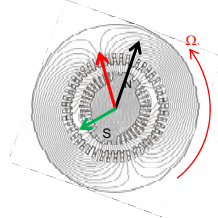


GEL-3001 – Machines Électriques



Corrigé Examen Partiel GEL-3001 A22



Philippe Viarouge

viarouge@gel.ulaval.ca



Département de génie électrique et de génie informatique
Faculté des sciences et de génie

20 Novembre 2022

GEL-3001-A22



© P. Viarouge Département de GEL&GIF

Corrigé Exercice 1

GEL-3001-A22



© P. Viarouge Département de GEL&GIF

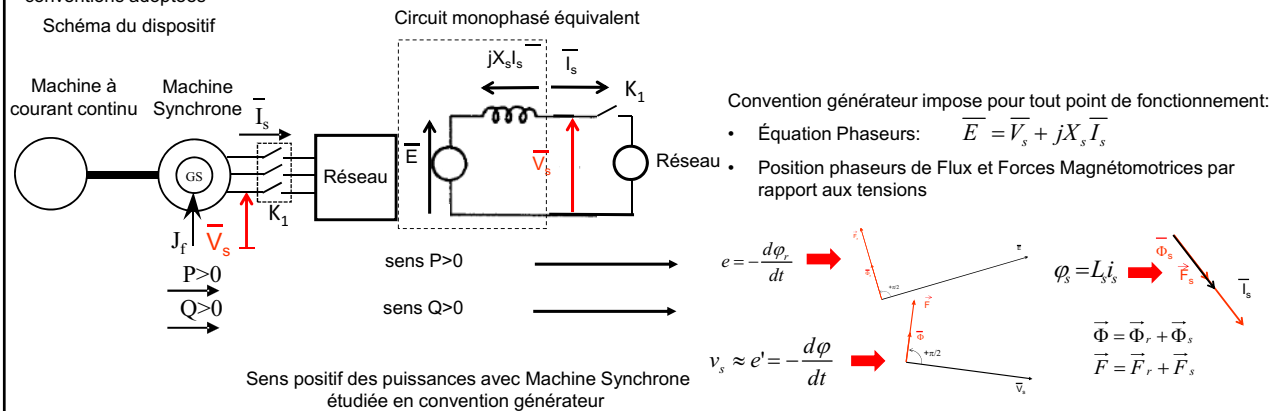
Exercice 1 Analyse préliminaire

Analyse préliminaire de l'énoncé, des hypothèses et de la convention de signe utilisée (voir méthodologie recommandée):

Énoncé: 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_m 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.... **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**

Suivant les recommandations des corrigés des exercices de préparation fournis, on commence par analyser l'énoncé les hypothèses et les conventions adoptées

Schéma du dispositif



GEL-3001-A22

LEEPCI

L'AVANT

© P. Viarouge Département de GEL&GIF

Exercice 1 Question 1

Analyse préliminaire de l'énoncé, des hypothèses et de la convention de signe utilisée (voir méthodologie recommandée dans les TD):

Énoncé: 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 reliée au réseau

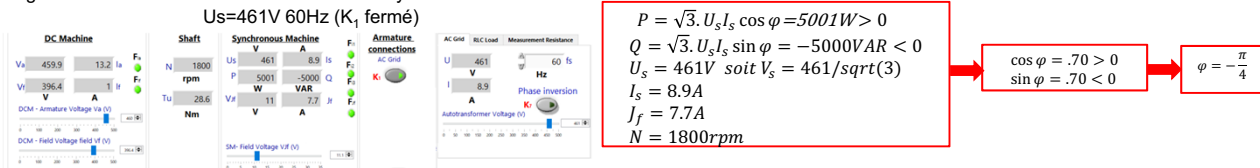
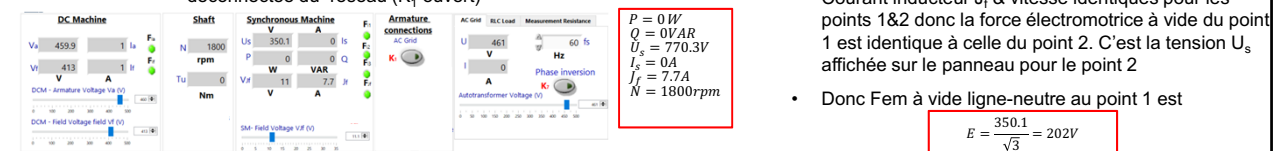


Figure 2- Point de fonctionnement 2 Machine synchrone entraînée à 1800rpm déconnectée du réseau (K_1 ouvert)



GEL-3001-A22

LEEPCI

L'AVANT

© P. Viarouge Département de GEL&GIF

Exercice 1 Question 1

Corrigé des Questions:

Question 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. La machine synchrone fonctionne-t-elle en moteur ou en générateur ? Produit-elle ou absorbe-t-elle effectivement de la puissance réactive ? Justifier précisément votre réponse.

