

Aucun document n'est autorisé – Calculatrice autorisée – Durée : 2h
 Ce sujet comporte deux parties A et B qui sont à faire sur des copies séparées.

Partie A (sur 15 pts)

Transformateur de puissance 180MVA

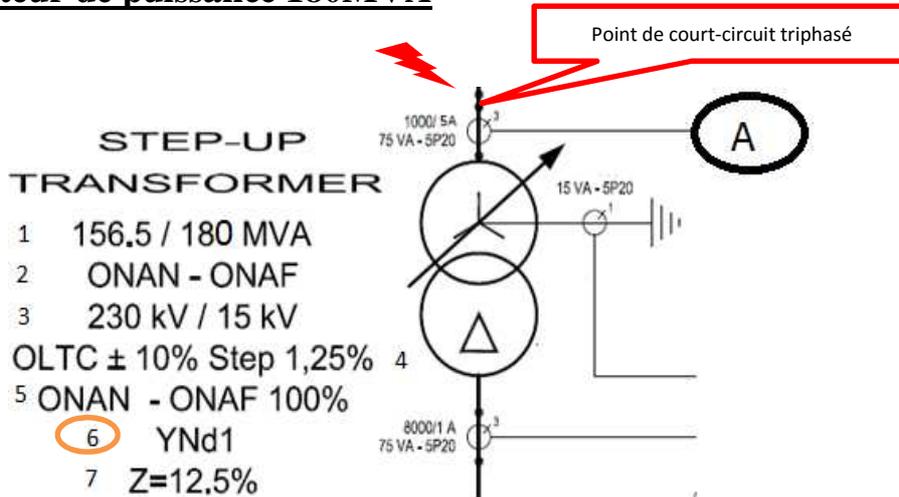


Figure 1

A- Notions de base (5pts) :

- 1- La figure 1 ci-dessus représente un extrait d'un unifilaire d'un transformateur de puissance. Donnez une définition claire et précise de chacune des lignes 1 à 7 et le diagramme vectoriel de phase associé au point 6.
- 2- Complétez la configuration à effectuer de « l'Impédance positive » sur le champ ci-dessous du logiciel ETAP représenté par la **figure 2**.

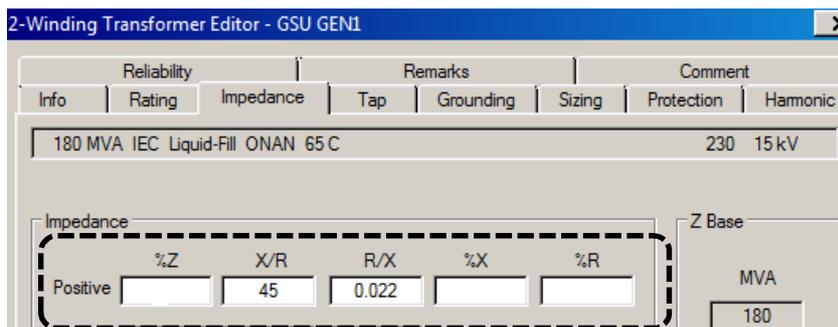
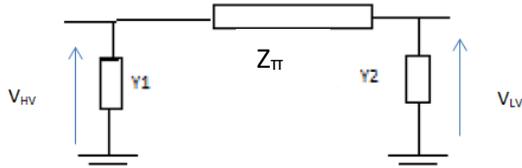


Figure 2

- 3- Ci-dessous le modèle en π du GSU GEN1 pour son fonctionnement nominal en tension HT et BT. Calculez les valeurs complexes : Y_1 , Y_2 et Z_{π} avec $Z=R+jX$ (impédance caractéristique du transformateur, on considère R nulle)

$$Z_{\pi} = a * Z \quad , \quad Y_1 = \frac{1}{Z} * \frac{1-a}{a^2}, \quad \text{et} \quad Y_2 = -aY_1$$



On définira par 'a' un nombre complexe dont les grandeurs module et phase sont définies par la figure 1 :

$$a = \frac{U_{HV}}{U_{LV}}$$

B- Exploitation (5pts) :

