

Session S3
Génie électrique

Électrotechnique
Unité APP 6

**Production Transport et
Distribution d'Énergie Électrique**

Département de génie électrique et de génie informatique
Faculté de génie
Université de Sherbrooke

Été 2023

Tous droits réservés © 2018 Département de génie électrique et de génie informatique,
Université de Sherbrooke

Guide de l'étudiant

Note : En vue d'alléger le texte, le masculin est utilisé pour désigner les femmes et les hommes.

Document Guide de l'étudiant APP6 - 2023
Document S3E_APP6.doc
Version 2, 12/07/2023
Rédigé par Serge A. Kodjo
Copyright © 2018

Table des matières

	Pages
1- Éléments de compétence de la session S3 visés par l'unité.....	4
2- Énoncé de la problématique.....	4
3- Connaissances nouvelles à acquérir par la résolution de cette problématique	17
Contenu détaillé	18
Éléments de contenu	18
Répartition dans le cadre de l'activité pédagogique (% ou temps).....	18
4- Références obligatoires à consulter	20
5- Activités liées à la problématique	31
6- Livrables	32
7- Formation à la pratique procédurale - 1	33
8- Formation à la pratique procédurale - 2	37
9 - Évaluation.....	41
9.1- Rapport de la problématique.....	42
9.3- Validation	43
9.4- Examens.....	44
10- Utilisation des téléphones cellulaires, iPod et ordinateurs.	45

1- Éléments de compétence de la session S3 visés par l'unité

GEL-335 : Production Transport et Distribution d'Énergie Électrique

- a) Analyser le fonctionnement d'un réseau de transport et de distribution de l'énergie électrique.
- b) Modéliser une ligne de transport de l'énergie électrique.

2- Énoncé de la problématique

Vous devez former une équipe de 3 personnes. Chacune des équipes aura le mandat de résoudre la problématique suivante.

Mise en Contexte

Une industrie métallurgique qui produit sa propre électricité à partir d'une centrale hydroélectrique pour alimenter ces installations, décide de transporter le surplus de l'énergie qu'elle est capable de produire pour la vente sur le réseau d'Hydro-Québec TransÉnergie. Pour cela, il lui faudra installer une ligne de transport aérienne. La centrale de l'industrie est équipée de 6 groupes turbine-alternateurs qui peuvent fournir chacun une puissance garantie de 350 MW. Les six alternateurs produisent une tension de 13,8 kV, cette tension sera ensuite élevée à 500 kV par un transformateur triphasé (connecté en étoile-triangle yD11 avec neutre mis à la terre) pour le transport. La centrale fournit en permanence une puissance de 100 MW pour alimenter localement les installations de l'industrie. La centrale peut garantir de fournir au réseau d'Hydro-Québec 90% de la puissance restante. Le point de raccordement avec le réseau se situe dans un poste d'Hydro-Québec TransÉnergie qui est localisé à 400 km de la centrale de production. Pour assurer la stabilité de son réseau, Hydro-Québec a exigé une variation de tension au point de raccordement inférieure ou égale à 5% de la tension nominale.

*Dessiner le **schéma unifilaire** illustrant le système.*

Vous venez d'être embauché dans une firme d'ingénierie qui a obtenu le contrat pour l'étude et la réalisation de la ligne de transport. Votre responsable vous confie l'étude des performances de la ligne de transport. Vous avez à votre disposition pour faire votre analyse de performance, l'outil de simulation Simulink SimpowerSystem. Dans votre simulation, la puissance demandée par le réseau sera simulée par une charge et le groupe alternateurs par son équivalent Thévenin formé d'une source de tension E_g avec une réactance.

Caractéristique de la ligne de transport

La ligne de transport triphasée se caractérise par des grandeurs linéiques telles que sa résistance et son inductance en série ainsi que sa capacité et sa conductance en parallèle. Ces grandeurs sont réparties le long de la ligne et s'expriment par unité de longueur. Dans un souci de simplification de l'analyse, pour étudier le comportement de la ligne en vue d'un transfert optimal de l'énergie vers le réseau, on utilisera son modèle quadripolaire en « pi » nominal. Le modèle en pi nominal constitue une approximation du modèle en « pi » équivalent de la ligne ou du modèle à constante répartie. Cette approximation est très satisfaisante lorsque la ligne n'est pas trop longue (soit une longueur inférieure à 250 km). Chaque phase de la ligne sera constituée d'un faisceau de 4 conducteurs de type ACSR 54/19 Martin 1351 Kcmil (voir table A.4 du livre Power System).

1- Calcul des paramètres de la ligne

Avant de commencer votre étude, en vous servant de l'annexe 1, vous devez calculer les paramètres par phase de la ligne. Ces paramètres sont les composantes de séquence directe de l'inductance linéique L_1 , de la capacité linéique C_1 et de la résistance linéique R_1 de la ligne. Pour le calcul de ces paramètres, l'effet de la terre sera négligé. On calculera R_1 pour une température des conducteurs avoisinant les 50°C en se servant du tableau A.4 du livre Power System.

Pour la simulation, votre analyse se portera uniquement sur le comportement du réseau de transport en régime équilibré.

Vous devez également fournir dans votre rapport la valeur de l'intensité du champ électrique maximal à la surface des conducteurs en kV/cm en négligeant l'influence des champs électriques créés par les conducteurs des autres phases. Ensuite, vérifiez si l'effet couronne (effet corona) sera limité ou non sur la ligne de transport (justifiez votre réponse).

quand l'air s'ionise et fait des arcs

Max à 30 kV/cm

2- Étude des performances de la ligne de transport.

Vous devez fournir dans votre étude (en considérant la ligne sans pertes), la quantité de puissance active que la ligne peut transporter tout en gardant la tension au point de raccordement égale à la tension d'entrée de la ligne. Cette puissance est un paramètre important pour la ligne. Il correspond à la puissance transmissible de la ligne lorsque cette dernière est chargée par son impédance caractéristique. Cette puissance est communément

appelée (SIL) de « *Surge Impedance Loading* » et est calculée en utilisant les paramètres du modèle équivalent de la ligne.

Un autre paramètre considéré important dans la détermination du transfert de puissance est l'angle de déphasage entre la tension en début de ligne V_{B2} et la tension au point de raccordement V_{B3} . En pratique, pour assurer la stabilité du réseau en régime permanent, la valeur de cet angle ne doit dépasser les 35° .

Après avoir calculé le « SIL », validez la valeur trouvée avec votre outil de simulation. Pour paramétrer la charge qui consomme le SIL dans votre simulation, on pourra ignorer ici la chute de tension causée par les imperfections du transformateur.

Pour $P = \text{« SIL »}$ et $F_p = 1$

$ (V_{B2}-V_{B3})/V_{B2} $	V_{B3} en pu	δ en degré	I_{B3} en A	$P_{transmise}$ en W (totale des 3 phases) par la ligne de transport

3- Amélioration des performances de la ligne pour le transport optimal de puissance.

Il faut noter que la puissance que l'on souhaite transporter vers le réseau ne correspondra pas forcément au « SIL ». Les gestionnaires de la centrale souhaiteraient fournir le maximum possible de puissance disponible.

Dans cette étude vous aurez à fournir aux gestionnaires de la centrale, la puissance maximale en MW qu'ils peuvent fournir au réseau tout en respectant les exigences d'Hydro-Québec qui sont :

- La valeur absolue de la variation de tension : $|(V_{B2}-V_{B3})/V_{B2}|$, de la ligne de transport doit être inférieure ou égale à 5%,
- la tension de ligne V_{B3} au point de raccordement (barre B3) doit rester dans la plage de $V_{nominale} \pm 5\%$,
- δ (l'angle de déphasage entre les tensions des deux extrémités de la ligne) doit être inférieur ou égale à 35° ,
- le courant de charge à la sortie de la ligne de transport doit être inférieur à 35% de la limite thermique des conducteurs (valeur donnée en ampère).

Note : Pour la limite thermique de la ligne, voir le tableau A.4 de l'appendice du livre « Power System Analysis & Design »

Pour augmenter la puissance maximale transportable sur la ligne il est possible d'installer des équipements de compensation série sur la ligne.

La compensation série consiste en un groupe de condensateur en série avec l'inductance équivalente de la ligne. Cette introduction de compensateur série diminue l'impédance équivalente totale de la ligne, ce qui permet non seulement d'augmenter la capacité de transport de la ligne mais également de réduire la dégradation de la tension au point de raccordement. Afin d'éviter la surcompensation de la ligne de transport, on limite souvent le taux de compensation série à 70 % selon certaines normes. Le taux de compensation série est défini comme étant le rapport entre la réactance capacitive du condensateur de compensation et la réactance inductive de la ligne.

En considérant le facteur de puissance égal à 1 au point de raccordement et en vous servant de la technique de compensation série, vous devez estimer la puissance maximale que l'on peut transporter tout en respectant les contraintes imposées. Le compensateur série sera installé au poste d'arrivée de la ligne et le taux de compensation série ne doit pas dépasser les 70%.

3.1. Calculs

Dans un premier temps, à l'aide de Matlab, vous devez calculer et fournir pour des taux de compensation série allant de 0% à 70% (avec un pas de 10%), des courbes montrant :

- *la tension V_{B3} (en pu), en fonction de la puissance transportée*
- *la variation de tension $\left| \frac{V_{B2} - V_{B3}}{V_{B2}} \right|$ (en %), en fonction de la puissance transportée*
- *le courant de la ligne I_{ligne} (en A) en fonction de la puissance transportée.*

On fera les calculs pour des puissances transportées de 0,8 fois le « SIL » jusqu'à la puissance disponible pour le transport, avec un pas de 10 MW (voir annexe 3).

A partir des résultats obtenus, vous devez déterminer la puissance maximale que la ligne optimisée peut transporter avec le taux de compensation requis et qui permet de respecter les contraintes imposées.

<i>Taux (%)</i>	<i>$P_{3\phi_max}$ (W)</i>	<i>V_{B2} (volts)</i>	<i>V_{B3} (volts)</i>	<i>V_{B3} (pu)</i>	<i>$\frac{V_{B2} - V_{B3}}{V_{B2}}$</i>	<i>I_{B3} (A)</i>	<i>δ en °</i>

Vous pouvez vous référer à la figure 5.4 du chapitre 5 du livre « Power system », où à l'annexe 2 pour les calculs sur le réseau.

3.2. Validation par simulation

Une fois la puissance maximale trouvée par calcul, à l'aide de l'outil de simulation Simulink, vous pouvez valider vos résultats. Vous devez pour ce faire, paramétrer la charge dans votre simulation pour qu'elle consomme la puissance maximale calculée. Dans votre

rapport, vous devez fournir pour cette puissance les résultats obtenus par simulation à savoir:

- la puissance réactive par phase du condensateur de compensation série.
- le taux de compensation série à installer,
- la variation de tension aux bornes de la ligne de transport : $\left| \frac{V_{B2}-V}{V_{B2}} \right|$,
- la tension au poste de raccordement V_{B3} en pu,
- l'angle de déphasage δ entre les tensions V_{B2} et V_{B3} des deux extrémités (barre B2 et barre B3) de la ligne compensée,
- le courant de charge I_{B3} à la sortie la ligne de transport compensée, **exprimé en pourcentage de la limite thermique des conducteurs.**
- l'explication de l'origine la valeur de l'angle de déphasage (fournie par les résultats de l'outil de simulation) entre la **tension ligne-ligne** aux bornes de la charge et le **courant de ligne** dans la charge.

