

## EXAMEN PARTIEL GEL-3001 A22

Durée 2h : Une feuille recto-verso en écriture manuscrite autorisée

**Exercice 1: (30 pts)**

**Rappel sur les conventions de signe utilisés dans le laboratoire virtuel:** les conventions de signe pour le branchement des appareils de mesure du panneau du laboratoire virtuel sont telles que **la machine synchrone est étudiée en convention générateur** et que **la machine à courant continu est étudiée en convention récepteur**. La convention de signe du couple  $T_u$  sur l'arbre est telle qu'il est positif pour un fonctionnement moteur de la machine à courant continu dans le sens de rotation  $N$  positif.

**Remarques importantes :** Les paramètres de la machine synchrone utilisée dans cet exercice ne sont pas nécessairement ceux de la machine identifiée dans les laboratoires, les résultats expérimentaux des laboratoires virtuels du cours sur le CHII ne peuvent pas être utilisés dans cet exercice.

Les figures 1&2 représentent le panneau de commande et d'affichage pour des points de fonctionnement en régime permanent d'un entraînement comportant une machine à courant continu accouplée à une machine synchrone à  $p=2$  paires de pôles comme dans les laboratoires virtuels du cours sur le CHII. Le panneau de la figure 1 présente les réglages appliqués et les mesures affichées pour un point de fonctionnement 1 de cet entraînement dont les caractéristiques peuvent être déduites de la lecture des appareils du panneau.

Le panneau de la figure 2 présente les réglages appliqués et les mesures affichées pour un point de fonctionnement 2 de cet entraînement dont les caractéristiques peuvent être déduites de la lecture des appareils du panneau.

Figure 1- Point de fonctionnement 1 Machine synchrone

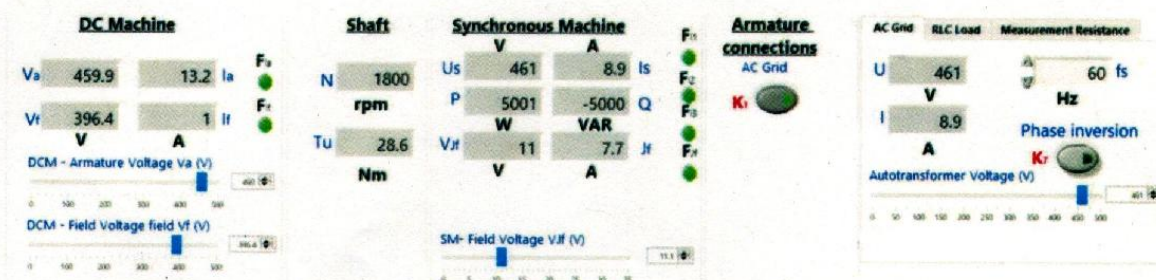
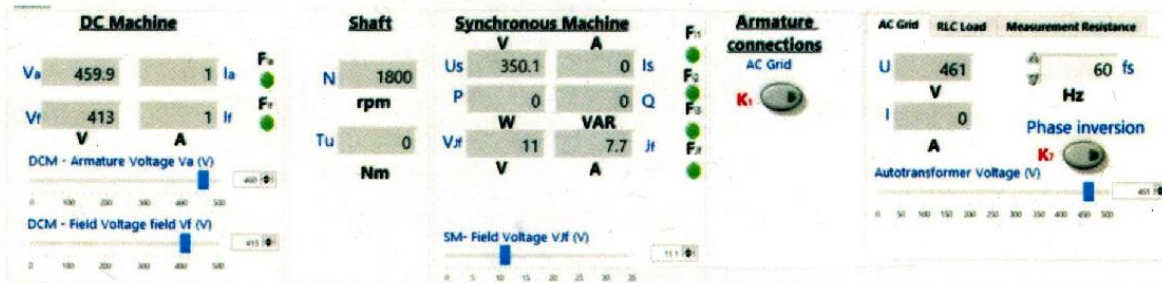