**Pour le point de fonctionnement illustré à la figure 3,
Déterminez :**

- 4- le courant de phases côté BT et HT du transformateur
- 5- la chute de tension sur une phase (phase-neutre) associée au transformateur
- 6- le rendement du transformateur

Évaluez :

- 7- les pertes à vide (P_v) et les pertes cuivre (P_{cu1}) du transformateur. Les pertes cuivre des liaisons (câbles et gaines à barres) sont supposées nulles
- 8- la f.e.m interne de phase E en kV et la valeur de l'angle interne δ de GEN1 (figure 4) et réalisez le schéma vectoriel des tensions associées. (La résistance R_a est supposée nulle)

C- Fondamentaux (5pts) :

9 - Réalisez un schéma unifilaire de la figure 3 avec en per unit toutes les grandeurs et impédances caractéristiques de GEN1, GSU_GEN1, GEN_réseau, vous prendrez comme base SB= 100MVA.

Remarques :

- a) Le réseau est considéré comme une Génératrice Synchrones de très forte puissance (230kV, 1650MVA, $I_{SCRES}=4.142kA$, impédance interne caractéristique $X/R=20$)
- b) On considèrera le modèle GSU_GEN1 à une réactance caractéristique avec la valeur de R supposée nulle.

10 - Tenant compte du point de fonctionnement de tension U et de puissances P, Q débitées sur le réseau telles que illustrées sur la figure 3 :

- 10-1) Calculez les grandeurs en pu : P, Q, U, I au nœud **GSU BUS LINE**
- 10-2) Calculez les grandeurs en pu : P_{GEN} , Q_{GEN} , U_{GEN} , I aux bornes de GEN1 (BUS GEN)

11 - Exprimez en grandeurs (Volt, Ampère, MW, MVAR) vos résultats obtenus en 10-1 et 10-2

12 - Commentez vos résultats par rapport aux résultats de la figure 3.

13 - Le transformateur GSU_GEN1 est maintenant représenté par son modèle en π (question 3), proposez une démarche analytique pour déterminer les grandeurs : P_{GEN} , Q_{GEN} , U_{GEN} , I au nœud BUS GEN.

Remarque : Aucun calcul numérique n'est demandé pour cette question, uniquement une analyse.