4- Ligne faiblement chargée

Pendant les périodes de faible consommation, Hydro-Québec prévoit utiliser seulement 200 MW à ce point de livraison. Dans ce cas la compensation série sera enlevée. Vous devez ensuite prévoir la valeur de l'inductance shunt de compensation et la puissance réactive en MVAR correspondante qui doit être installée au poste de raccordement afin de respecter la contrainte sur la variation de tension exigée entre les deux extrémités de la ligne.

Pour ce faire on déterminera la valeur du compensateur shunt à installer pour garder la variation de tension proche de 0,

a) par calculs matriciels en tenant compte de tout le réseau,

b) Avec Simulink, on validera par simulation les résultats obtenus par calcul en prenant $V_{B3}=500$ kV ligne-ligne pour le paramétrage de la charge.

Résultats	Inductance Shunt	Puissance réactive de compensation (MVAR)	V_{B2} (volts)	V_{B3} (volts)	$\left \frac{V_{B2} - V_{B3}}{V_{B2}} \right $
a)					
b)					

c) On donnera la valeur de la tension V_{B3} en volt et en pu ainsi que la variation de tension, lorsque la ligne faiblement chargée n'est pas compensée.

Résultats	V_{B3} (volts)	V_{B3} (pu)	$\left \frac{V_{B2} - V_{B3}}{V_{B2}} \right $
Par calcul : de (a)			
Par Simulation : de (b)			

5- Calculs de courant de court-circuit

Le compensateur série est composé en plus des bancs de condensateur, d'un dispositif de sécurité permettant de limiter la tension aux bornes du condensateur à une valeur supportable par les condensateurs en cas de court-circuit. Dans votre simulation de calcul de court-circuit, on admettra que lors du court-circuit, la quasi-totalité de courant est détournée par le dispositif de protection des condensateurs. Pour cela on enlèvera le condensateur de compensation série pour la simulation de court-circuit.

- Court-circuit triphasé équilibré: 3 phases et terre

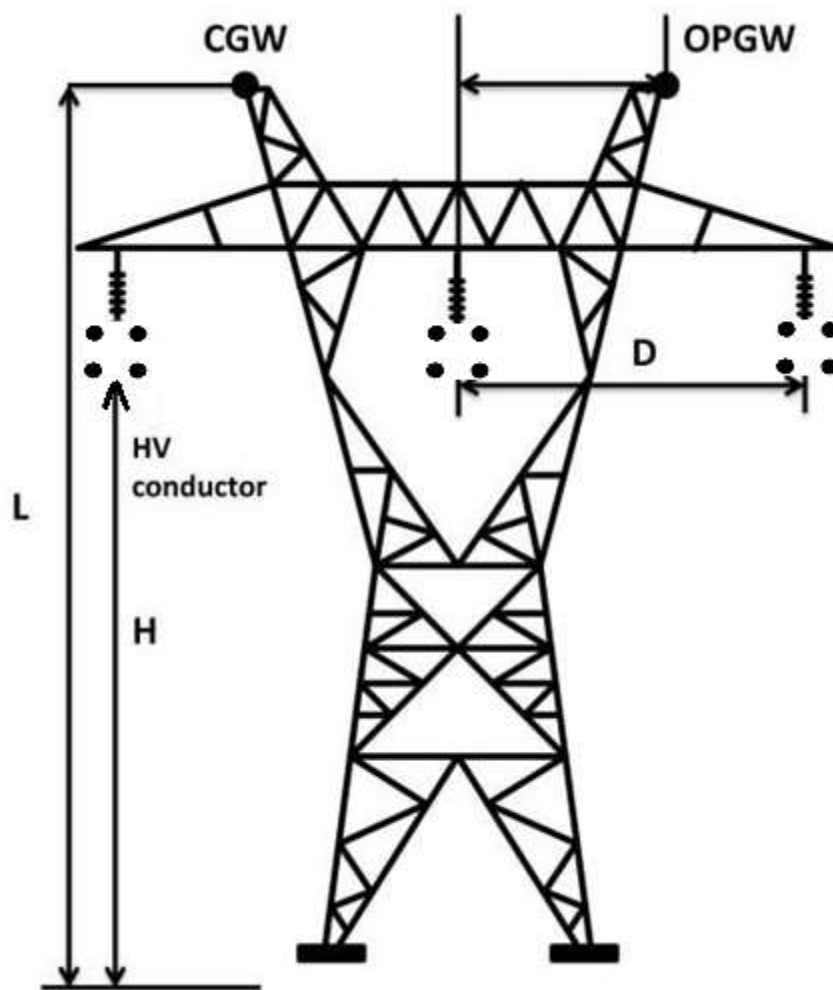
Dans votre simulation, réaliser le court-circuit triphasé équilibré entre le point de raccordement et la charge lorsque cette dernière consommait le SIL. Faire apparaître le court-circuit après 5 cycles plus Δt . Vous devez aussi choisir l'instant d'apparition du court-circuit afin d'obtenir le courant de court-circuit maximal possible. Dans votre rapport vous devez montrer la procédure pour calculer cet instant. Pour la simulation, on peut considérer qu'après 60 cycles, le régime permanent est atteint.

- Donnez la valeur crête maximale de courant **asymétrique** de court-circuit obtenue par simulation.
- Donnez la valeur crête de courant de court-circuit **symétrique** obtenue par simulation.
- Donnez la valeur efficace de courant de court-circuit **symétrique** obtenue par simulation.
- Si vous prévoyez installer un disjoncteur au point de raccordement qui doit s'ouvrir 3 cycles après l'apparition du défaut de court-circuit,

a) En utilisant l'impédance du système (alternateur, transformateur et ligne de transport), calculez la valeur efficace du courant asymétrique de court-circuit maximal à l'ouverture du disjoncteur. **Noter que pour le calcul de courant de court-circuit, seules les branches séries sont prises en compte. Les courants dans les branches parallèles ainsi que dans la charge sont négligés lorsqu'on calcule le courant de court-circuit.**

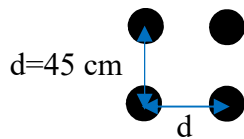
b) Donner la valeur minimale que doit avoir le pouvoir de coupure du disjoncteur à installer.

Annexe 1 : Ligne de transport aérienne haute tension

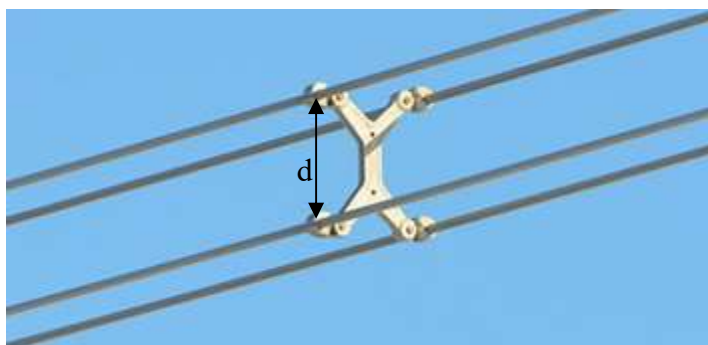


$H = 20 \text{ m}$; $D = 12 \text{ m}$; $L = 25 \text{ m}$;

- HV conductor ACSR 54/19 Martin 1351 kcmil



Faisceaux de 4 conducteurs ACSR



Annexe 2 : Forme matricielle des circuits quadripôles

Ligne neutre

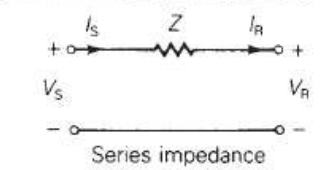
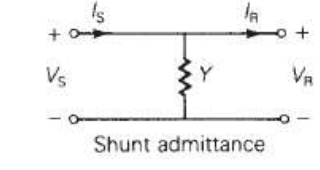
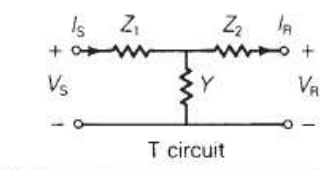
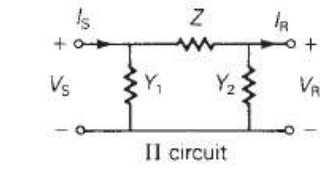
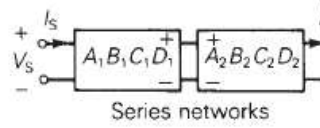
Circuit	ABCD Matrix
 <p>Series impedance</p>	$\begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
 <p>Shunt admittance</p>	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y & 1 \end{bmatrix}$
 <p>T circuit</p>	$\begin{bmatrix} (1 + YZ_1) & (Z_1 + Z_2 + YZ_1Z_2) \\ Y & (1 + YZ_2) \end{bmatrix}$
 <p>Π circuit</p>	$\begin{bmatrix} (1 + Y_2Z) & Z \\ (Y_1 + Y_2 + Y_1Y_2Z) & (1 + Y_1Z) \end{bmatrix}$
 <p>Series networks</p>	$\begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (A_1A_2 + B_1C_2) & (A_1B_2 + B_1D_2) \\ (C_1A_2 + D_1C_2) & (C_1B_2 + D_1D_2) \end{bmatrix}$

FIGURE 5.4 ABCD parameters of common networks

Rappel important

Multiplication matricielle

$$\begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \neq \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix}$$

L'admittance Y est l'inverse de l'impédance Z :

$$Y = \frac{1}{Z}$$

L'admittance et l'impédance sont des nombres complexes.

Pour un élément inductif : $Z=R+jX$ et $Y=G-jB$
 Pour un élément capacitif : $Z=R-jX$ et $Y=G+jB$

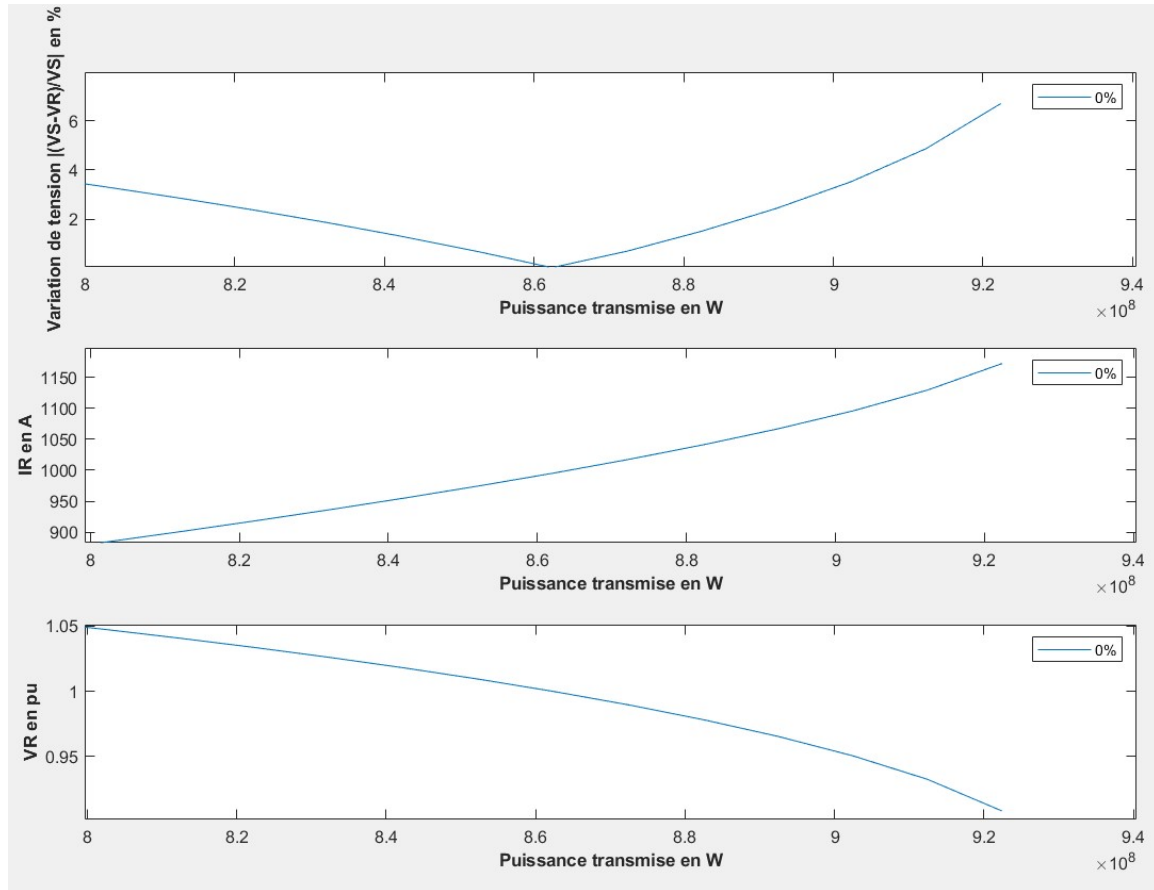
La résistance R , la réactance X , la conductance G et la susceptance B sont des nombres réels positifs.