Réponse 1:

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{3} \cdot U_s I_s \cos \varphi = 5001 \text{ W} > 0 \\ Q &= \sqrt{3} \cdot U_s I_s \sin \varphi = -5000 \text{ VAR} < 0 \\ U_s &= 461 \text{ V} \text{ soit } V_s = 461/\sqrt{3} \\ I_s &= 8.9 \text{ A} \\ J_f &= 7.7 \text{ A} \\ N &= 1800 \text{ rpm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \cos \varphi &= .70 > 0 \\ \sin \varphi &= .70 < 0 \end{aligned}$$

Réponse:

$$\varphi = -\frac{\pi}{4}$$

$P > 0$ en convention générateur donc la machine synchrone fonctionne en génératrice et la machine CC en moteur

$Q < 0$ en convention générateur donc la machine synchrone consomme ou absorbe effectivement de la puissance réactive

Question 2: Montrer clairement pourquoi le point de fonctionnement 2 de la figure 2 peut être utilisé pour valider les résultats de la question 1

Réponse 2: On vérifie d'ailleurs que la machine est très désexcitée puisque:

Donc elle absorbe bien effectivement de la puissance réactive comme la figure 1 le montre

$$V_s = \frac{461}{\sqrt{3}} = 266 \text{ V} \gg E = 202 \text{ V}$$

GEL-3001-A22

LEEPCI

UNIVERSITÉ LAVAL

@ P. Viarouge Département de GEL&GIF

Exercice 1 Question 2

Corrigé des Questions:

Question 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. 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. Représenter le diagramme des forces magnétomotrices correspondant au diagramme vectoriel précédent sur le même schéma. 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. Réponse:

- On a démontré que $\varphi = -\frac{\pi}{4} = -45^\circ$. On en déduit le diagramme vectoriel en appliquant: $\vec{E} = \vec{V}_s + jX_s \vec{I}_s$ $\vec{F} = \vec{F}_r + \vec{F}_s$ $\vec{\Phi} = \vec{\Phi}_r + \vec{\Phi}_s$

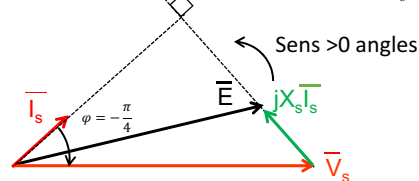


Diagramme Tensions & Courants

- Rappel : il a été démontré au cours que l'angle orienté φ doit toujours être compté du phaseur de tension (origine) vers le phaseur de tension afin d'être compatible avec les conventions sur les charges passives étudiées en convention récepteur et la définition de la puissance réactive consommée par les inductances et produite par les capacités.

- 0 pt à la question si erreur ou omission des sens des vecteurs et des angles orientés (ceci est appliqué dans tous les exercices corrigés du cours)

GEL-3001-A22

LEEPCI

UNIVERSITÉ LAVAL

@ P. Viarouge Département de GEL&GIF

Exercice 1 Question 2

- On déduit du diagramme vectoriel des tensions celui des flux & des Forces magnétomotrices en appliquant:

$$\left\{ \begin{array}{l} e = -\frac{d\phi_r}{dt} \\ v_s \approx e' = -\frac{d\phi}{dt} \\ \phi_s = L_s i_s \\ \vec{\Phi} = \vec{\Phi}_r + \vec{\Phi}_s \\ \vec{F} = \vec{F}_r + \vec{F}_s \end{array} \right.$$

$$\vec{\Phi} = \vec{\Phi}_r + \vec{\Phi}_s$$

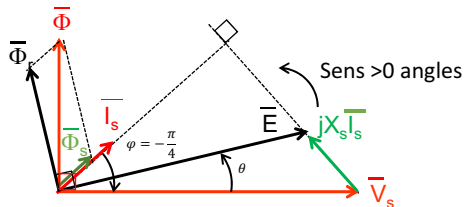
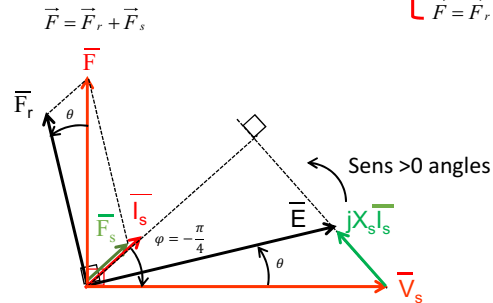