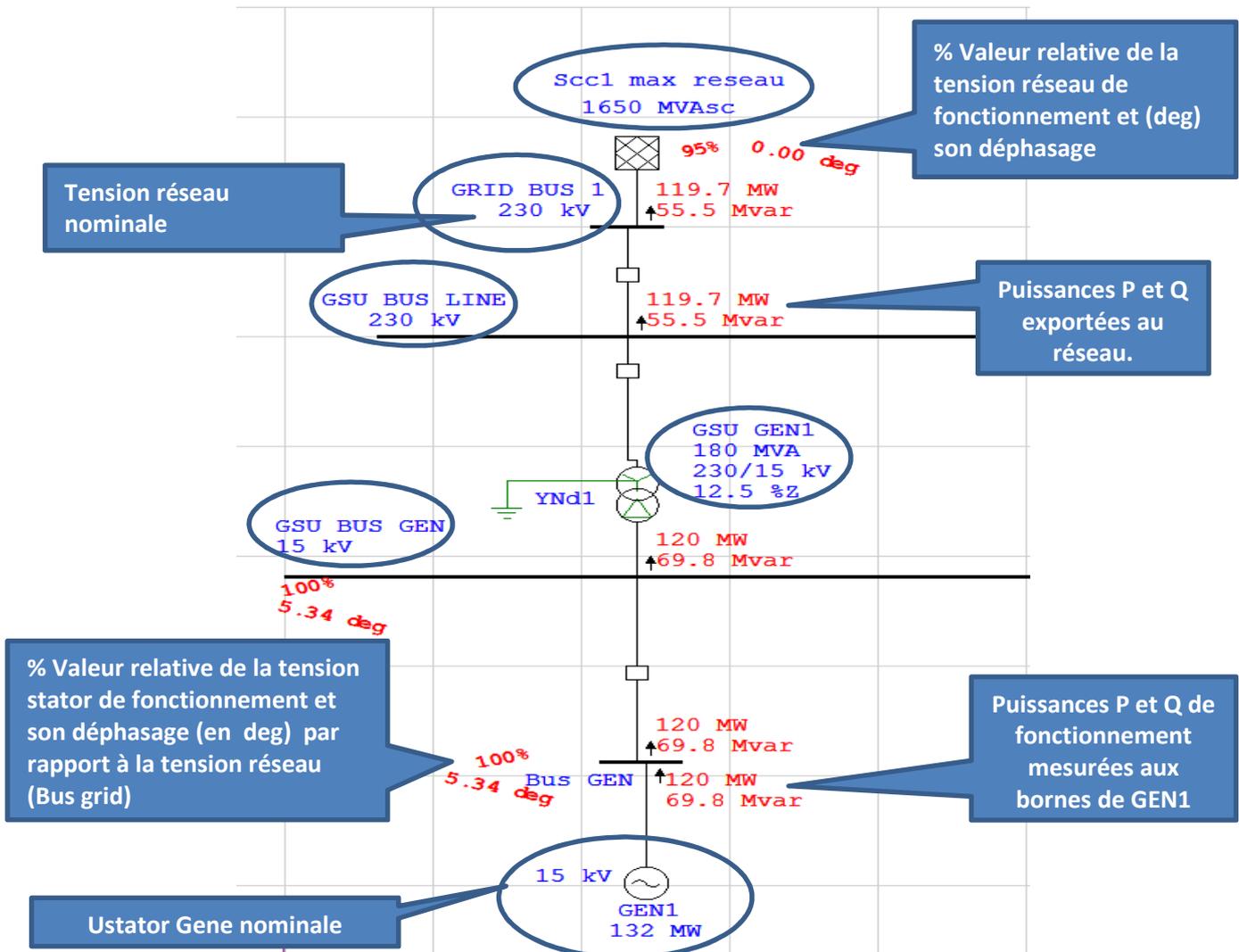


Figure 3 (calcul de répartition de puissance – Load flow)

| Synchronous Generator Editor - GEN1 | | | | | | | |
|---|----------------|-----------|--------|-----------------|-------|-------------|----------|
| PSS | | Harmonic | | Protection | | Reliability | |
| Info | | Rating | | Capability | | Imp/Model | |
| | | Grounding | | Inertia | | E | |
| 15 kV | | 132 MW | | Voltage Control | | | |
| Impedance | | | | | | | |
| | % | | % | Ohm | | | |
| Xd'' | 15 | Xd''/Ra | 50 | Ra | 0.3 | Ra | 0.004091 |
| X2 | 15 | X2/R2 | 14.29 | R2 | 1.05 | R2 | 0.014314 |
| Xo | 11.3 | X0/R0 | 19.643 | R0 | 0.575 | R0 | 0.007845 |
| Dynamic Model | | | | | | | |
| | % | | % | Sec | | | |
| <input checked="" type="radio"/> Subtransient | Xd | 206 | Xq | 195 | Tdo' | 10.4 | |
| <input type="radio"/> Transient | Xdu | 206 | Xqu | 195 | Tdo'' | 0.04 | |
| <input type="radio"/> Equivalent | Xd' | 21 | Xq' | 41 | Tqo' | 0.65 | |
| Typical Data | X _L | 11.5 | Xq'' | 14.5 | Tqo'' | 0.087 | |

Figure 4
Caractéristiques du générateur triphasé avec nominal $pf = 0.8$ (GEN1)

Toutes les grandeurs encadrées représentent les grandeurs nominales et caractéristiques. Toutes les autres représentent les valeurs calculées pour un point de fonctionnement défini faisant l'objet de notre analyse.