L'impédance d'une bobine « parfaite » : $Z_L=jX_L$

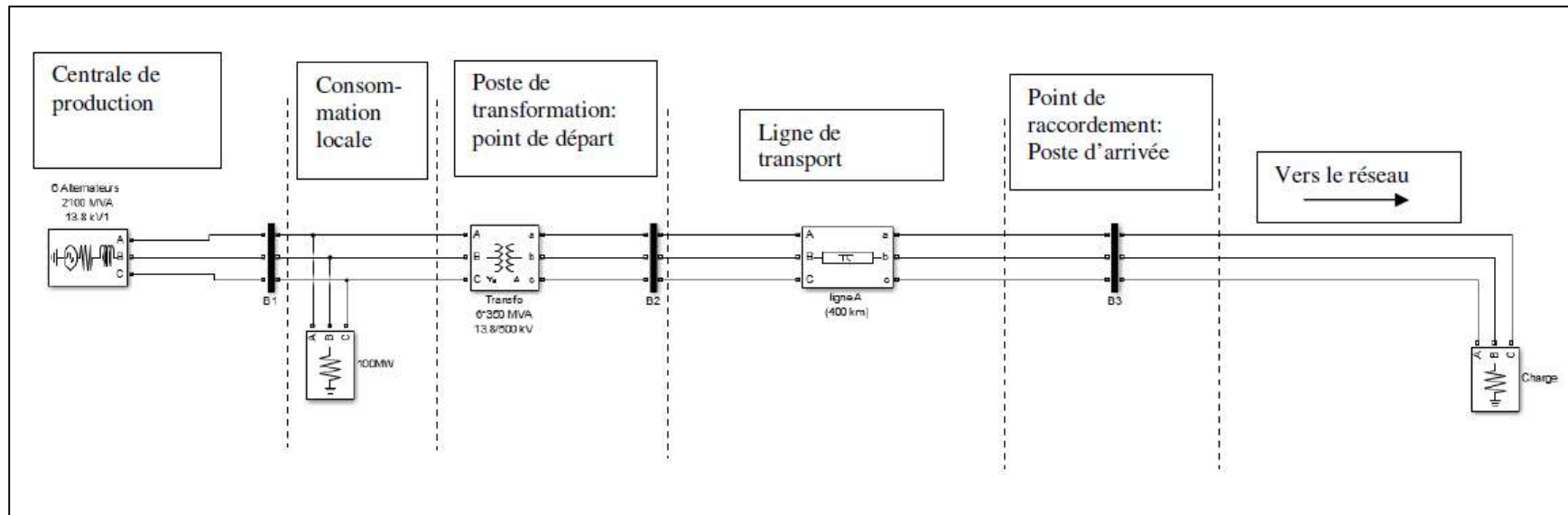
L'impédance d'un condensateur « parfait » : $Z_C=-jX_C$

« parfait » signifie qu'on néglige leurs résistances internes.

Annexe 3 : Exemple de résultats du mandat 3 pour un taux de compensation de 0%.



Annexe 4 : Production et transport de l'énergie électrique : schéma illustrant la problématique



Annexe 5: Essais en laboratoire (première semaine)

Production d'énergie électrique

A-Étude du comportement d'une génératrice asynchrone

A1.- Analyse du comportement de la génératrice asynchrone sans condensateur d'excitation ni charge.

- *Génératrice asynchrone à vide : On entraîne la machine asynchrone par la machine à courant continu à 1800 RPM. Mesurer la valeur de tension efficace à la sortie de la génératrice. Vous devez fournir une explication par rapport au niveau de tension mesurée.*

A2.- Analyse du comportement de la génératrice à courant alternatif avec condensateur d'excitation à vide.

Génératrice asynchrone avec capacité d'excitation à vide :

En vous servant des données mesurées sur la machine lorsque cette dernière fonctionnait en moteur, vous devez déterminer, la valeur de la capacité d'excitation C_0 nécessaire pour exciter la machine asynchrone afin d'avoir une tension de 120V ligne-neutre à ses bornes. Vous devez également choisir la vitesse de rotation de la machine d'entraînement à CC afin d'avoir une tension ligne-neutre d'environ 120 V et une fréquence proche de 60 Hz au stator de la génératrice asynchrone. Donner la valeur de C_0 calculée et la valeur de C_0 installée. Mesurer la tension aux bornes de la génératrice obtenue avec la valeur de C_0 installée.

Réduire ensuite la valeur de la capacité d'excitation à environ : 90% C_0 , 75% C_0 , 50% C_0 , puis 25% C_0 et mesurer la tension efficace à la sortie de la génératrice à vide pour ces différentes valeurs de condensateur. Expliquer théoriquement votre observation.

B.- Réglage de la régulation de tension lorsque l'alternateur est chargé

Pour analyser le comportement d'un alternateur en charge, vous devez effectuer quelques essais en laboratoire. Voici les caractéristiques des machines synchrones disponibles au laboratoire : 1/3 de HP, 208 V, 1800 RPM.

À l'aide de l'autotransformateur monophasé variable et du convertisseur AC/DC, ajuster dans un premier temps le courant d'excitation du rotor à 0 puis entraîner la machine synchrone par une machine asynchrone jusqu'à la vitesse de 1800 RPM selon les procédures utilisées à l'APP5. Régler ensuite la valeur du courant d'excitation rotorique I_x , jusqu'à obtenir une tension de 120 V ligne-neutre à la sortie de l'alternateur à vide. Assurez-vous que la vitesse est réglée à 1800 RPM et noter ensuite la valeur du courant I_x qui permet d'obtenir 120 V ligne-neutre.

Réduire la valeur du courant I_x à 0. Placer une charge triphasée résistive (de valeur $R = 375 \parallel 500 \Omega$ par phase) aux bornes de l'alternateur. Régler à nouveau la valeur du courant I_x égale à la valeur obtenue précédemment à vide. Assurez-vous toujours d'avoir une vitesse de 1800 RPM puis mesurer la nouvelle valeur de tension obtenue aux bornes de l'alternateur. Que vaut la régulation de tension RT pour cette charge.

Mesurer la nouvelle valeur du courant d'excitation I_x qui permet de ramener la tension aux bornes de la charge à 120 V ligne-neutre.

Dans votre rapport de laboratoire :

Calculez la nouvelle valeur de la force électromotrice E générée par l'alternateur.

Vous devez également prédire à l'aide de la technique des phaseurs, la valeur du courant d'excitation I_x mesurée. Pour le calcul de prédiction de I_x , on se servira du modèle électrique équivalent de la machine synchrone obtenu à l'APP5. On tiendra compte de la résistance du stator dans les calculs.

3- Connaissances nouvelles à acquérir par la résolution de cette problématique

Production Transport et Distribution d'Énergie électrique

- Connaissances déclaratives : Quoi
 - Propriété électrique des lignes de transmission.
 - Paramètres de ligne de transmission.
 - Modèle en pi équivalent et modèle en pi nominal d'une ligne de transmission, impédance caractéristique d'une ligne sans perte.
 - Puissance naturelle ou puissance transportable d'une ligne par son impédance caractéristique (SIL de « *surge impedance loading* »).
 - Écoulement de puissance maximale.
 - Profile des tensions aux bornes de la ligne pour différents niveaux de chargement de la ligne.
 - Limite de stabilité théorique en régime permanent, limite de stabilité pratique.
 - Variation de tension et puissance maximale transportable, régulation de tension d'une ligne.
 - Méthode de compensation série et compensation parallèle d'une ligne de transmission.
 - Couplage variation de tension et puissance active transitée sur la ligne.
 - Couplage variation de tension et puissance réactive transitée sur la ligne.
 - Analyse de défauts équilibrés : courant symétrique de court-circuit triphasé et courant asymétrique de court-circuit triphasé.
 - Court-circuit triphasé des machines synchrones, réactance transitoire et « sub-transitoire » des machines synchrones, Courant de court-circuit transitoire et courant de court-circuit « sub-transitoire ».
 - Composantes symétriques des grandeurs triphasées (tensions, courants, et impédances), composantes homopolaire, directe et inverse.
 - Schémas équivalents en composantes symétriques d'un alternateur triphasé, des impédances séries triphasées, d'une ligne de transport triphasée.
 - Analyse de défauts déséquilibrés : court-circuit phase-terre (défaut homopolaire), court-circuit biphasé-terre, court circuit entre 2 phases.
- Connaissances procédurales : Comment
 - Optimiser la puissance active transportable sur une ligne de transport.

- Améliorer la régulation de tension d'une ligne de transport.
 - Procédure pour calculer le courant de court-circuit équilibré.
 - Procédure pour calculer le courant de court-circuit déséquilibré à l'aide des composantes symétriques.
 - Limiter le courant de court-circuit.
 - Calcul du pouvoir de coupure minimale d'un disjoncteur de protection.
- Connaissance conditionnelle : Quand
 - Choix du compensateur série
 - Choix du compensateur parallèle
 - Réglage de tension
 - Choix du pouvoir de coupure d'un disjoncteur de protection.

Contenu détaillé	
Éléments de contenu	Répartition dans le cadre de l'activité pédagogique (% ou temps)
<ul style="list-style-type: none"> • Introduction <ul style="list-style-type: none"> • Historique des réseaux électriques • Structure d'un réseau électrique • Production de l'énergie électrique 	10 %
<ul style="list-style-type: none"> • Notions fondamentales <ul style="list-style-type: none"> • Paramètres de ligne • Équations de réseau • Circuit triphasé déséquilibré • Composantes symétriques 	20 %
<ul style="list-style-type: none"> • Ligne de transport en régime permanent <ul style="list-style-type: none"> • Équations de ligne • Circuit équivalent en π d'une ligne • Variation de tension et puissance maximale transportable • Transport de puissance • Méthode de compensation série et parallèle 	30 %
<ul style="list-style-type: none"> • Défauts <ul style="list-style-type: none"> • Défauts équilibrés • Défauts déséquilibrés • Calcul des courants de court-circuit équilibrés et déséquilibrés 	30 %

<ul style="list-style-type: none"> • Courant symétrique de court-circuit équilibré. • Courant asymétrique de court-circuit équilibré. 	
<ul style="list-style-type: none"> • Réseaux de distribution électrique <ul style="list-style-type: none"> • Postes de transformation et d'interconnexion haute tension (HT) et moyenne tension (MT) • Ligne de distribution MT • Système de distribution basse tension (BT) 	10 %

4- Références obligatoires à consulter

Première semaine: I à XI

Deuxième semaine : XII à XIII

Réf.1 : Volume « Électrotechnique », 4^e édition, Théodore Wildi. Les Presses de l'Université Laval

Réf.2 : Volume « Power System Analysis and Design », 6e Edition, SI Edition, J. Duncan Glover, Thomas Overbye, Mulukutla Sarma.