Figure 2- Point de fonctionnement 2 Machine synchrone



1. Identifier l'angle  $\phi$  entre les phaseurs de courant et de tension et calculer sa **valeur algébrique en degrés** pour le point de fonctionnement 1 de la figure 1. La machine synchrone fonctionne-t-elle effectivement en moteur ou en générateur ? Produit-elle ou absorbe-t-elle effectivement de la puissance réactive ? Justifier **précisément** votre réponse. (6 pts).
2. Montrer clairement pourquoi le point de fonctionnement 2 de la figure 2 peut être utilisé pour valider les résultats de la question 1. (4 pts).
3. En utilisant les données des points de fonctionnement 1 & 2 et le résultat de la question 1, tracer le **diagramme vectoriel** des tensions & courant de la machine synchrone pour le point de fonctionnement 1 de la figure 1. **Recopier au propre la version finale du diagramme vectoriel, faire un tracé à la règle.** Toute erreur ou ambiguïté sur l'orientation des angles et des vecteurs dans le diagramme annule les points de la question correspondante. **On néglige la résistance des enroulements  $R_s$  et on utilise obligatoirement la convention de signe imposée par le branchement des appareils de mesure du panneau du laboratoire virtuel**, indiquée dans le rappel ci-dessus au début de l'exercice. Il est inutile d'utiliser sur la figure des échelles précises pour la longueur exacte des vecteurs mais leurs grandeurs relatives doivent être sensiblement compatibles avec les données des appareils de mesure. Représenter le **diagramme des forces magnétomotrices** correspondant au diagramme vectoriel précédent sur le même schéma. Identifier précisément les trois forces magnétomotrices. Vérifier la validité du diagramme vectoriel des forces magnétomotrices à partir du point de fonctionnement étudié. **Justifier votre réponse.** Vérifier la validité du diagramme vectoriel des tensions & courant en raisonnant sur les échanges de puissance active et réactive entre la machine synchrone et le réseau qui l'alimente. **Justifier votre réponse.** (20 pts).



**Exercice 2: (70 pts)**

**Hypothèses adoptées pour l'étude:** Les machines synchrones de cet exercice sont à pôles lisses et non saturées. Les résistances des enroulements de l'induit des machines et de la résistance de la ligne aérienne sont négligées:  $R_s = R_l = 0$ . Les pertes magnétiques et mécaniques des machines synchrones sont négligées.

Une industrie possède sa propre centrale hydraulique privée pour alimenter le réseau interne de son usine. Ce réseau n'est pas relié au réseau public. Le groupe turbine-alternateur de la centrale (génératrice synchrone entraînée par une turbine hydraulique) est régulé en vitesse à une vitesse  $N_{s1}=50\text{rpm}$  pour fonctionner à une fréquence  $f_s=60\text{Hz}$ . L'usine distante de moins de 20km de la centrale hydraulique est reliée à celle-ci par une ligne aérienne triphasée purement inductive dont l'impédance par phase est une réactance purement inductive  $X_l=2\Omega$  (voir Fig. 1). En été, l'usine utilise seulement un moteur synchrone qui, alimenté à une fréquence  $f_s=60\text{Hz}$ , entraîne une charge mécanique à vitesse constante  $N_{s2}=900\text{rpm}$  qui pour cette vitesse consomme sur l'arbre une puissance mécanique  $P_u=4\text{MW}$ . Cette puissance mécanique **reste constante dans tout le problème** (voir Fig1).

Les essais à vide et en court-circuit des deux machines réalisés à une vitesse telle que la fréquence des tensions et des courants est égale à  $f_s=60\text{Hz}$  ont fourni les résultats identiques suivants pour la génératrice synchrone GS de la centrale et pour le moteur synchrone MS de l'usine:

- Essai à vide: Caractéristiques à vide (supposée linéaire):  $E_1 = 15 \times I_{r1}$ ,  $E_2 = 15 \times I_{r2}$  (tension ligne-neutre en V, courant inducteur en A).
- Réactance synchrone à 60Hz (qui intervient dans le schéma monophasé équivalent en étoile):  $X_{s1} = X_{s2} = X_s = 2\Omega$



