

EXAMEN PARTIEL À DISTANCE
TOUS DOCUMENTS AUTORISES

Exercice 1: (52 pts)

Hypothèses adoptées pour l'étude: La machine synchrone est à pôles lisses et non saturée. La résistance R_s des enroulements de l'induit est négligée: $R_s=0$. Les pertes magnétiques et mécaniques du moteur synchrone sont négligées



Figure 0 Entraînement d'un raffineur

Dans une papèterie, un raffineur est un appareil à disques tournants munis de deux jeux de lames dans lequel passe la pâte à papier et qui assure le traitement mécanique de celle-ci en vue d'obtenir l'hydratation, la fibrillation ou la coupe des fibres. Ce raffineur est entraîné par un moteur synchrone triphasé alimenté par un réseau de distribution interne 60Hz $U_{SN}=6600V$ (ligne à ligne). Au point de fonctionnement nominal de l'entraînement, le moteur tourne à une vitesse $N_s=900rpm$ et il fournit sur l'arbre du compresseur une puissance utile $P_u= 900kW$.

Les essais à vide et en court-circuit de la machine synchrone à pôles lisses ont fourni les résultats suivants:

Essai à vide: Caractéristique à vide (supposée linéaire) relevée à la vitesse synchrone N_s :

$$E = 200 \cdot I_f \quad (E \text{ tension ligne-neutre en V, } I_f \text{ courant inducteur en A}).$$

Essai en court-circuit: Caractéristique en court-circuit relevée à la vitesse synchrone N_s :

$$I_{SC} = 5 \cdot I_f \quad (I_{SC} \text{ courant de ligne de court-circuit en A, } I_f \text{ courant inducteur en A}).$$

1. Calculer p , le nombre de paires de pôles du moteur. Calculer la réactance X_s de l'induit du schéma monophasé équivalent en étoile. Calculer le couple électromagnétique T_{em1} exercé par le moteur synchrone sur l'arbre du raffineur. Préciser l'unité de couple. Calculer l'angle interne θ_1 du moteur pour ce point de fonctionnement lorsque le courant inducteur est $I_{f1}=28A$. Calculer pour cette même valeur de I_{f1} le rapport entre le couple maximum que pourrait fournir ce moteur sans décrocher et le couple électromagnétique T_{em1} du moteur calculé précédemment. **(20 pts)**

2. Tracer le diagramme vectoriel des tensions & courants du moteur en convention récepteur pour le point de fonctionnement de la question 1 (angle interne θ_1 & courant inducteur $I_{r1}=28A$). Il est inutile d'utiliser sur la figure des échelles précises pour la longueur exacte des vecteurs mais leurs valeurs respectives doivent être compatibles avec le point de fonctionnement étudié. Toute erreur ou ambiguïté sur l'orientation des angles et des vecteurs dans le diagramme annule les points de cette partie. Calculer le courant I_{s1} absorbé par le moteur et son facteur de puissance. Le moteur produit-il de la puissance réactive au réseau? Justifier clairement votre réponse. Calculer cette puissance réactive Q_1 . **(12 pts)**
3. L'alimentation continue de l'enroulement inducteur qui fournit le courant I_r est réalisée à l'aide d'un redresseur contrôlé alimenté par le même système d'alimentation triphasé du réseau de distribution interne 60Hz U_{sn} qui alimente l'induit. Dans ces conditions, si la tension d'alimentation U_s de l'usine varie le courant inducteur I_r varie aussi dans la même proportion. Calculer la tension minimale (ligne à ligne) U_{smin} que l'on peut tolérer sur le réseau de distribution interne de l'usine sans provoquer le décrochage du moteur lorsqu'il entraîne le raffineur. Calculer la chute de tension acceptable en % soit : $\Delta U\%=(1-U_{smin}/U_{sn})$ **(10 pts)**
4. Suite à des problèmes de décrochage constatés avec le système d'alimentation de l'inducteur de la question 3, l'ingénieur système de l'usine décide d'implanter un régulateur de courant sur l'alimentation continue de l'enroulement inducteur du moteur synchrone. De cette manière le courant inducteur I_r devient indépendant des fluctuations de la tension d'alimentation U_s de l'usine. Calculer la tension minimale U_{smin2} que l'on peut tolérer sur le réseau de distribution interne de l'usine sans provoquer le décrochage du moteur lorsqu'il entraîne le raffineur. Calculer la chute de tension acceptable en % soit : $\Delta U_2\%=(1-U_{smin2}/U_{sn})$ **(10 pts)**

Exercice 2: (24 pts)

Rappel sur les conventions de signe des appareils de mesure 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. **Attention, 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 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 tel que l'induit de la machine synchrone est reliée par le contacteur K1 fermé à un réseau infini dont les caractéristiques sont données par 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 tel que l'induit de la machine synchrone est déconnecté du réseau infini (K1 ouvert). On remarquera que la vitesse et le courant inducteur de la machine synchrone ont été maintenus identiques dans les points de fonctionnement 1 & 2 des figures 1 & 2.