Diagramme Tensions & des Flux

Diagramme des Tensions & des **Forces**
Magnétomotrices

- 0 pt à la question si erreur ou omission des sens des vecteurs et des angles orientés (ceci est appliqué dans tous les exercices corrigés du cours)

GEL-3001-A22

LEEEPCI

UNIVERSITÉ LAVAL

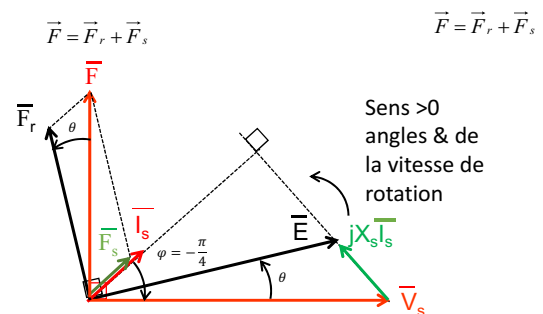
© P. Viarouge Département de GEL&GIF

Exercice 1 Question 2

Vérification compatibilité du diagramme vectoriel avec point de fonctionnement étudié:

- Fmm résultante \vec{F} "tire" effectivement \vec{F}_r solidaire du rotor dans le sens inverse de la rotation & exerce donc un couple résistant sur l'arbre pour combattre le couple moteur exercé sur l'arbre dans le sens de rotation par le moteur à courant continu. (on vérifie aussi que $\theta > 0$ en convention générateur, on a donc bien un couple résistant pour la machine synchrone)

- Angle $0 > \varphi > -\frac{\pi}{2}$ donc $\cos \varphi > 0$ $\sin \varphi < 0$ donc $P > 0$ & $Q < 0$ en convention générateur: on a bien représenté un point de fonctionnement en génératrice synchrone produisant effectivement de la puissance active sur le réseau et absorbant effectivement de la puissance réactive fournie par le réseau. On vérifie aussi que $V_s \gg E$, la génératrice synchrone est bien désexcitée. Elle absorbe effectivement de la puissance réactive.

Diagramme des Tensions & des **Forces**
Magnétomotrices

GEL-3001-A22

LEEEPCI

UNIVERSITÉ LAVAL

© P. Viarouge Département de GEL&GIF

Corrigé Exercice 2

GEL-3001-A22

LEEPCI

UNIVERSITÉ
LAVAL

@ P. Viarouge Département de GEL&GIF

Exercice 2

Énoncé: 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).

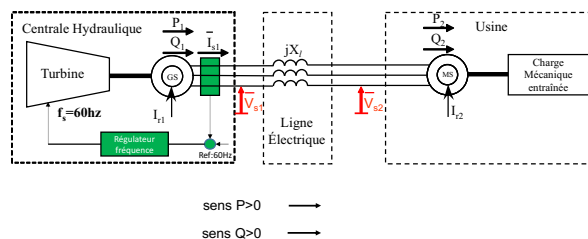


Figure 1 Réseau interne non relié de l'industrie en configuration estivale

Analyse préliminaire de l'énoncé: avec le Sens positif d'écoulement des puissances imposé par la figure 1, GS est étudiée en convention récepteur & MS est étudié en convention récepteur (voir annexe sur les conventions en électrotechnique)

GEL-3001-A22

LEEPCI

UNIVERSITÉ
LAVAL

@ P. Viarouge Département de GEL&GIF

Exercice 2 Question 1

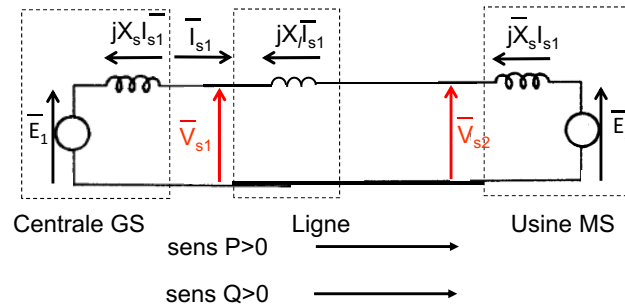
Énoncé: Les essais à vide et en court-circuit des deux machines réalisés à une vitesse telle que la fréquence des tensions et des courants est égale à $f_s=60\text{Hz}$ ont fourni les résultats identiques suivants pour la génératrice synchrone GS de la centrale et pour le moteur synchrone MS de l'usine:

- 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): $X_{s1} = X_{s2} = X_s = 2\Omega$

Question 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.