PREMIÈRE SEMAINE avant procédurale 1

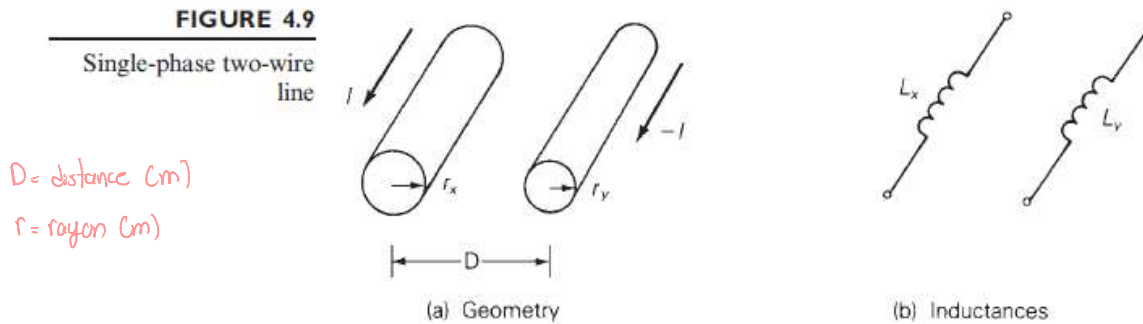
I- Paramètres de ligne de transport d'énergie électrique

LIRE LES SECTIONS SUIVANTES (avant procédural 1):

- Section 4.1 : Transmission line design considerations. pp. 173-178 (réf.2)
- Section 4.2 : Resistance. pp. 178-181 (réf.2)
- Section 4.3 : Conductance. pp. 181-181 (réf.2)
- Section 4.4 : Inductance : solid cylindrical conductor. pp. 181-184 jusqu'à l'équation 4.4.21 (réf.2)
- Section 4.5 : Inductance : single-phase two-wire line and three-phase three-wire line with equal phase spacing. pp. 186-188 (réf.2)
- Section 4.6 : Inductance : bundled conductors. pp. 192-196 (réf.2)
- Section 4.8 : Electric field and voltage: Solid cylindrical conductor. pp. 201-203 jusqu'à l'équation 4.8.4 (réf.2)
- Section 4.9 : Capacitance: Single-phase two-wire line and three-phase three-wire line with equal phase spacing. pp. 204-206 (réf.2)
- Section 4.10 : Capacitance: Stranded conductors, unequal phase spacing, bundled conductors. pp. 206-210 (réf.2)
- Section 4.12 : Electric field Strength at conductor surfaces and ground level pp. 215-216 jusqu'à l'équation 4.12.4 et le tableau 4.5 (réf.2)

Inductance de ligne

L'inductance totale d'une ligne monophasée à 2 fils est donnée par :



$$L = 4 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{\sqrt{r'_x r'_y}} \quad \text{H/m per circuit} \quad (4.5.5)$$

rayon différent

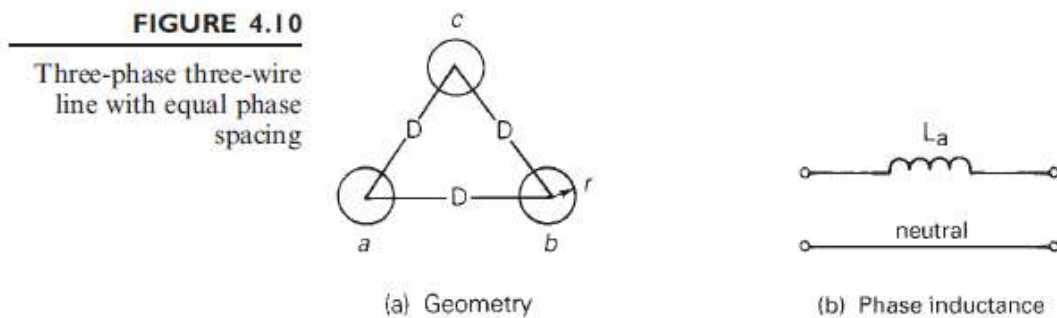
Si $r'_x = r'_y = r'$, avec

$$r' = e^{-1/4} r = 0.7788 r$$

$$L = 4 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r'} \quad \text{H/m per circuit} \quad (4.5.6)$$

rayon fictif

L'inductance d'une ligne triphasée à 3 fils cylindriques pleins également espacés est donnée par :



$$L_a = \frac{\lambda_a}{I_a} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r'} \quad \text{H/m per phase} \quad (4.5.9)$$

En régime équilibré $L_a = L_b = L_c$

d = distance entre deux faisceau (voir procedural 1.2)

Inductance d'une ligne triphasée en faisceau avec des conducteurs en brins

Pour une ligne en faisceau, on remplace dans l'équation 4.5.9, r' par GMR' , avec :

$$GMR' = \sqrt{GMR_0' \times d} \text{ , pour un faisceau de 2 conducteurs par phase.}$$

$$GMR' = \sqrt[3]{GMR_0' \times d^2} \text{ , pour un faisceau de 3 conducteurs par phase.}$$

$$GMR' = \left(\sqrt[4]{GMR_0' \times d^3} \right) \times 1,091 \text{ , pour un faisceau de 4 conducteurs par phase.}$$

$$GMR_0' = 0,7788 \times GMR_0$$

GMR_0 représente le rayon géométrique moyen d'un seul conducteur.

Pour une ligne triphasée avec les 3 phases inégalement espacées et complètement transposées, on remplace également dans l'équation 4.5.9, D par GMD .

GMD représente la distance géométrique moyenne défini par :

$$GMD = \sqrt[3]{D_{ab}D_{bc}D_{ac}}$$

L'inductance par phase de la ligne triphasée devient :

$$L_a = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{GMD}{GMR'} \text{ en H/m}$$

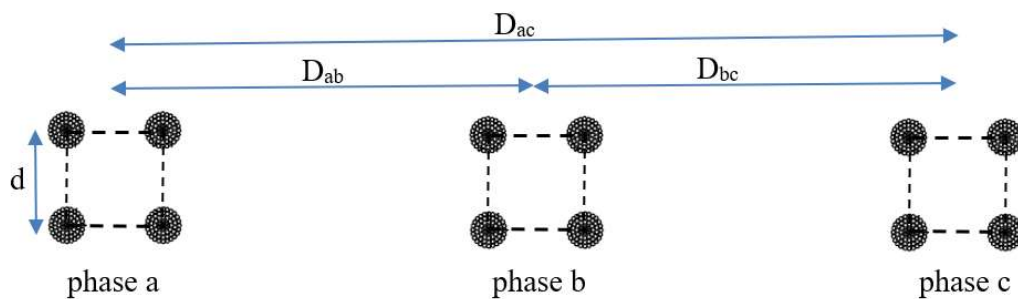


Figure: Ligne triphasée en faisceau avec par phase 4 conducteurs en brins

Capacité d'une ligne

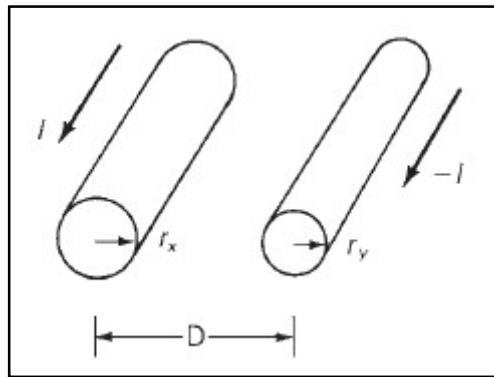
Les charges superficielles uniformément réparties sur le conducteur de la ligne créent un champ électrique radial et un courant capacitif. Les lignes de champs électriques sont perpendiculaires à l'axe du conducteur. Ce phénomène est représenté par la capacité linéique C de la ligne. Que le conducteur soit creux ou plein la capacité linéique est la même puisque les charges se localisent à la surface du conducteur.

Champ électrique d'un conducteur cylindrique est donné par l'expression :

$$E_x = \frac{q}{2\pi\epsilon x} \quad \text{V/m} \quad q = \text{Charge (C/m)}$$

where, for a conductor in free space, $\epsilon = \epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$.

Capacité d'une ligne monophasée à deux fils



$$V_{xy} = \frac{q}{\pi\epsilon} \ln \frac{D}{\sqrt{r_x r_y}} \quad \text{volts} \quad (4.9.2)$$

$$C_{xy} = \frac{q}{V_{xy}} = \frac{\pi\epsilon}{\ln \left(\frac{D}{\sqrt{r_x r_y}} \right)} \quad \text{F/m line-to-line} \quad (4.9.3)$$

$$V_{xy} = \frac{q}{\pi\epsilon} \ln \frac{D}{\sqrt{r_x r_y}} \quad \text{volts} \quad (4.9.2)$$

Lorsque les 2 rayons sont identiques $r_x = r_y = r$

$$C_{xy} = \frac{\pi\epsilon}{\ln(D/r)} \quad \text{F/m line-to-line} \quad (4.9.4)$$

Lorsque la ligne à deux fils est alimentée par un transformateur avec un point neutre au milieu, la tension ligne neutre vaut :

$$V_{xn} = V_{yn} = \frac{V_{xy}}{2} \quad (4.9.5)$$

Et la capacité ligne-neutre est donnée par :

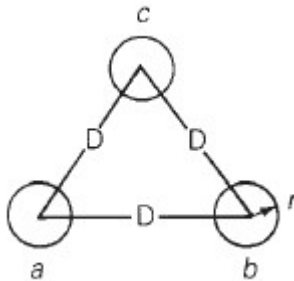
$$C_n = C_{xn} = C_{yn} = \frac{q}{V_{xn}} = 2C_{xy}$$

$$C_n = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(D/r)} \quad \text{F/m line-to-neutral} \quad (4.9.6)$$

Capacité d'une ligne triphasée

Capacité d'une ligne triphasée avec espacement égal entre phase

La figure montre les trois conducteurs d'une ligne de transport aérienne triphasée portant des charges uniformément réparties. Les conducteurs sont équidistants l'un de l'autre comme le montre la figure.