Figure 1- Point de fonctionnement 1 Machine synchrone reliée au réseau $U_s=460.5V$ 60Hz

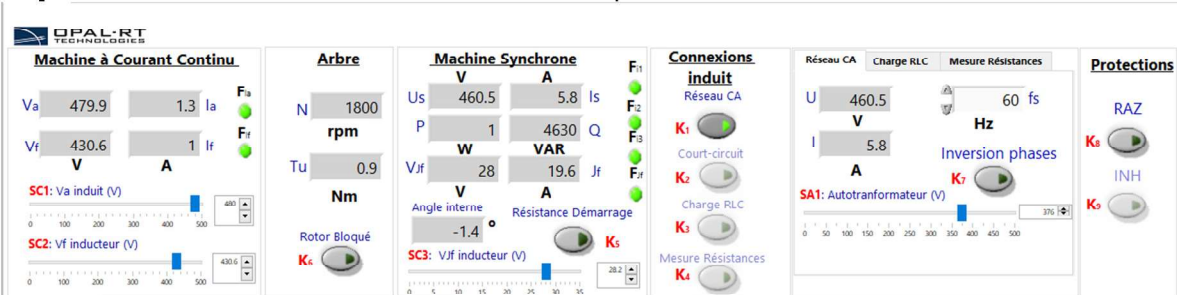
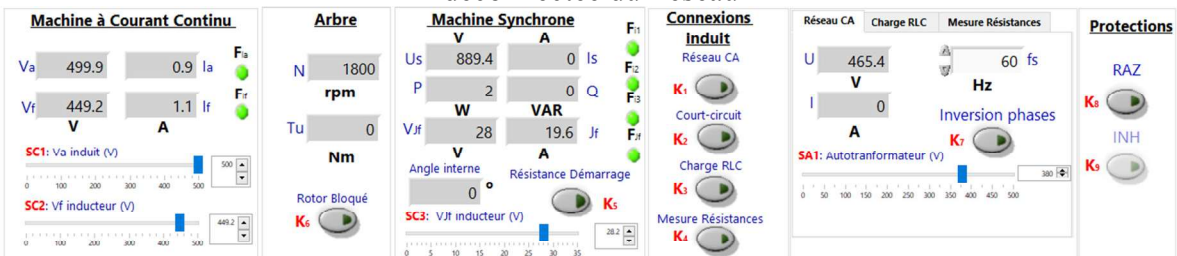


Figure 2- Point de fonctionnement 2 Machine synchrone entraînée à 1800rpm
déconnectée du réseau



1. Identifier l'angle ϕ entre les phaseurs de courant et de tension et calculer sa valeur en degrés pour le point de fonctionnement 1 de la figure 1. Compte-tenu de la valeur calculée, adopter une hypothèse simplificatrice pour la valeur de ϕ afin de tracer le diagramme vectoriel de la question suivante (2 pts).

2. En utilisant les données des points de fonctionnement 1&2 des figures 1&2 et le résultat de la question précédente, tracer le diagramme vectoriel des tensions & courant de la machine synchrone pour le point de fonctionnement 1 de la figure 1. **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 valeurs respectives doivent être compatibles avec le point de fonctionnement étudié. 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. 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. **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. (16 pts).**
3. Calculer la réactance X_s de la machine synchrone supposée à pôles lisses et non saturée (hypothèses de Behn-Eschenburg) à partir des questions précédentes et des valeurs affichées sur les appareils pour les points de fonctionnement 1&2 des figures 1&2. **(6 pts).**

Exercice 3: (24 pts)

Rappel sur les conventions de signe des appareils de mesure 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. **Attention, 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 ainsi que les résultats de l'exercice 3 ci-dessus ne peuvent pas être utilisés dans cet exercice.**

Les figures 3&4 représentent les panneaux de commande avec les réglages appliqués et les mesures affichées pour des points de fonctionnement en régime permanent d'un entraînement

comportant une machine à courant continu accouplée à une machine synchrone comme dans les laboratoires virtuels du cours sur le CHII..