Calcul nombre de paires de pôles $N_{s1} = \frac{60 \cdot f_{sn}}{p_1} = \frac{3600}{p_1} = 50\text{rpm}$ donc $p_1 = 72$ paires de pôles $N_{s2} = \frac{60 \cdot f_{sn}}{p_2} = \frac{3600}{p_2} = 900\text{rpm}$ donc $p_2 = 4$ paires de pôles

Circuit monophasé équivalent



GEL-3001-A22

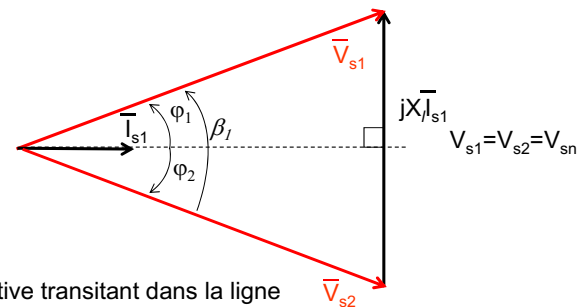
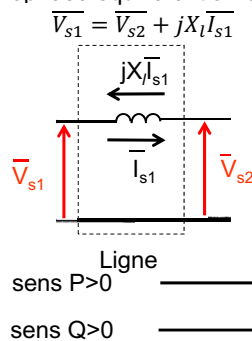
LEEPCI L'AVANT

© P. Viarouge Département de GEL&GIF

Exercice 2 Question 2

Question 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 : $U_{s1} = U_{s2} = U_{sn} = 4160\text{V}$. 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 β_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 φ_1 et φ_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..

Circuit monophasé équivalent amont & aval de la ligne



Puissance active transitant dans la ligne

$$P_u = 3 \frac{V_{s1} V_{s2}}{X_l} \sin \beta_1 = 3 \frac{V_{sn}^2}{X_l} \sin \beta_1$$

(comme dans le laboratoire 0 & exercice corrigé...)

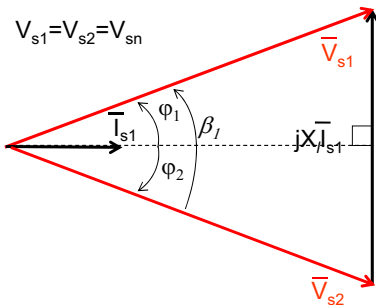
GEL-3001-A22

LEEPCI L'AVANT

© P. Viarouge Département de GEL&GIF

Exercice 2 Question 2 Suite

Question 2: Suite résolution



Le triangle est isocèle ($V_s = V_r = V_{sn}$) (comme dans les exercices corrigés...)

Le phaseur de I_s doit être perpendiculaire à $jX_l \bar{I}_{s1}$

Donc la hauteur est aussi une bissectrice!

Bilan de puissance active: (la ligne ne consomme pas de puissance active)

$$P_u = 3V_{sn}I_{s1}\cos\varphi_1 = 3V_{sn}I_{s1}\cos\varphi_2 \quad \text{Donc} \quad \cos\varphi_1 = \cos\varphi_2$$

Donc φ_1 & φ_2 sont forcément de signe contraire $\varphi_1 = -\varphi_2$ donc $\beta_1 = \varphi_1 - \varphi_2 = 2\varphi_1$

On a donc:

$$\sin\beta_1 = \frac{X_l P_u}{3V_{sn}^2}$$

on en déduit:

$$I_{s1} = \frac{P_1}{3V_{sn}\cos\varphi_1} = \frac{P_u}{3V_{sn}\cos(\frac{\beta_1}{2})}$$

$$P_u = 3 \frac{V_{s1}V_{s2}}{X_l} \sin\beta_1 = 3 \frac{V_{sn}^2}{X_l} \sin\beta_1$$

GEL-3001-A22

LEEPCI

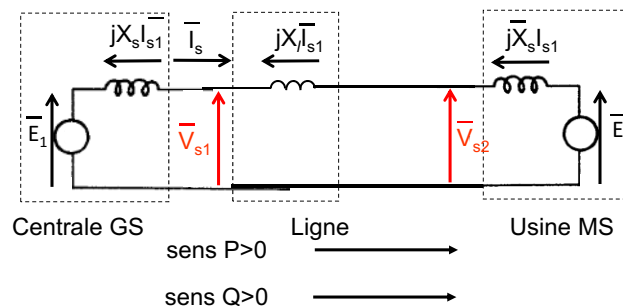
UNIVERSITÉ LAVAL

© P. Viarouge Département de GEL&GIF

Exercice 2 Question 3

Question 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. 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 le 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.