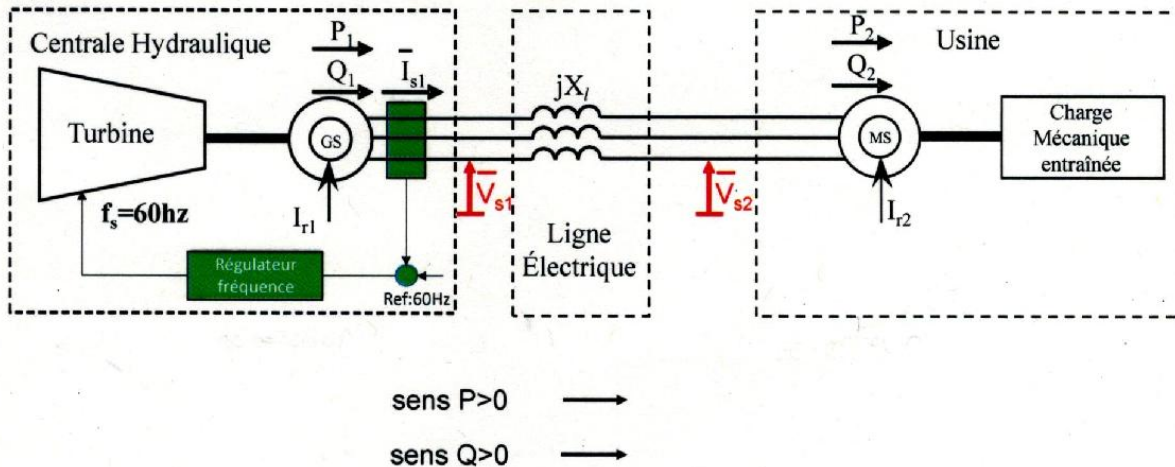


Figure 1 Réseau interne non relié de l'industrie en configuration estivale

### Questions :

1. Calculer le nombre de paires de pôles  $p_1$  de la génératrice synchrone GS de la centrale et le nombre de paires de pôles  $p_2$  du moteur synchrone MS de l'usine. Tracer le schéma monophasé équivalent en étoile de l'installation de la Fig.1 en utilisant les conventions de signe pour les puissances, courant & tension qui sont indiquées. (6 pts)
2. Les courant inducteurs  $I_{r1}$  de la génératrice synchrone GS et  $I_{r2}$  du moteur synchrone MS sont ajustés de manière à ce que la valeur efficace (RMS)  $U_{s1}$  de la tension ligne-ligne à la sortie de la centrale en amont de la ligne et la valeur efficace (RMS)  $U_{s2}$  de la tension ligne-ligne à l'entrée de l'usine en aval de la ligne soient égales, soit :  $U_{s1} = U_{s2} = U_{sn} = 4160V$ . Tracer pour ce point d'opération avec les conventions de signe imposées par la Fig.1 le diagramme vectoriel associé à la ligne électrique seulement (avec les phaseurs de  $V_{s1}$ ,  $V_{s2}$ , de la tension aux bornes de la réactance de la ligne et  $I_{s1}$ ) sans représenter le diagramme vectoriel des machines synchrones. (Toute erreur ou ambiguïté sur l'orientation des angles et des vecteurs dans le diagramme annule les points sur le tracé du diagramme). Établir l'expression littérale de la valeur algébrique de l'angle de déphasage  $\beta_1$  entre les tensions en amont et en aval de la ligne. Calculer la valeur en degrés de cet angle. En déduire la valeur algébrique des angles de déphasage  $\varphi_1$  et  $\varphi_2$  entre le courant dans la ligne et les tensions en amont et en aval de la ligne. Calculer la valeur efficace  $I_{s1}$  du courant qui circule dans la ligne entre la centrale et l'usine. (15 pts)
3. Toujours pour ce même point de fonctionnement ( $U_{s1} = U_{s2} = U_{sn} = 4160V$ ), compléter le diagramme vectoriel associé à la ligne de la question précédente pour établir le



diagramme vectoriel complet de l'installation de la Fig. 1 en y rajoutant le diagramme vectoriel de la génératrice synchrone GS et du moteur synchrone MS. (Toute erreur ou ambiguïté sur l'orientation des angles et des vecteurs dans le diagramme annule les points sur le tracé du diagramme). Sans faire de calcul, peut-on dire que la génératrice synchrone GS de la centrale produit ou consomme effectivement de la puissance réactive? Justifier clairement votre réponse. Sans faire de calcul, peut-on dire que moteur synchrone MS de la centrale produit ou consomme effectivement de la puissance réactive? Justifier clairement votre réponse. Calculer la valeur du courant inducteur  $I_{r1}$  de la génératrice synchrone GS et du courant inducteur  $I_{r2}$  du moteur synchrone qu'il faut appliquer pour obtenir ce point de fonctionnement avec  $U_{s1} = U_{s2} = U_{sn} = 4160V$ . Calculer alors la valeur algébrique (valeur signée) de la puissance active  $P_1$  et de la puissance réactive  $Q_1$  échangées à la sortie de la centrale en tenant compte des conventions de signe imposées. Calculer la valeur algébrique (valeur signée) de la puissance active  $P_2$  et de la puissance réactive  $Q_2$  échangées à l'entrée de l'usine en tenant compte des conventions de signe imposées. Calculer la valeur algébrique de la puissance réactive  $Q_l$  dans la ligne inductive. Écrire le bilan total de puissance active et le bilan total de puissance réactive dans le réseau de la Fig.1 et vérifier vos calculs en montrant qu'il est effectivement équilibré. (24 pts)

En hiver, l'usine consomme en plus de la puissance mécanique  $P_u = 4MW$  consommée par la charge mécanique entraînée par le moteur synchrone, une puissance  $P_R = 1MW$  de chauffage électrique que l'on peut représenter par une charge électrique triphasée purement résistive. (voir Fig.2).