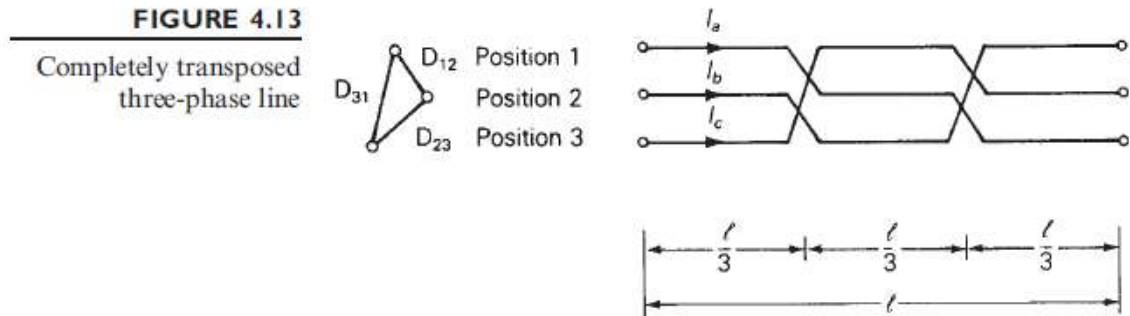
$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[q_a \ln \frac{D}{r} + q_b \ln \frac{r}{D} \right] \quad \text{volts} \quad (4.9.8)$$

$$V_{ac} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[q_a \ln \frac{D}{r} + q_c \ln \frac{r}{D} \right] \quad \text{volts} \quad (4.9.9)$$

$$V_{an} = \frac{1}{2\pi\epsilon} q_a \ln \frac{D}{r} \quad \text{volts} \quad (4.9.14)$$

$$C_{an} = \frac{q_a}{V_{an}} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{D}{r}\right)} \quad \text{F/m line-to-neutral} \quad (4.9.15)$$

Capacité d'une ligne triphasée où les phases sont inégalement espacées



Lorsque ces lignes sont complètement transposées la capacité entre une phase et le neutre est donnée par :

$$C_{an} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(D_{eq}/r)} \quad \text{F/m} \quad (4.10.1)$$

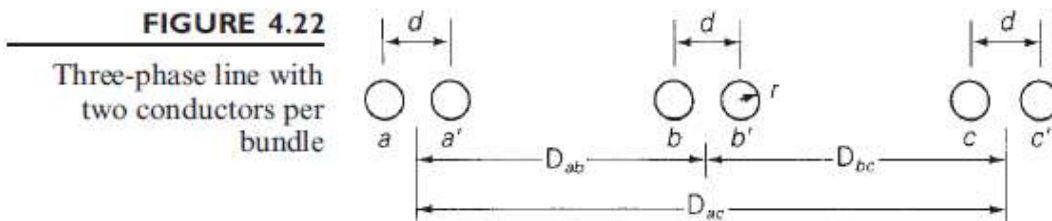
Avec

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{ab}D_{bc}D_{ac}} \quad (4.10.2)$$

D_{eq} représente la distance géométrique moyenne (GMD)

On trouve les tensions entre phase V_{ab} , V_{ac} , en remplaçant D par D_{eq} dans les équations 4.9.8. et 4.9.9.

Capacité des conducteurs en faisceaux



La figure 4.22 montre une ligne triphasée avec deux conducteurs en faisceaux pour chaque phase et la figure 4.14 montre trois différents types de configuration de conducteurs en faisceaux utilisés dans les lignes de transport.



La tension entre deux phases (~~tension ligne-ligne~~) est donnée par l'expression :

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[q_a \ln \frac{D_{ab}}{\sqrt{rd}} + q_b \ln \frac{\sqrt{rd}}{D_{ab}} + q_c \ln \frac{D_{bc}}{D_{ac}} \right] \quad (4.10.3)$$

Lorsque la ligne est parfaitement transposée, la tension ~~ligne-neutre~~ est donnée par :

$$V_{an} = \frac{1}{2\pi\epsilon} q_a \ln(D_{eq}/D_{SC}) \quad \text{volts}$$

On en déduit la capacité entre une phase et le neutre :

$$C_{an} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(D_{eq}/D_{SC})} \quad \text{F/m} \quad (4.10.4)$$

$$D_{SC} = \sqrt{rd} \quad \text{Pour deux conducteurs en faisceau (F1)} \quad (4.10.5)$$

$$D_{SC} = \sqrt[3]{rd^2} \quad \text{Pour trois conducteurs en faisceau (F2)} \quad (4.10.6)$$

$$D_{SC} = 1.091 \sqrt[4]{rd^3} \quad \text{Pour quatre conducteurs en faisceau F(3)} \quad (4.10.7)$$

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{ab}D_{bc}D_{ac}} \quad (4.10.2)$$

~~**D_{eq} représente la distance géométrique moyenne (GMD)**~~

~~**D_{SC} représente le rayon géométrique moyen du faisceau (GMR)**~~

Champ électrique à un point distant de x de l'axe central du conducteur.

$$E_x = \frac{q}{2\pi\epsilon x} \quad \text{en V/m, avec } \epsilon = \epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

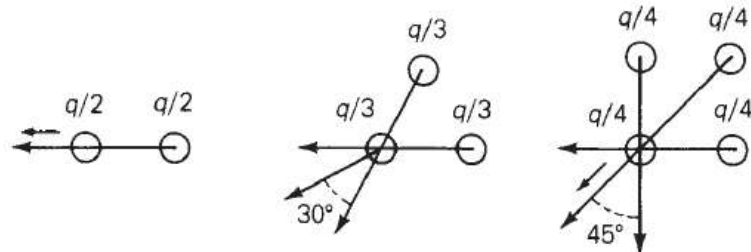
À la surface du conducteur $x=r$

$$E_r = \frac{q}{2\pi\epsilon r} \quad \text{en V/m,}$$

Champ électrique à la surface d'un conducteur d'une ligne en faisceau

FIGURE 4.26

Vector addition of electric fields at the surface of one conductor in a bundle



On considère que chaque phase est constituée de conducteurs en faisceau. Soit d l'espacement entre 2 conducteurs et r le rayon d'un conducteur.

Pour un faisceau à 2 conducteurs :

$$E_{\max} = \frac{q/2}{2\pi\epsilon r} + \frac{q/2}{2\pi\epsilon d} = \frac{q/2}{2\pi\epsilon r} \left(1 + \frac{r}{d}\right)$$

Pour un faisceau à 3 conducteurs :

$$E_{\max} = \frac{q/3}{2\pi\epsilon} \left(\frac{1}{r} + \frac{2 \cos 30^\circ}{d}\right)$$

Pour un faisceau à 4 conducteurs :

$$E_{\max} = \frac{q/4}{2\pi\epsilon} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{d\sqrt{2}} + \frac{2 \cos 45^\circ}{d}\right)$$

$$Q = C \times n \times V \times n$$

Lorsque les conducteurs sont en brins, on remplace r par GMR_0 , GMR_0 étant le rayon géométrique moyen **d'un seul conducteur**.

Source: « Power System Analysis and Design », 6e Edition, SI Edition, J. Duncan Glover, Thomas Overbye, Mulukutla Sarma.

II – Production de l'énergie électrique

LIRE LES SECTIONS SUIVANTES: (Facultatif)

- Section 45.1 : Appel de puissance d'un réseau. pp. 983-984 (réf.1)
- Section 45.4 : Commande de la puissance et de la fréquence - cas d'une centrale isolée. pp. 985-986 (réf.1)
- Section 45.5 : Commande de la puissance et de la fréquence - cas de plusieurs centrales reliées. pp. 985-987 (réf.1)
- Section 45.6 : Conditions lors d'une panne. pp. 987-988 (réf.1)

Centrales hydrauliques

- Section 45.8 : Puissance disponible. pp. 989 (réf.1)
- Section 45.9 : Type de centrales hydrauliques. pp. 989-990 (réf.1)
- Section 45.10 : Parties principales d'une centrale hydraulique. pp. 991-992 (réf.1)
- Section 45.11 : Centrales à réserve pompée. pp. 992-994 (réf.1)

Parcs éoliennes

- Section 45.30 : Propriété du vent. pp. 1007-1009 (réf.1)
- Section 45.31 : Technologie de production d'électricité à partir de l'énergie éolienne. pp. 1009 (réf.1)
- Section 45.32 : Turbine éolienne entraînant une génératrice à c.c. pp. 1009 (réf.1)
- Section 45.33 : Turbine éolienne entraînant une génératrice asynchrone à vitesse constante. pp. 1009-1010 (réf.1)
- Section 45.34 : Turbine éolienne entraînant une génératrice asynchrone à vitesse variable. pp. 1010-1011 (réf.1)
- Section 45.35 : Turbine éolienne entraînant une génératrice asynchrone à double alimentation. pp. 1011-1012 (réf.1)
- Section 45.36 : Turbine éolienne et génératrice à aimants permanents à couplage direct. pp. 1012-1013 (réf.1)

III – Transport de l'énergie électrique

LIRE LES SECTIONS SUIVANTES (avant procédural 1):

- Section 46.1 : Organisation d'un réseau de transport d'énergie. pp. 1026-1027 (réf.1)
- Section 46.2 : Type de lignes. pp. 1027-1028 (réf.1)
- Section 46.3 : Tensions normalisées. pp. 1028 (réf.1)
- Section 46.4 : Composants d'une ligne. pp. 1028-1030 (réf.1)
- Section 46.7 : Effet couronne. pp. 1031 (réf.1)
- Section 46.11 : Circuit équivalent d'une ligne. pp. 1032-1033 (réf.1)
- Section 5.1 : Medium and short line approximations. pp. 258-265 (réf.2)

- Section 5.2 : Transmission-line differential equations. pp. 265-271 (réf.2)
- Section 5.3 : Equivalent pi circuit. pp. 271-273 (réf.2)
- Section 5.4 : Lossless lines. pp. 274-281 (réf.2)
- Section 5.5: Maximum Power flow. pp.282-284 (réf.2)
- Section 5.6: Line loadability. pp. 284-287 (réf.2)
- Section 5.7: Reactive compensation techniques. pp. 289-292 (réf. 2)
- Section 46.12 : Simplification du circuit équivalent. pp. 1033-1034 (réf.1)
- Section 46.13 : Valeurs des impédances de ligne. Pp. 1034-1035 (réf.1)
- Section 46.14 : Variation de la tension et puissance maximale transportable. pp. 1035 (réf.1)
- Section 46.16 : Ligne inductive. pp. 1036-1037 (réf.1)
- Section 46.17 : Ligne inductive avec compensation. pp. 1037-1038 (réf.1)
- Section 46.18 : Ligne inductive reliant deux réseaux. pp. 1038-1309 (réf.1)
- Section 46.21 : Méthodes pour augmenter la puissance transportable. pp. 1041-1043 (réf.1)
- Section 46.22 : Transport de l'énergie à très haute tension. Pp. 1044-1046 (réf.1)

IV – Distribution de l'énergie électrique

LIRE LES SECTIONS SUIVANTES: (Facultatif)

- Section 47.1 : Appareillage d'un poste de transformation. pp. 1053 (réf.1)
- Section 47.2 : Disjoncteurs. pp. 1053-1056 (réf.1)
- Section 47.4 : Sectionneurs. pp. 1059 (réf.1)
- Section 47.5 : Sectionneurs de mise à la terre. pp. 1059 (réf.1)
- Section 47.6 : Parafoudres. pp. 1059-1062 (réf.1)
- Section 47.7 : Réactance d'artère et transformateur de mise à la terre. pp. 1062-1064 (réf.1)
- Section 47.8 : Exemple de poste de transformation. pp. 1064-1067 (réf.1)
- Section 47.9 : Exemple de distribution MT. pp. 1067-1068 (réf.1)
- Section 47.10 : Réseau souterrain de centre-ville. pp. 1068 (réf.1)
- Section 47.11 : Exemple de distribution BT. pp. 1068-1069 (réf.1)

Ligne de distribution MT

- Section 47.12 : Coordination de la protection. pp. 1069-1070 (réf.1)
- Section 47.13 : Coupe circuit à expulsion dirigée. pp. 1070 (réf.1)
- Section 47.14 : Disjoncteur à réenclenchement automatique pp. 1071 (réf.1)
- Section 47.15 : Autosectionneur. pp. 1071 (réf.1)
- Section 47.16 : Résumé de la protection MT. pp. 1072 (réf.1)