Circuit monophasé équivalent installation



$$\begin{aligned} \bar{E}_1 &= \bar{V}_{s1} + jX_{s1}\bar{I}_s \\ \bar{V}_{s1} &= \bar{V}_{s2} + jX_{l1}\bar{I}_s \\ \bar{V}_{s2} &= \bar{E}_2 + jX_{s2}\bar{I}_s \end{aligned}$$

GEL-3001-A22

LEEPCI

UNIVERSITÉ LAVAL

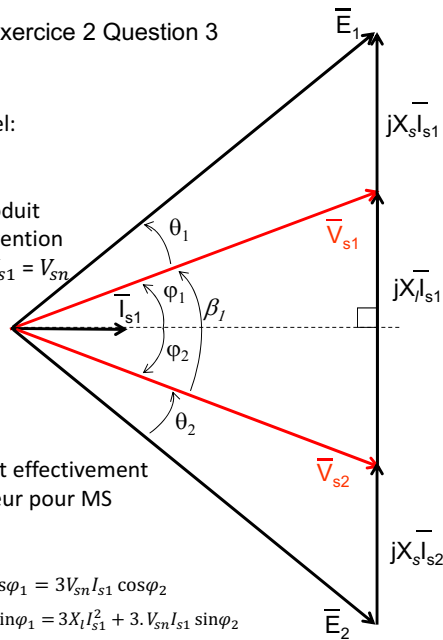
© P. Viarouge Département de GEL&GIF

Exercice 2 Question 3

Question 3: Suite

Sans faire de calcul, on voit sur le diagramme vectoriel:

- que la génératrice synchrone GS de la centrale produit effectivement de la puissance réactive car en convention générateur $Q_1 = 3 \cdot V_{sn} I_{s1} \sin \varphi_1 > 0$ et de plus $E_1 > V_{s1} = V_{sn}$
- que le moteur synchrone MS de la centrale produit effectivement de la puissance réactive car en convention récepteur pour MS $Q_2 = 3 \cdot V_{sn} I_{s1} \sin \varphi_2 < 0$ de plus $E_2 < V_{s2} = V_{sn}$
- Bilan de puissance active: $P_u = P_1 = P_2 = 3 V_{sn} I_{s1} \cos \varphi_1 = 3 V_{sn} I_{s1} \cos \varphi_2$
- Bilan de puissance réactive: $Q_1 = Q_l + Q_2 = 3 \cdot V_{sn} I_{s1} \sin \varphi_1 = 3 X_l I_{s1}^2 + 3 \cdot V_{sn} I_{s1} \sin \varphi_2$



$$\begin{aligned} \overline{E}_1 &= \overline{V}_{s1} + jX_s \overline{I}_{s1} \\ \overline{V}_{s1} &= \overline{V}_{s2} + jX_l \overline{I}_{s1} \\ \overline{V}_{s2} &= \overline{E}_2 + jX_s \overline{I}_{s2} \end{aligned}$$

Avec $V_{s1} = V_{s2} = V_{sn}$

GEL-3001-A22

LEEPCI L'AVANTAGE

© P. Viarouge Département de GEL&GIF

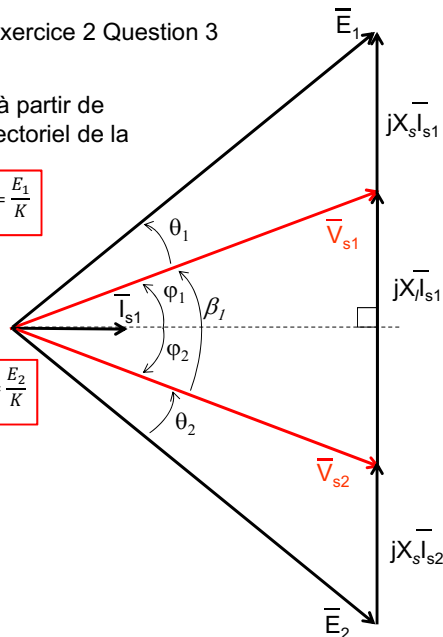
Exercice 2 Question 3

Question 3: Suite

On peut alors calculer les E & I_r de GS & MS à partir de l'expression classique issue du diagramme vectoriel de la machine synchrone avec R_s négligée

$$\left[\begin{aligned} E_1^2 &= (V_{sn} + X_s I_{s1} \sin \varphi_1)^2 + (X_s I_{s1} \cos \varphi_1)^2 \rightarrow I_{r1} = \frac{E_1}{K} \\ \text{Ou par } E_1^2 &= (V_{sn} + X_s \frac{Q_1}{3V_{sn}})^2 \end{aligned} \right.$$

$$\left[\begin{aligned} E_2^2 &= (V_{sn} - X_s I_{s1} \sin \varphi_2)^2 + (X_s I_{s1} \cos \varphi_2)^2 \rightarrow I_{r2} = \frac{E_2}{K} \\ \text{Ou par } E_2^2 &= (V_{sn} - X_s \frac{Q_2}{3V_{sn}})^2 + (X_s \frac{P_u}{3V_{sn}})^2 \end{aligned} \right.$$



$$\begin{aligned} \overline{E}_1 &= \overline{V}_{s1} + jX_s \overline{I}_{s1} \\ \overline{V}_{s1} &= \overline{V}_{s2} + jX_l \overline{I}_{s1} \\ \overline{V}_{s2} &= \overline{E}_2 + jX_s \overline{I}_{s2} \end{aligned}$$