Partie B (sur 8 pts)

Questions de cours :

- 1) Expliquer en quelques lignes les principales différences entre un câble souterrain et une ligne aérienne (constitution, paramètres, limite d'utilisation, ...)
- 2) Une ligne aérienne peut être modélisée sous la forme d'un quadripôle avec des paramètres ABCD. A quoi correspond un quadripôle passif ? Comment le vérifier ?
- 3) Qu'est-ce que la puissance naturelle d'une ligne ? Dans le cas où la charge est une résistance de valeur égale à l'impédance caractéristique, que pouvons-nous dire du bilan de puissance réactive sur la ligne ?
- 4) Pourquoi réalise-t-on des essais à vide et en court-circuit sur les lignes aériennes avant de connecter la charge ?

Exercice :

On considère une ligne de transport aérienne avec les caractéristiques ci-dessous :

- Ligne de longueur $d = 300$ km, $f = 60$ Hz, 500 kV
- Charge : 800 MW, 500 kV, $f_p = 0,8$ AR
- Paramètres de la ligne par phase :

| |
|--------------------|
| $r = 0$ Ω/km |
| $l = 0,97$ mH/km |
| $c = 0,0115$ μF/km |

Les équations régissant le fonctionnement de la ligne sont données ci-dessous :

$$\underline{z} = j l \omega \text{ (}\Omega/\text{km)}$$

$$\underline{y} = j c \omega \text{ (S/km)}$$

$$\underline{\gamma} = j \beta \text{ avec } \beta = \omega \sqrt{l \cdot c} \text{ (rad/km)}$$

$$\underline{z}_c = \sqrt{\frac{l}{c}} \text{ (}\Omega\text{)}$$

En posant x comme étant la longueur de la ligne depuis la charge, on peut écrire :

$$\underline{V}(x) = \underline{V}_C \cos(\beta x) + j \underline{z}_c \underline{I}_C \sin(\beta x)$$

$$\underline{I}(x) = \underline{I}_C \cos(\beta x) + j \frac{\underline{V}_C}{\underline{z}_c} \sin(\beta x)$$

Avec \underline{V}_C et \underline{I}_C la tension et le courant de la charge.

- 1) A partir des deux dernières équations, déterminer les expressions des paramètres ABCD et calculer leurs valeurs numériques (on écrira le résultat sous le format polaire).

Avant de connecter la charge décrite ci-dessus, l'opérateur du réseau, pour tester la ligne, décide de connecter à l'extrémité de la ligne une charge ayant une valeur égale à l'impédance caractéristique de la ligne.

- 2) Exprimer littéralement les expressions $\underline{V}(x)$ et $\underline{I}(x)$. Interpréter ces relations en donnant au moins deux explications.
- 3) La tension au départ de la ligne est de 500kV. Calculer la puissance active transitant sur la ligne. Faites un bilan de puissance réactive sur la ligne.

L'opérateur du réseau décide de faire un essai à vide sur la ligne afin de déterminer les tensions minimales et maximales.

- 4) Calculer la tension composée à l'extrémité de la ligne quand aucune charge n'est connectée et que la tension au départ de la ligne est de 500 kV.
- 5) Déterminer la réactance de l'inductance parallèle X_{Lp} à installer à l'extrémité de la ligne pour maintenir la tension à vide aux bornes de la charge à la valeur nominale de 500 kV. Faut-il garder cette inductance connectée lorsque la charge est connectée ?
- 6) L'inductance parallèle X_{Lp} est connectée à l'extrémité de la ligne. Démontrer à l'aide de l'équation $\underline{V}(x)$ que la tension tout au long de la ligne n'est pas uniforme et qu'elle admet un maximum au milieu de la ligne ($x = d/2$). Calculer ainsi la tension maximale sur la ligne.

La charge de 800 MW, 500 kV, $\text{fp} = 0,8$ AR est maintenant connectée.

- 7) Calculer la tension, le courant et la puissance apparente au départ de la ligne, le taux de régulation et le rendement de la ligne.
- 8) Que faudrait-il faire pour diminuer le taux de régulation et ainsi améliorer les performances de la ligne ?