PREMIÈRE SEMAINE avant procédural 2

V – Calcul des défauts équilibrés

LIRE LES SECTIONS SUIVANTES (avant procédural 2):

- Section 7.1 : Serie R-L circuit transients. pp. 435-438 (réf.2)
- Section 7.2 : Three-phase short circuit unloaded synchronous machine. pp. 438-442 (réf.2)
- Section 7.3 : Power system three-phase short circuits. pp. 442-444 (réf.2)

VI – Composantes symétriques

LIRE LES SECTIONS SUIVANTES (avant procédural 2):

- Section 8.1 : Definition of symmetricals components pp. 493-499 (réf.2)
- Section 8.2 : Sequence networks of impedance loads pp. 499-506 (réf.2)
- Section 8.3 : Sequence networks of series impedances pp. 506-508 (réf.2)
- Section 8.4 : Sequence networks of three phase lines pp. 508-510 (réf.2)
- Section 8.5 : Sequence networks of rotating machines pp. 510-516 (réf.2)

VII – Calcul des défauts déséquilibrés

LIRE LES SECTIONS SUIVANTES (avant procédural 2):

- Section 9.1 : System representation. pp. 547-552 (réf.2)
- Section 9.2 : Single line-to-ground fault. pp. 553-557 (réf.2)
- Section 9.3 : Single line-to-line fault. pp. 557-559 (réf.2)
- Section 9.4: Line-to-line to ground-fault. pp. 560-564 (réf.2)

5- Activités liées à la problématique

- Première semaine

- Première rencontre de tutorat (**obligatoire**).
- Étude personnelle (**obligatoire**).
- Formation à la pratique procédurale 1 (recommandée).
- Travaux pratiques en laboratoire (**obligatoire**). Objectif à atteindre : annexe 5. Comportement des machines à courant alternatif fonctionnant en génératrice.
- Formation à la pratique procédurale 2 (recommandée).

LABORATOIRES :

- La présence aux laboratoires C1-2055 est obligatoire. Les présences seront prises rigoureusement;
- Le laboratoire d'électrotechnique comporte des éléments de sécurité importants. De ce fait, des consignes de sécurité seront données au début des laboratoires. Par conséquent, la ponctualité est requise.

- Deuxième et troisième semaine

- **Validation** de la résolution de la problématique le vendredi 28 juillet (**obligatoire**). Objectif à atteindre : toute la partie simulation et calculs demandée dans les mandats 1, 2, 3, 4, de la problématique. Une partie des points alloués au rapport d'APP (soit **30 points**) sera attribuée à la validation.
- Deuxième rencontre de tutorat (**obligatoire**).
- Rédaction finale du rapport d'APP décrivant les étapes suivies pour résoudre la problématique (remise en format électronique le samedi 29 juillet avant 23h59, **obligatoire**).
- Compte rendu de laboratoire comportant tous les résultats demandés dans l'annexe 5, (remise en format électronique le mercredi 26 juillet avant 23h59, **obligatoire**).
- Étude personnelle.
- Évaluation formative.
- Rencontre de consultation.
- Évaluation sommative.

6- Livrables

À remettre : au format électronique

Le compte rendu de laboratoire

Quand : La deuxième (2^e) semaine : **mercredi 26 juillet**

Heure limite: **avant 23h59**

Lieu : Sur le site de S3elec.

Rapport d'APP

Quand : La deuxième (2^e) semaine : **samedi 29 juillet**

Heure limite: **avant 23h59**

Lieu : Sur le site de S3elec.

Le rapport d'APP doit décrire les étapes suivies pour répondre aux questions contenues dans la problématique (avec toutes les démarches de calculs théoriques appuyant l'analyse des résultats obtenus en simulation). Le rapport d'APP doit avoir une dizaine de pages et ne doit dépasser 15 pages. Le rapport doit être bien présenté; pour cela, tout doit être écrit avec Word ainsi que les grandes lignes des étapes de calculs qui permettent au correcteur de suivre clairement vos démarches de calculs afin de les évaluer. **Un rapport brouillon sera pénalisé.**

A) Le rapport d'APP (15 pages maximum) doit inclure :

1. Une introduction incluant la mise en contexte. (5 points)
2. Une description du cahier des charges et des contraintes (contenant les procédures mis en œuvre pour la résolution **de la problématique**). (5 points)
3. Les résultats des points exigés dans la problématique avec tous les calculs menant aux résultats s'il y a lieu. (72 points problématique + 30 points validation)
4. Une conclusion (3 points)

B) Le compte rendu de laboratoire (4 pages maximum) doit inclure :

Tous les résultats obtenus en laboratoire et les réponses aux questions demandées dans l'annexe 5. (20 points)

7- Formation à la pratique procédurale - 1

Buts de l'activité

- Calcul de paramètres de ligne de transport.
- Calcul de l'intensité du champ électrique à la surface des conducteurs d'une ligne de transport.
- Analyse de l'influence de la puissance réactive sur la variation de tension d'une ligne.
- Analyse de l'influence de la puissance active transportée sur la stabilité de la ligne.
- Calcul de régulation de tension de la ligne.
- Calcul de l'impédance total et de l'admittance totale d'une ligne.
- Utilisation du modèle en pi nominal d'une ligne.
- Calcul de tension de ligne haute tension sans charge.
- Compensation shunt d'une ligne faiblement chargée.
- Calcul de puissance maximale transportable.
- Compensation shunt et série.
- Effet de la compensation série sur la régulation de tension.

Énoncés des problèmes à résoudre

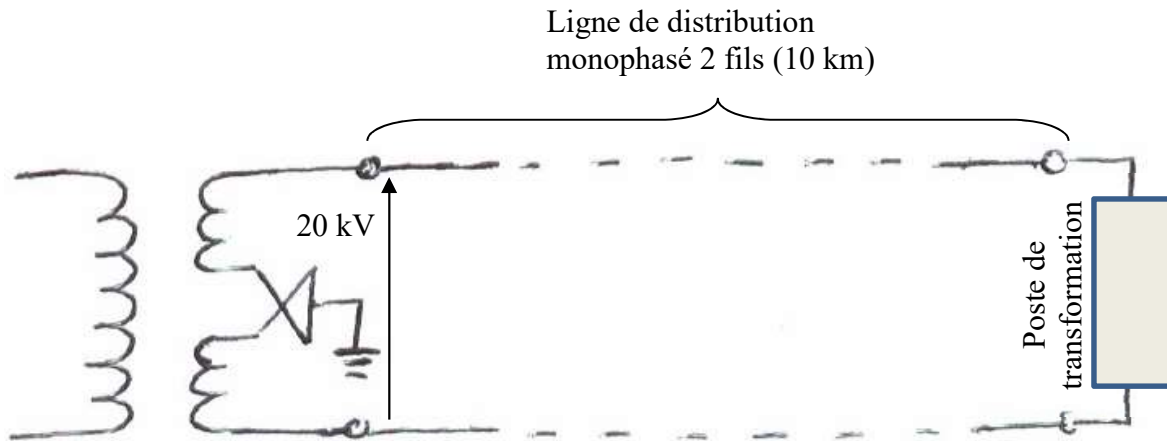
Problème n° 1 (chapitre 4 de Power system)

Une ligne de distribution électrique aérienne monophasée 2 fils, 20 kV entre fils, 60 Hz est formée de conducteurs en cuivre plein de diamètre 1,5 cm. Les fils sont espacés de 50 cm.

Lorsque la ligne est alimentée par un transformateur à secondaire double avec neutre relié à la terre,

- Calculer l'inductance totales de la ligne monophasé en mH/km.
- Calculer la capacité entre phase et neutre de la ligne en F/km si on néglige l'effet de la surface de la terre sur la capacité.
- Calculer le champ électrique maximal à la surface des conducteurs en kV/cm.
- Calculer la puissance réactive consommée par la ligne lorsqu'elle transporte une puissance apparente de 2 MVA vers un poste de transformation située à une distance de 10 km du départ de la ligne.

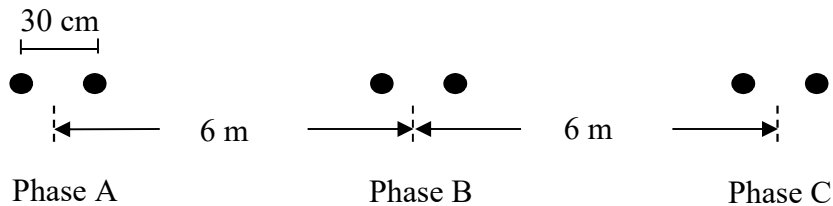
e) Calculer le diamètre des conducteurs que l'on doit choisir si on veut réduire de 20 % la puissance réactive consommée par les 10 km de la ligne tout en gardant l'espacement entre conducteurs de 50 cm.



Problème n° 2 (chapitre 4 de Power system)

La figure ci-dessous montre la configuration d'une ligne triphasée 250 kV, 60 Hz complètement transposée. La ligne est formée de deux faisceaux par phase. Chaque conducteur en brin de type ACSR a un rayon géométrique moyen GMR_0 de 0,74 cm et les conducteurs de chaque faisceau sont espacés de 30 cm.

- Déterminer l'inductance par phase en mH/km de la ligne.
- Déterminer la capacité équivalente entre phase et neutre de la ligne en nF/km.



Problème n° 3 (chapitre 5 de Power system)

Une ligne de transport aérienne triphasée 230 kV de type ACSR, 60 Hz, 400 km, a en séquence directe, une impédance série par phase égale à $0,08 + j0,48$ en Ω/km et une admittance shunt par phase de $3,33 \cdot 10^{-6} j$ en S/km . Cette ligne alimente sous une tension de 230 kV ligne-ligne une charge triphasée qui consomme une puissance totale de 200 MVA avec un $F_p=1$. En se servant du modèle en pi nominal de la ligne (ligne moyenne distance), déterminer :

- l'impédance série totale par phase de la ligne,

2. l'impédance parallèle totale par phase de la ligne,
3. l'impédance caractéristique de la ligne et le SIL (« *Surge Impedance Loading* »)
4. la tension ligne-ligne et le courant de ligne à l'entrée de la ligne.
5. La variation de tension en %
6. La régulation de tension de la ligne en %.

Problème n° 4 (chapitre 5 de Power system)

Une ligne de transport triphasée 500 kV, 60 Hz, de longueur 300 km, non compensée, a en séquence directe par phase, une inductance série $L = 0,97$ mH/km et une capacité shunt $C = 0,0115$ μ F/km. Cette ligne alimente une charge 1000 MVA avec un facteur de puissance $FP=0,8$ en retard. On considère la ligne sans perte. On utilisera le modèle en pi nominal.

- 1) Déterminer en MVar, la valeur de la **capacité de compensation shunt** qu'il faut installer à l'extrémité côté charge de la ligne pour garder la tension au borne de la charge égale à 500 kV ligne-ligne lorsque la tension appliquée à l'entrée de la ligne est de 500 kV ligne-ligne.
- 2) Donner la valeur de la capacité shunt requise en μ F.
- 3) Lorsque la ligne se retrouve sans charge, quelle **inductance de compensation shunt** doit-on installer à la sortie de la ligne pour garder la tension d'entrée de ligne égale à la tension de sortie de ligne soit 500 kV ligne-ligne.

Problème n° 5 (chapitre 5 de Power system)

Soit une ligne de transport aérienne triphasée 60 Hz non compensée, de tension nominale 500 kV, de longueur 250 km. Son impédance série en séquence directe est $z = 0,03 + j0,35$ en Ω /km et son admittance shunt en séquence directe est $y = j4,4 \cdot 10^{-6}$ en S/km.