Avec $V_{s1} = V_{s2} = V_{sn}$

GEL-3001-A22

LEEPCI L'AVANTAGE

© P. Viarouge Département de GEL&GIF

Exercice 2 Question 4

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

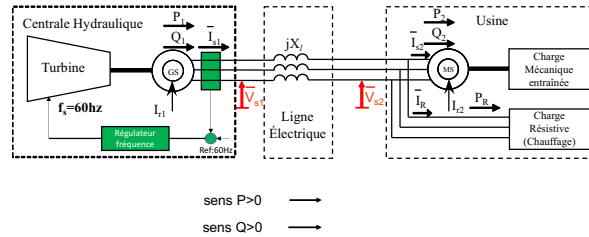


Figure 2 Réseau interne non relié de l'industrie en configuration hivernale avec charge résistive de chauffage

Dans cette configuration hivernale, les courants 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 : $U_{s1} = U_{s2} = U_{sn} = 4160\text{V}$.

GEL-3001-A22

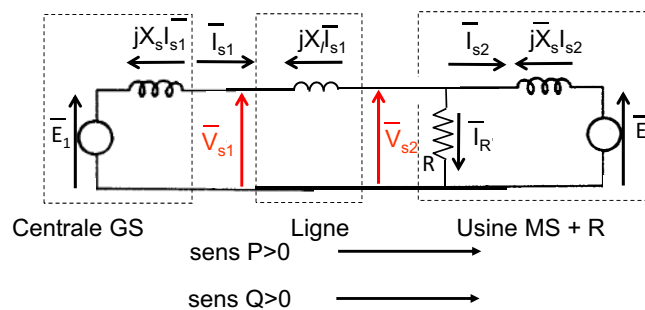
LEEPCI L'AVANTAGE

© P. Viarouge Département de GEL&GIF

Exercice 2 Question 4

Question 4: Calculer la résistance R du schéma monphasé équivalent en étoile de la charge résistive qui consomme une puissance active totale $P_R=1\text{MW}$ lorsqu'elle est alimentée en triphasé par la tension ligne-ligne nominale $U_{s2}=U_{sn}=4160\text{V}$. Tracer le schéma monphasé 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.

Circuit monphasé équivalent configuration hivernale



$$P_R = 3 \frac{V_{sn}^2}{R}$$

$$\begin{aligned} \overline{E_1} &= \overline{V_{s1}} + jX_s \overline{I_{s1}} \\ \overline{V_{s1}} &= \overline{V_{s2}} + jX_l \overline{I_{s1}} \\ \overline{V_{s2}} &= \overline{E_2} + jX_s \overline{I_{s2}} \\ \overline{V_{s2}} &= R \overline{I_R} \\ \text{Avec } V_{s1} &= V_{s2} = V_{sn} \end{aligned}$$

GEL-3001-A22

LEEPCI L'AVANTAGE

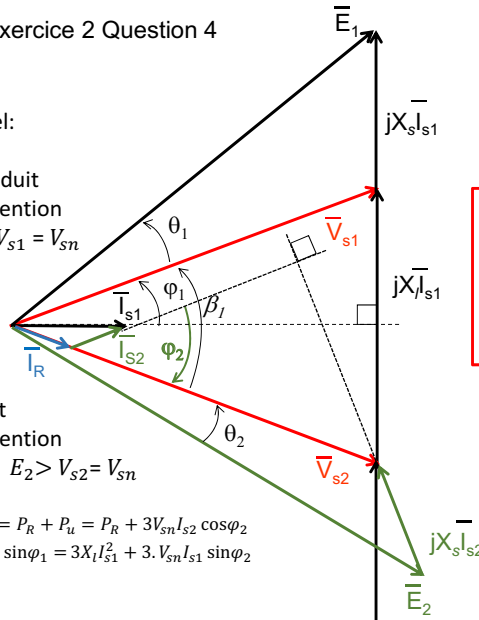
© P. Viarouge Département de GEL&GIF

Exercice 2 Question 4

Question 4: Suite

Sans faire de calcul, on voit sur le diagramme vectoriel:

