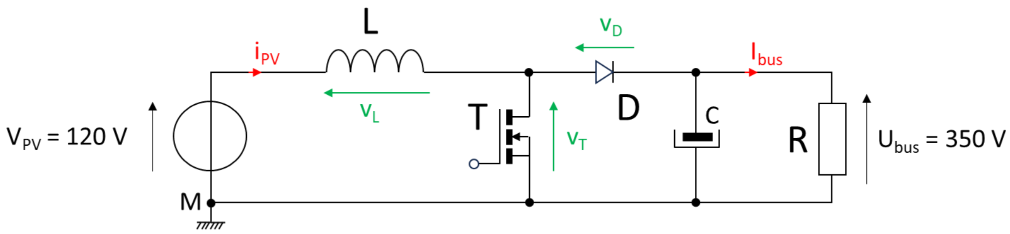


Figure 2. Convertisseur associé aux panneaux photovoltaïques

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}).

L'équation de la 1ère maille est $\mathbf{V_{PV}=V_L+V_T}$

L'équation de la 2ème maille est $\mathbf{V_T = V_D+U_{bus}}$

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 ?

Le transistor est passant, donc V_T = 0 V et $V_L = V_{PV}$ = 120 V. On a aussi $V_D = - U_{bus}$. La diode est bloquée. Le courant de l'inductance augmente.

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 ?

Le transistor est bloqué, donc le courant doit passer par la diode. V_D = 0 V. On a alors $V_{PV} = V_L + U_{bus}$. soit $V_L = V_{PV} - U_{bus}$ = - 230 V. Le courant de l'inductance 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.

$V_L = \alpha.V_{L1}+(1-\alpha)*V_{L2} = \boldsymbol{\alpha(V_{L1}-V_{L2})+V_{L2}}$

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.

$\boldsymbol{\alpha = V_{L2}/(V_{L2} - V_{L1})}$

Comme V_{L2} = -230 V et V_{L1} = 120 V, alors $\alpha = 230/(230+120) = \mathbf{0.657}$