À pleine charge, la ligne fournit une puissance totale de 900 MW sous une tension $V_R = 0,95$ pu avec un facteur de puissance de 1. En vous servant du modèle de ligne moyenne distance (modèle en pi nominal),

1. Calculer la tension V_S et le courant I_S à l'entrée de la ligne.
2. On suppose que la tension calculée précédemment est toujours appliquées à l'entrée de la ligne pendant qu'on enlève la charge. Calculer dans ce cas, la nouvelle valeur de V_R en kV ligne-neutre et en pu.
3. En négligeant les pertes de la ligne :
 - 3.1 Calculer la puissance totale en W que la ligne doit transporter si on veut que V_R soit égale à $V_S = 1$ pu.
 - 3.2 En supposant que $V_S = 1$ pu et $V_R = 0,95$ pu, calculer la puissance maximale théorique que la ligne peut transporter.

3.3 Toujours en supposant que $V_S = 1$ pu et $V_R = 0,95$ pu et que pour la stabilité du réseau, l'angle de déphasage entre V_S et V_R est limité à 35° , calculer la puissance maximale que la ligne peut transporter (limite pratique).

Problème n° 6 (chapitre 5 de Power system)

Une ligne de transport triphasée 500 km, 60 Hz, non compensée dont l'impédance série en séquence directe est $z = 0,3j$ (Ω/km) et son admittance shunt en séquence directe vaut $y = j4,0 \cdot 10^{-6}$ (S/km). On installe des condensateurs série à la fin de la ligne, pour un taux de compensation de 30 % au total. Cette ligne compensée fournit 1200 MVA à une charge sous une tension ligne-ligne de 480 kV avec un facteur de puissance égale à 1.

1. Donner en MVAR la valeur du compensateur série que l'on doit installer par phase à l'extrémité de la ligne.
2. En utilisant la matrice de transfert de la ligne compensée, calculer la tension V_S en début de la ligne compensée et la variation de tension.

8- Formation à la pratique procédurale - 2

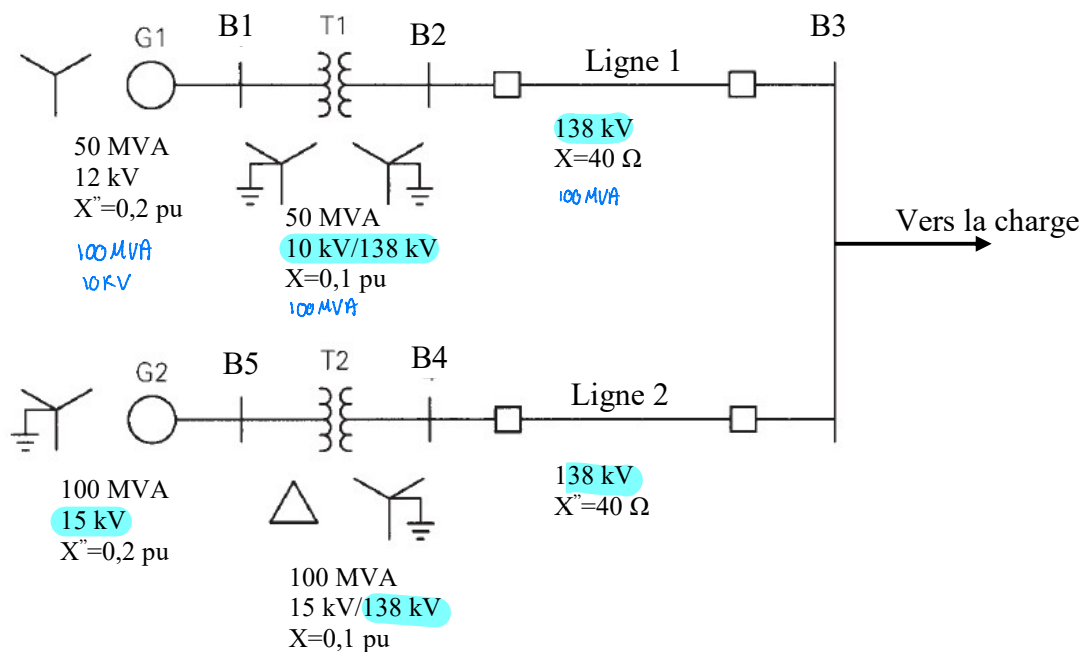
Buts de l'activité

- Calcul des courants de court-circuit symétrique dans un réseau triphasé (court-circuit équilibré).
- Calcul de courant de court-circuit asymétrique dans un réseau triphasé (court-circuit équilibré).
- Choix du calibre de disjoncteur de protection contre le court-circuit.
- Calcul de courants et tensions dans un circuit triphasé déséquilibré.
- Composantes symétriques des tensions, courants et impédances.
- Application des composantes symétriques pour le calcul de courant de court-circuit asymétrique : Court-circuit biphase - terre, court-circuit monophasé phase-terre.
- Schéma équivalent en pu d'un réseau triphasé à partir de son schéma unifilaire.
- Procédures pour limiter le courant de court-circuit.

Énoncés des problèmes à résoudre

Problème n°1 (chapitre 7 de Power system : Court-circuit équilibré)

Un réseau triphasé est représenté par le schéma unifilaire suivant :



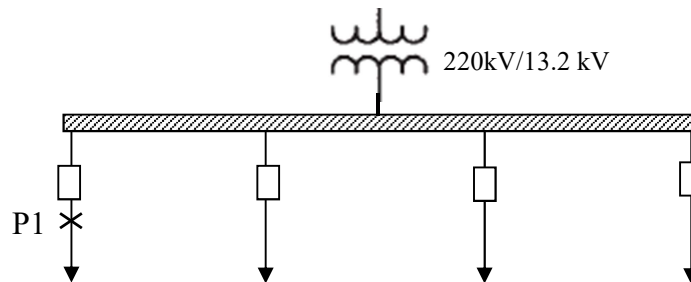
Un court-circuit franc des 3 phases avec la terre survient au point B5. Pour le calcul de courant de court-circuit, on considérera qu'avant le court-circuit, la tension au point B5 est de 15 kV. On négligera le courant demandé par la charge avant le défaut.

- Dessinez le diagramme des réactances du réseau en pu en prenant comme base les valeurs nominales du générateur G2 : puissance de base 100 MVA et tension de base de 15 kV. (Se référer à l'exemple 3.4 du livre Power System).
- Déterminez l'équivalent de Thévenin de l'ensemble du réseau au point de défaut en fournissant Z_{th} et V_{th} .
- Calculez le courant de court-circuit « sub-transitoire » en pu et en kA valeur RMS.
- Quelle est la contribution venant du côté du générateur G2 et celle venant du côté du transformateur T2 dans le courant de court-circuit.

Reprendre l'exercice en supposant que le court-circuit survient au point B4 lorsque la tension à ce point avant le défaut est de 138 kV. (*Hors séance de procédural*)

Problème n° 2 (chapitre 7 de Power system : Court-circuit équilibré)

Dans un poste de distribution, un transformateur 220kV/13.2 kV, 60 Hz, triphasé Yy avec neutres reliés à la terre, d'impédance interne par phase vue du secondaire $(0.05+j1.5) \Omega$, de puissance nominale 4570 kVA est raccordée à une barre omnibus qui alimente 4 artères pour la répartition équitable de l'énergie sur le réseau de distribution.



- Quelle doit être la valeur minimale du courant nominal des disjoncteurs installés sur chaque artère.
- Lorsqu'un court-circuit triphasé équilibré survient au point P1 de l'artère 1, en négligeant l'impédance de la barre omnibus, calculer la valeur RMS du courant symétrique et la valeur RMS maximale du courant asymétrique de court-circuit 30 ms après l'apparition du court-circuit.
- En prenant comme instant initial, le moment où la tension du primaire du transformateur passe par zéro tout juste avant le court-circuit, donner l'instant d'apparition du court-circuit qui permet d'avoir le courant asymétrique maximal.

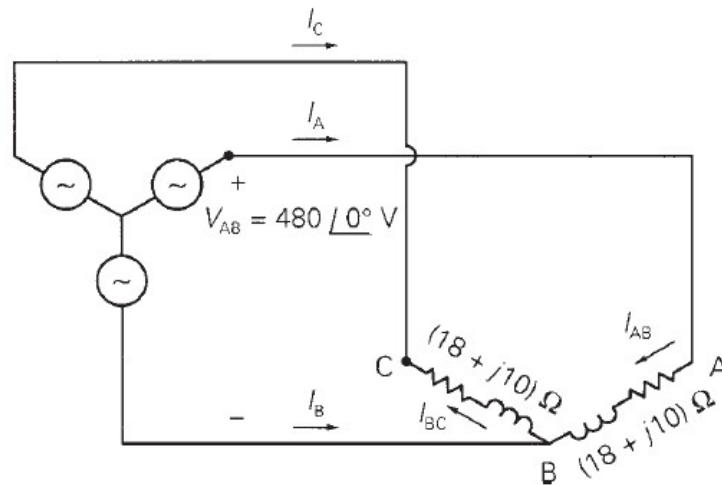
4- Dans le cas d'un court-circuit symétrique, sachant que les artères sont équipées d'un disjoncteur ayant un pouvoir de rupture de 2000 A, quelle valeur d'inductance doit-on installer sur chaque artère afin de limiter le courant de court-circuit des artères à la valeur de courant de rupture des disjoncteurs.

Problème n°3 (chapitre 8 de Power system)

Une source triphasée équilibrée de séquence directe $V_{AB} = 480 \angle 0^\circ$ V ligne-ligne alimente une charge triphasée équilibrée montée en triangle et d'impédance $(18 + j10) \Omega$ par phase.

Lorsque survient une rupture de la phase AC de la charge (voir figure) :

- 1- Déterminer les courants de ligne I_A , I_B et I_C qui alimentent la charge.
- 2- Donner les composantes symétriques des courants de ligne.



Problème n° 4 (chapitre 9 de Power system : voir exemple 9.3 pour se préparer)

Un alternateur triphasé 20 MVA, 13,8 kV ligne-ligne couplé en étoile a son neutre relié à la terre. On donne ces réactances en composantes symétriques : $X_0 = 0,05$ pu, $X_d = 0,25$ pu; et $X_i = 0,15$ pu.

Quelle réactance doit-on placer au neutre du générateur pour limiter le courant de défaut monophasé ligne-terre à 4 pu.

Problème n° 5 (chapitre 9 de Power system : voir exemple 9.1 pour se préparer)

L'alternateur d'une centrale de production hydraulique alimente une ligne moyenne tension qui permet d'acheminer l'énergie produite par la centrale vers un poste de

transformation situé à 600 m de la centrale. L'alternateur 100 MVA génère une tension triphasée équilibrée de 13,8 kV ligne-ligne. Les stators de l'alternateur sont connectés en étoile avec neutre solidement relié à la terre. On donne les composantes symétriques de l'alternateur : $X_0=0,05$ pu, $X_i=0,17$ pu et $X_d=X''=0,15$ pu.

A l'entrée du poste de transformation, un court-circuit biphasé franc se produit entre la phase b et la phase c de la ligne et la terre. L'impédance linéique de la ligne est $Z_{\text{ligne}}=0,00006+0,00036j$ en Ω/m .

Note :

On négligera la résistance de la ligne.

On considère que la ligne est parfaitement symétrique ce qui impose $Z_i = Z_d = Z_{\text{ligne}}$.