- que la génératrice synchrone GS de la centrale produit effectivement de la puissance réactive car en convention générateur $Q_1 = 3 \cdot V_{sn} I_{s1} \sin \varphi_1 > 0$ et de plus $E_1 > V_{s1} = V_{sn}$
- que le moteur synchrone MS de la centrale produit effectivement de la puissance réactive car en convention récepteur pour MS $Q_2 = 3 \cdot V_{sn} I_{s2} \sin \varphi_2 < 0$ et de plus $E_2 > V_{s2} = V_{sn}$
- Bilan puissance active: $P_1 = 3V_{sn} I_{s1} \cos \varphi_1 = P_R + P_2 = P_R + P_u = P_R + 3V_{sn} I_{s2} \cos \varphi_2$
- Bilan de puissance réactive: $Q_1 = Q_l + Q_2 = 3 \cdot V_{sn} I_{s1} \sin \varphi_1 = 3X_l I_{s1}^2 + 3 \cdot V_{sn} I_{s1} \sin \varphi_2$



GEL-3001-A22

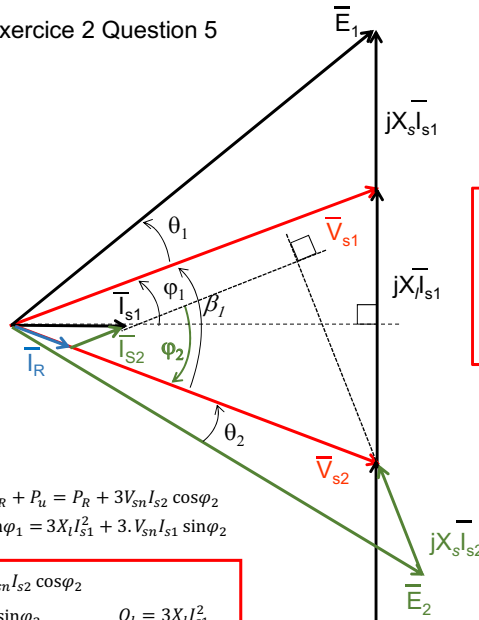
LEEPCI

UNIVERSITÉ LAVAL

© P. Viarouge Département de GEL&GIF

Exercice 2 Question 5

Question 5: Calculez la nouvelle puissance active P_1 qui circule dans la ligne et la nouvelle valeur algébrique de l'angle de déphasage β_1 entre les tensions en amont et en aval de la ligne. Calculez 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. Calculez 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. Calculez la valeur efficace du courant I_{s2} dans le moteur synchrone MS et les nouvelles valeurs de courant inducteurs I_{l1} de la génératrice synchrone GS et I_{l2} 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.



- Bilan puissance active: $P_1 = 3V_{sn} I_{s1} \cos \varphi_1 = P_R + P_2 = P_R + P_u = P_R + 3V_{sn} I_{s2} \cos \varphi_2$
- Bilan de puissance réactive: $Q_1 = Q_l + Q_2 = 3 \cdot V_{sn} I_{s1} \sin \varphi_1 = 3X_l I_{s1}^2 + 3 \cdot V_{sn} I_{s1} \sin \varphi_2$

$$\begin{aligned} P_1 &= 3V_{sn} I_{s1} \cos \varphi_1 = P_R + P_u & P_2 &= P_u = 3V_{sn} I_{s2} \cos \varphi_2 \\ Q_1 &= 3V_{sn} I_{s1} \sin \varphi_1 & Q_2 &= 3V_{sn} I_{s2} \sin \varphi_2 & Q_l &= 3X_l I_{s1}^2 \end{aligned}$$

GEL-3001-A22

LEEPCI

UNIVERSITÉ LAVAL

© P. Viarouge Département de GEL&GIF

Exercice 2 Question 5

Question 5: Suite

- Comme dans la question 2 on peut calculer la nouvelle valeur de β_1 sachant que la puissance active transmise dans la ligne est à présent:

$$P_1 = P_u + P_R = 3 \frac{V_{s1} V_{s2}}{X_l} \sin \beta_1 = 3 \frac{V_{sn}^2}{X_l} \sin \beta_1$$

$$\sin \beta_1 = \frac{X_l (P_u + P_R)}{3 V_{sn}^2}$$

- Comme dans la question 2 le triangle est isocèle, donc

$$\varphi_1 = \beta_1 / 2$$

$$\cos \varphi_1 = \cos(\frac{\beta_1}{2}) \quad \sin \varphi_1 = \sin(\frac{\beta_1}{2})$$