Le panneau de la figure 3 présente les réglages appliqués et les mesures affichées pour un point de fonctionnement 1 de cet entraînement tel que la machine synchrone est reliée par le contacteur K1 fermé à un réseau infini dont les caractéristiques sont données par la lecture des appareils du panneau.

Le panneau de la figure 4 présente les réglages appliqués et les mesures affichées pour un point de fonctionnement 2 de cet entraînement tel que l'induit de la machine synchrone est déconnecté du réseau infini (K1 ouvert). On remarquera que la vitesse et le courant inducteur de la machine synchrone ont été maintenus identiques dans les points de fonctionnement 1 & 2 des figures 3 & 4.

Figure 3- Point de fonctionnement 1 Machine synchrone reliée au réseau $U_s=465.4V$ 60Hz

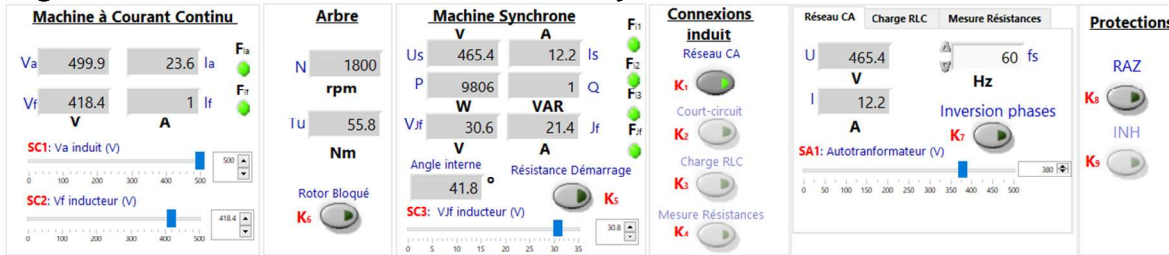
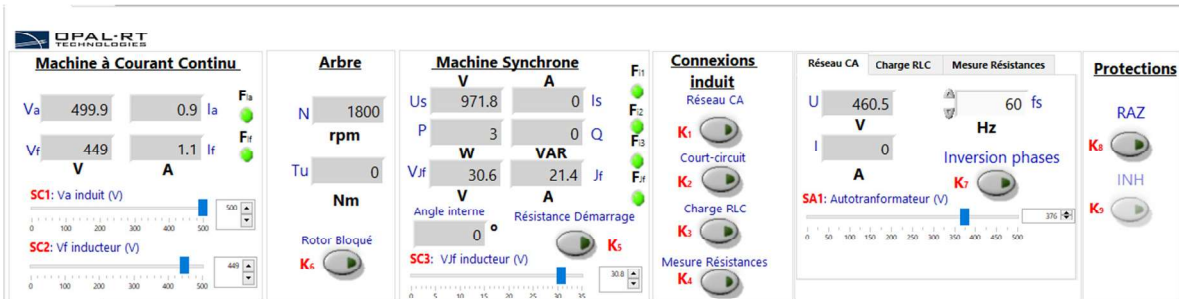


Figure 4- Point de fonctionnement 2 Machine synchrone entraînée à 1800rpm
déconnectée du réseau



1. Pour le point de fonctionnement 1 illustré par le panneau de la figure 3, la machine synchrone fonctionne-t-elle effectivement en moteur ou en générateur ? Justifier clairement votre réponse. Identifier l'angle ϕ entre les phaseurs de courant et de tension et calculer sa valeur en degrés pour le point de fonctionnement 1 de la figure 3. Compte-tenu de la valeur calculée, adopter une hypothèse simplificatrice pour la valeur de ϕ afin de tracer le diagramme vectoriel de la question suivante (2 pts).
2. En utilisant les données des points de fonctionnement 1&2 des figures 3&4 et le résultat de la question précédente, tracer le diagramme vectoriel des tensions & courant de la

machine synchrone pour le point de fonctionnement 1 de la figure 3. **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 valeurs respectives doivent être compatibles avec le point de fonctionnement étudié. 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. Vérifier la validité du diagramme vectoriel des tensions et courant en raisonnant sur les échanges de puissance active et réactive entre la machine synchrone et le réseau qui l'alimente. **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. (16 pts).**

3. Calculer la réactance X_s de la machine synchrone supposée à pôles lisses et non saturée (hypothèses de Behn-Eschenburg) à partir des questions précédentes et des valeurs affichées sur les appareils pour les points de fonctionnement 1&2 des figures 3&4. **(6 pts).**