On négligera également l'impédance mutuelle de la ligne.

- 1- Faites les schémas monophasés équivalents en composantes symétriques du système.
- 2- Déterminez les équations (de boucles et de nœuds) qui décrivent le défaut en fonction des composantes symétriques des tensions et courants.
- 3- Calculez les valeurs des composantes symétriques en courant I_0 , I_i , I_d au point de défaut.
- 4- En déduire les courants de ligne réels I_a , I_b , I_c et le courant de court-circuit vers la terre.

9 - Évaluation

Les évaluations sommatives et finales porteront sur tous les objectifs d'apprentissage de l'unité. L'évaluation sommative se fera à livres fermés, avec comme seule documentation possible, un résumé écrit à la main de 2 pages maximum (feuille de formule manuscrite), les photocopies sont interdites. La feuille de note ne doit contenir aucun schéma électrique.

La présence aux laboratoires C1-2055 est obligatoire. Les présences seront prises rigoureusement. Une sanction de **25** points par absence sera appliquée sur la note individuelle du rapport d'APP.

La note attribuée aux activités pédagogiques de l'unité est une note individuelle. L'évaluation portera sur les compétences figurant dans la description des activités pédagogiques. Ces compétences, ainsi que la pondération de chacune d'entre elles dans l'évaluation de cette unité, sont :

Activités et éléments de compétence		Qualités	Rapport Problématique Laboratoire et validation	Examen sommatif	Examen final	Total par qualité	Total par compétence
GEL-335 : Production Transport et Distribution d'Énergie Électrique							
1	Analyser le fonctionnement d'un réseau de transport et de distribution de l'énergie électrique	Q01	26	99	75	200	450
		Q02	27	100	75	202	
		Q05	48			48	
2	Modéliser une ligne de transport de l'énergie électrique	Q01	12	38	20	70	150
		Q02	12	38	20	70	
		Q05	10			10	
Total : GEL335			135	275	190		600

Comme indiqué à la section 1, l'activité GEL 335 comprend 2 éléments de compétences qui sont désignés par 1 et 2. Il y a 2 livrables, a) rapport de la problématique incluant les résultats de laboratoire et b) la validation.

Les qualités et critères du BCAPG concernant cet APP :

- Qualité 1 (Q1) connaissances en génie.
 - Qualité 01 (Q1_2) connaissances dans le champ de l'analyse de problèmes en lien avec les lignes de transport et de distribution d'énergie électrique ;
 - Qualité 01 (Q1_5) connaissance dans le champ de l'utilisation d'outils d'ingénierie en lien avec les lignes de transport électrique ;
- Qualité 2 (Q2) analyse de problèmes.
 - Qualité 02 (Q2_1) analyse des problèmes de court-circuit sur un réseau de transport et distribution d'énergie électrique ; analyse des problèmes d'optimisation d'une ligne de transport électrique; analyse les paramètres d'une ligne de transport et de distribution de l'énergie électrique.
 - Qualité 02 (Q2_3) énoncer les objectifs à atteindre pour résoudre le problème d'optimisation de ligne de transport électrique ; énoncer les objectifs à atteindre pour le choix des disjoncteurs de protection contre le court-circuit.
 - Qualité 02 (Q2_5) mettre en œuvre la solution retenue pour optimiser la ligne de transport électrique ; mettre en œuvre les procédures requises pour le calcul de courant de court-circuit.
 - Qualité 02 (Q2_6) analyser et interpréter les résultats obtenus pour justifier le choix des éléments d'optimisation de la ligne de transport électrique ; analyser et interpréter les résultats obtenus pour justifier le choix des calibres des éléments de protection du réseau contre le court-circuit.
- Qualité 5 (Q5) utilisation d'outils d'ingénierie.
 - Qualité 05 (Q5_1) sélectionner les techniques, ressources et outils appropriés pour réaliser et analyser un réseau de transport et de distribution d'énergie électrique ;
 - Qualité 05 (Q5_2) utiliser les techniques, ressources et outils sélectionnés selon les protocoles établis dans le domaine de réseau de transport et de distribution d'énergie électrique ;
 - Qualité 05 (Q5_3) connaître les limites des techniques, ressources et outils sélectionnés dans le domaine des lignes de transport et de distribution d'énergie électrique ;

9.1- Rapport de la problématique

Q1 : Critère 5. Connaissances dans le champ de l'analyse de problèmes en lien avec les lignes de transport et de distribution d'énergie électrique.	20 pts
...utilise des connaissances dans le champ permettant une bonne utilisation des outils d'ingénierie.	100%
...utilise correctement ses connaissances dans le champ pour adapter les outils d'ingénierie à des problèmes complexes, mais qui sont analogues à des problèmes déjà vu.	85%
... utilise correctement ses connaissances dans le champ pour adapter les outils d'ingénierie à des problèmes simples, mais qui sont nouveaux pour lui.	60%
... n'utilise que les connaissances dans le champ pour adapter les outils d'ingénierie pour résoudre des problèmes simples.	25%

Q2 : Critère 6. Analyser et interpréter les résultats obtenus pour justifier le choix des éléments d'optimisation de la ligne de transport électrique ; analyser et interpréter les résultats obtenus pour justifier le choix des calibres des éléments de protection du réseau électrique contre le court-circuit.	50 pts
... analyse et interprète les résultats obtenus au regard des hypothèses et objectifs préalablement définis et d'autres références théoriques pertinentes.	100%
... analyse et interprète les résultats obtenus au regard des hypothèses et objectifs préalablement définis.	85%
... analyse et interprète partiellement les résultats obtenus.	60%
... n'est pas en mesure d'analyser et d'interpréter les résultats obtenus, mais est capable d'expliquer pourquoi.	25%

Q5 : Critère 3. Connaître les limites des techniques, ressources et outils sélectionnés dans le domaine des lignes de transport et de distribution d'énergie électrique.	45 pts
... connaît les limites des techniques, ressources et outils sélectionnés. Adapte ces techniques, ressources et outils, les combine à d'autres ou en crée pour pallier leurs limites.	100%
... connaît les limites des techniques, ressources et outils sélectionnés. Adapte ces techniques, ressources et outils ou les combine à d'autres pour pallier leurs limites.	85%
... connaît partiellement les limites des techniques, ressources et outils sélectionnés.	60%
... ne connaît pas les limites des techniques, ressources et outils sélectionnés, mais sait qu'il en existe.	25%

9.2- Rapport de Laboratoire

Q2 : Critère 5. Mettre en œuvre la solution retenue pour l'application de machines électriques à courant alternatif dans la production de l'énergie électrique.	15 pts
... met en œuvre la solution retenue en se référant aux connaissances et aux principes d'ingénierie nécessaires pour ce faire et en tenant compte de plusieurs autres principes pertinents	100%
... met en œuvre la solution retenue en se référant à la plupart des connaissances et des principes d'ingénierie nécessaires pour ce faire et en tenant compte de quelques autres principes pertinents.	85%
... met en œuvre la solution retenue en se référant à quelques principes d'ingénierie nécessaires pour ce faire.	60%
... n'est pas en mesure de mettre en œuvre la solution retenue, mais est capable d'expliquer pourquoi.	25%

Q5 : Critère 1. Sélectionner les techniques, ressources et outils appropriés pour réaliser une tâche dans le domaine de production d'énergie électrique.	5 pts
... sélectionne les techniques, ressources et outils appropriés en pouvant justifier ses choix (en connaît la portée et les limites), de même qu'en pouvant inférer la nature du travail à accomplir ou les données à colliger.	100%
... sélectionne les techniques, ressources et outils appropriés en pouvant justifier ses choix (en connaît la portée et les limites).	85%
... sélectionne les techniques, ressources et outils appropriés, sans toutefois pouvoir justifier ses choix.	60%
... n'est pas en mesure de sélectionner les techniques, ressources et outils appropriés, mais en connaît pouvant être utilisés.	25%

9.3- Validation

Q5 : Critère 2. Utiliser les techniques, ressources et outils sélectionnés selon les protocoles établis dans le domaine de transport de l'énergie électrique	30 pts
... connaît les protocoles établis des techniques, ressources et outils sélectionnés et les respecte lors de leur utilisation. Démontre la capacité à optimiser cette utilisation dans le contexte de la tâche à accomplir.	100%
... connaît les protocoles établis des techniques, ressources et outils sélectionnés et les respecte lors de leur utilisation.	85%
... connaît les protocoles établis des techniques, ressources et outils sélectionnés, mais ne les respecte que partiellement lors de leur utilisation.	60%

... ne connaît pas les protocoles établis des techniques, ressources et outils sélectionnés, mais sait qu'il en existe.	25%
---	-----

9.4- Examens

Q1 : Critère 2. Connaissances dans le champ de l'analyse de problèmes en lien avec les réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique.	265 pts
... combine les connaissances de tous les sous-champs afin d'offrir une meilleure solution à la situation proposée.	100%
... utilise des connaissances de tous les sous-champs nécessaires à la résolution de la situation.	85%
... réfère à des connaissances de plusieurs sous-champs dans le champ, et ce, quelle que soit la situation.	60%
... n'utilise que les connaissances d'un sous-champ dans le champ précis, et ce, quelle que soit la situation.	25%
Q2 : Critère 3. Énoncer les objectifs à atteindre pour résoudre le problème en lien avec les réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique.	200 pts
... énonce des objectifs mesurables et réalisables en lien avec les hypothèses préalablement émises.	100%
... énonce des objectifs mesurables et réalisables.	85%
... énonce des objectifs partiellement mesurables et/ou réalisables	60%
... énonce des objectifs ni mesurables et/ou ni réalisables	25%

10- Utilisation des téléphones cellulaires, iPod et ordinateurs.

L'utilisation des téléphones cellulaires en mode vocal ou pour l'envoi de messages textes est interdite pendant les procédurax, les tutorats, les séminaires, les examens, les séances de résolution de problématique.

L'utilisation des iPod, iPhone et téléphones intelligents est interdite pendant les procédurax, les tutorats, les séminaires, les examens, les séances de résolution de problématique. Le port de casques d'écoutes ou d'écouteurs est interdit pendant ces activités.

L'utilisation des ordinateurs est autorisée uniquement pour la lecture de la problématique.

L'utilisation des ordinateurs est autorisée uniquement pour la consultation du guide de l'étudiant lors des procédurax.

L'utilisation des ordinateurs est interdite lors des examens et des séminaires, sans exception.

Le non-respect de ces consignes pourra entraîner des sanctions pouvant aller jusqu'à l'expulsion de l'activité d'apprentissage ou de l'activité d'évaluation.

10- Utilisation des téléphones cellulaires, iPod et ordinateurs.

L'utilisation des téléphones cellulaires en mode vocal ou pour l'envoi de messages textes est interdite pendant les procédurax, les tutorats, les séminaires, les examens, les séances de résolution de problématique.

L'utilisation des iPod, iPhone et téléphones intelligents est interdite pendant les procédurax, les tutorats, les séminaires, les examens, les séances de résolution de problématique. Le port de casques d'écoutes ou d'écouteurs est interdit pendant ces activités.

L'utilisation des ordinateurs est autorisée uniquement pour la lecture de la problématique.

L'utilisation des ordinateurs est autorisée uniquement pour la consultation du guide de l'étudiant lors des procédurax.

L'utilisation des ordinateurs est interdite lors des examens et des séminaires, sans exception.

Le non-respect de ces consignes pourra entraîner des sanctions pouvant aller jusqu'à l'expulsion de l'activité d'apprentissage ou de l'activité d'évaluation.