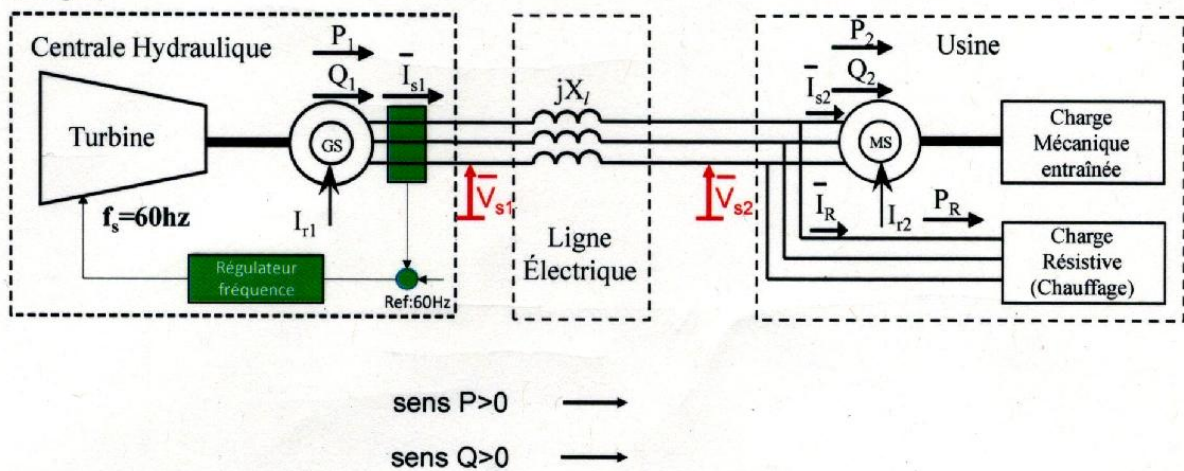


Figure 2 Réseau interne non relié de l'industrie en configuration hivernale avec charge résistive de chauffage



Dans cette configuration hivernale, les courant inducteurs  $I_{r1}$  de la génératrice synchrone GS et  $I_{r2}$  du moteur synchrone MS doivent alors être ajustés différemment de la configuration estivale de manière à ce qu'à nouveau la valeur efficace (RMS)  $U_{s1}$  de la tension ligne-ligne à la sortie de la centrale en amont de la ligne et la valeur efficace (RMS)  $U_{s2}$  de la tension ligne-ligne à l'entrée de l'usine en aval de la ligne soient égales, soit :  $U_{s1} = U_{s2} = U_{sn} = 4160V$ .

4. Calculer la résistance  $R$  du schéma monophasé équivalent en étoile de la charge résistive qui consomme une puissance active totale  $P_R = 1MW$  lorsqu'elle est alimentée en triphasé par la tension ligne-ligne nominale  $U_{s2} = U_{sn} = 4160V$ . Tracer le schéma monophasé équivalent en étoile de l'installation en configuration hivernale de la Fig.2 en utilisant les conventions de signe pour les puissances, courant & tension qui y sont indiquées. Tracer le diagramme vectoriel complet de l'installation en configuration hivernale de la Fig.2 incluant ceux de la ligne, des machines synchrones et de la charge résistive de chauffage. (7 pts)
5. Calculez la nouvelle puissance active  $P_1$  qui circule dans la ligne et la nouvelle valeur algébrique de l'angle de déphasage  $\beta_1$  entre les tensions en amont et en aval de la ligne. Calculer la nouvelle valeur efficace  $I_{s1}$  du courant qui circule dans la ligne entre la centrale et l'usine et la nouvelle valeur algébrique de la puissance réactive  $Q_1$  échangée à la sortie de la centrale. Calculer la valeur algébrique de la puissance réactive  $Q_l$  dans la ligne inductive. A partir du bilan de puissance réactive, calculer la valeur algébrique de la puissance réactive  $Q_2$  échangées à présent entre le moteur synchrone de l'usine et le reste de l'installation en tenant compte des conventions de signe imposées sur la Fig.2. Calculer la valeur efficace du courant  $I_{s2}$  dans le moteur synchrone MS et les nouvelles valeurs des courant inducteurs  $I_{r1}$  de la génératrice synchrone GS et  $I_{r2}$  du moteur synchrone MS qu'il faut appliquer pour maintenir  $U_{s1} = U_{s2} = U_{sn} = 4160V$  dans la configuration hivernale de la Fig.2. (18 pts)