- On calcule alors I_{s1} & Q_1 :

$$I_{s1} = \frac{P_1}{3 V_{sn} \cos \varphi_1} = \frac{(P_u + P_R)}{3 V_{sn} \cos(\frac{\beta_1}{2})}$$

$$Q_1 = 3 V_{sn} I_{s1} \sin(\frac{\beta_1}{2})$$

- Puis Q_2 et φ_2 puis I_{s2} & I_R

$$Q_2 = Q_1 - Q_l = Q_1 - 3 X_l I_{s1}^2 = 3 V_{sn} I_{s2} \sin \varphi_2$$

$$P_2 = P_u = 3 V_{sn} I_{s2} \cos \varphi_2$$

$$\varphi_2 = \arctan(\frac{Q_2}{P_2})$$

$$I_{s2} = \frac{P_2}{3 V_{sn} \cos \varphi_2} = \frac{P_u}{3 V_{sn} \cos \varphi_2}$$

$$I_R = \frac{V_{sn}}{R}$$

Avec $V_{s1} = V_{s2} = V_{sn}$

$$\begin{aligned} \vec{E}_1 &= \vec{V}_{s1} + j X_s \vec{I}_{s1} \\ \vec{V}_{s1} &= \vec{V}_{s2} + j X_l \vec{I}_{s1} \\ \vec{V}_{s2} &= \vec{E}_2 + j X_s \vec{I}_{s2} \\ \vec{I}_{s1} &= \vec{I}_R + \vec{I}_{s2} \end{aligned}$$

GEL-3001-A22

LEEPCI

UNIVERSITÉ LAVAL

© P. Viarouge Département de GEL&GIF

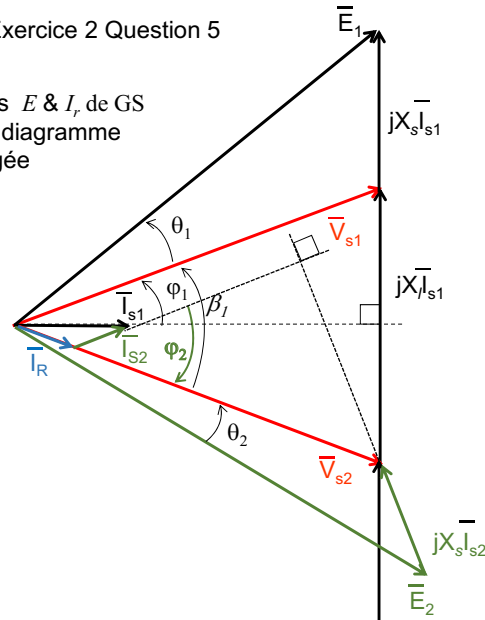
Exercice 2 Question 5

Question 5: Suite

Comme dans la question 3 peut alors calculer les E & I_r de GS & MS à partir de l'expression classique issue du diagramme vectoriel de la machine synchrone avec R_s négligée

$$E_1^2 = (V_{sn} + X_s \frac{Q_1}{3 V_{sn}})^2 + (X_s \frac{P_1}{3 V_{sn}})^2 \Rightarrow I_{r1} = \frac{E_1}{K}$$

$$E_2^2 = (V_{sn} - X_s \frac{Q_2}{3 V_{sn}})^2 + (X_s \frac{P_2}{3 V_{sn}})^2 \Rightarrow I_{r2} = \frac{E_2}{K}$$



GEL-3001-A22

LEEPCI

UNIVERSITÉ LAVAL

© P. Viarouge Département de GEL&GIF

Application Numérique

Usn	4160	V
Vsn	2402	V
fs	60	Hz
Ns1	50	rpm
Ns2	900	rpm
Pu	4.00E+06	W
Xl	2	Ohm
Kws	15	
Question 1		
gk	72	
gm	4	
Xs	2	Ohm
Question 2,3 été		
beta1deg	27.53	degrés
phi1	0.24	rad
Is1	571.56	A
E1	2895.17	V
Ir1	193.01	A
teta1deg	22.55	degrés
Q1	980059	VAR
Ql	1960119	VAR
phi2	-0.24	rad
E2	2895.17	V
Ir2	193.01	A
Q2	-980059.43	VAR
Bilan des Q Q1 -Q2 -Ql	0.00	ok
Question 4,5 Hiver avec PR		
Pr	1000000	W
R	172.3	Ohm
P12	5000000	W
beta2deg	35.30	degrés
phi12	0.308044493	rad
Is12	728.21	A
E12	3163.99	V
Ir12	210.93	A
Q12	1590863	VAR
Ql2	3181727	VAR
Q22	-1590863.45	VAR
Is22	597.44	A
phi22	-0.38	rad
E22	3052.44	V
Ir22	203.50	A
Bilan des Q Q1 -Q2 -Ql	0	ok

GEL-3001-A22

LEEPCI



@ P. Viarouge Département de GEL&GIF