

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département Génie électrique

Synthèse du cours

RESEAUX ELECTRIQUES

Pour : 3eme année Licence Electrotechnique

Par :

Dr. BECHA HABIBA

Maître de Conférences en Electrotechnique à l'Université MOHAMED
KHEIDER de BISKRA

2021/2022

AVANT PROPOS

Ce recueil est destiné aux étudiants en Licence Electrotechniques.

L'objectif de ce recueil est de donner un aperçu sur la gestion et le dimensionnement du réseau d'énergie électrique (Transport et Distribution).

La première partie de ce recueil est consacrée à la présentation des généralités sur le réseau électrique (définition, rôles, architectures générale, niveau de tension, différentes fonctions). En second lieu la topologie et structure du réseau (réseau radial, réseau bouclé, réseau maillé) sont illustrées.

Le but de ce recueil est de familiariser l'étudiant à la détermination des caractéristiques longitudinales (Resistance, Inductance), transversales (Capacités, conductances) et circuits équivalents des lignes électriques, ainsi aux modélisations des lignes électriques et transformateurs, aux calculs des courants de défauts avec l'utilisation des systèmes des composantes symétriques et des grandeurs réduites.

Le recueil présenté contient sept parties à savoir :

- *Généralités sur les réseaux électriques.*
- *Modes de transport, répartition et distribution de l'énergie électrique.*
- *Calculs des réseaux électriques.*
- *Modélisations de lignes électriques et transformateurs.*
- *Le système des grandeurs réduites (Le Per Unit).*
- *Les composantes symétriques.*
- *Calculs des défauts équilibrés et déséquilibrés.*

J'espère que ce recueil sera apprécié par mes collègues et les étudiants et je serais très heureux de recevoir avec reconnaissance leurs remarques, critiques et suggestions.

DR. BECHA HABIBA

Sommaire

Chapitre I : Généralités sur les réseaux électriques	
I-1- Introduction	01
I-2- Fonction générale d'un réseau électrique	02
I-3- Architecture générale des réseaux d'énergie électrique	04
I-4- Les plages de tension dans les réseaux	05
I-5- Différentes fonctions du réseau électrique	06
Chapitre II : Mode de transport répartition et distribution de l'énergie électrique	
II-1- Structure tautologique réseau électrique	09
II-1-1- Réseaux radiaux	09
II-1-2- Réseaux bouclés	10
II-1-3- Réseaux maillés	11
Chapitre III : Calcul de réseau électrique	
III-1- Détermination des paramètres de la ligne d'un réseau électrique	14
III-2- Résistance active d'une ligne électrique	14
III-1-2- Réaction d'une ligne électrique	16
III.1.3 Capacité d'une ligne électrique	17
III.1.4. Conducteur spécifique d'une ligne électrique	19
Chapitre IV : Modélisation des lignes électriques et transformateur	
IV -1- Modélisation des lignes électriques	22
IV -1-1- Etude de la ligne courte	23
IV -1-2- Etude de la ligne moyenne	25
IV -1-3- Détermination des paramètres A-B-C et D dans un quadripôle représentant une ligne électrique	27
IV -2- Modélisation des transformateurs	29
IV-2-1- Introduction générale	29
IV-2-2- Transformateur idéal	30
IV-2-3- Transformateur idéal comportant un noyau Réel	36
IV-2-4- Circuit équivalent d'un transformateur mini projet	37
Chapitre V : Le système de grandeurs réduites (le per-unit)	
V.1- Introduction	41

V.2- Calcul avec les grandeurs réduites	42
V.3- Choix des valeurs de base dans un réseau électrique	42
V.4- Schéma unifilaire	43
V.5- Puissance, tension courant de base.	43
V.6- Impédance et admittance de base	44
V.7- Chute de tension	45
V.8- Transformateur en « PU »	46
Chapitre VI : Composantes symétriques	
Introduction	49
VI-1- Décompositions des grandeurs électriques	49
VI-1-1 Composantes directes	50
VI-1-2 Composantes inverses	50
VI-1-3 Composantes homopolaires	51
VI-2- Schémas équivalent des séquences	52
VI-2- Applications	52
Chapitre VII : Défaut équilibrée est déséquilibré	
Introduction	55
VII -1-Différent forme de court-circuit et leur courant	55
VII -2-Calculs de court- circuit	57
VII -2-1-Méthode de composantes symétrique	57
VII -2-2-Principe de superposition	58
VII -3-Défaut symétrique	60
VII -3-1-Court-circuit triphasé	60
VII -4- Défaut symétrique	61
VII -4-1-Court-circuit triphasé isolé	61
VII -4-2-Court-circuit triphasé de la terre	62
VII -4-3-Court-circuit monophasé	63

Chapitre I : Généralités sur les réseaux électriques

I-1- Introduction

I-2- Fonction générale d'un réseau électrique

I-3- Architecture générale des réseaux d'énergie électrique

I-4- Les plages de tension dans les réseaux

I-5- Différentes fonctions du réseau électrique

I-1-Introduction

Un réseau électrique étant composé de machines de production et consommation, ainsi que de structures (lignes, transformateurs) pour les relier réseaux électriques ne sont apparus que vers la fin XIX siècle, lorsque chaque élément avait atteint une maturité technologique suffisante.

Les lignes électriques assurent la fonction "transport de l'énergie" sur les longues distances. Elles sont constituées de 3 phases, et chaque phase peut être constitué d'un faisceau de plusieurs conducteurs (de 1 à 4) espacés de quelques centimètres afin de limiter l'effet couronne qui génère des pertes en lignes, différentes d pertes Joule. L'ensemble de ces 3 phases électriques constitue un terme.

Un pylône électrique peut supporter plusieurs termes : en France jamais plus de rarement plus de 2, mais d'autre pays comme l'Allemagne ou le Japon font supporté à leur pylône jusqu'a 8 termes. Les pylônes sont tous soigneusement relié à la terre par un réseau de terre efficace. Les pylônes supportent les conducteurs des isolateurs en verre ou en porcelaine qui résistent aux tensions élevées des lignes électriques.

Généralement la longueur d'un isolateur dépend directement de tension de la ligne électrique qu'il supporte. Les isolateurs sont toujours munis d'éclateurs qui sont constitués de deux pointes métalliques se faisant face.

La distance est suffisante pour qu'en régime normal la tenue de tension puisse être garantie. Leur utilité apparaît lorsque la foudre frappe la ligne électrique : un éclateur va alors s'établir au niveau de l'éclateur qui contournera l'isolateur. Si avait pas d'éclateur, la surtension entre le pylône et la ligne électrique foudroyée détruirait systématiquement l'isolateur.

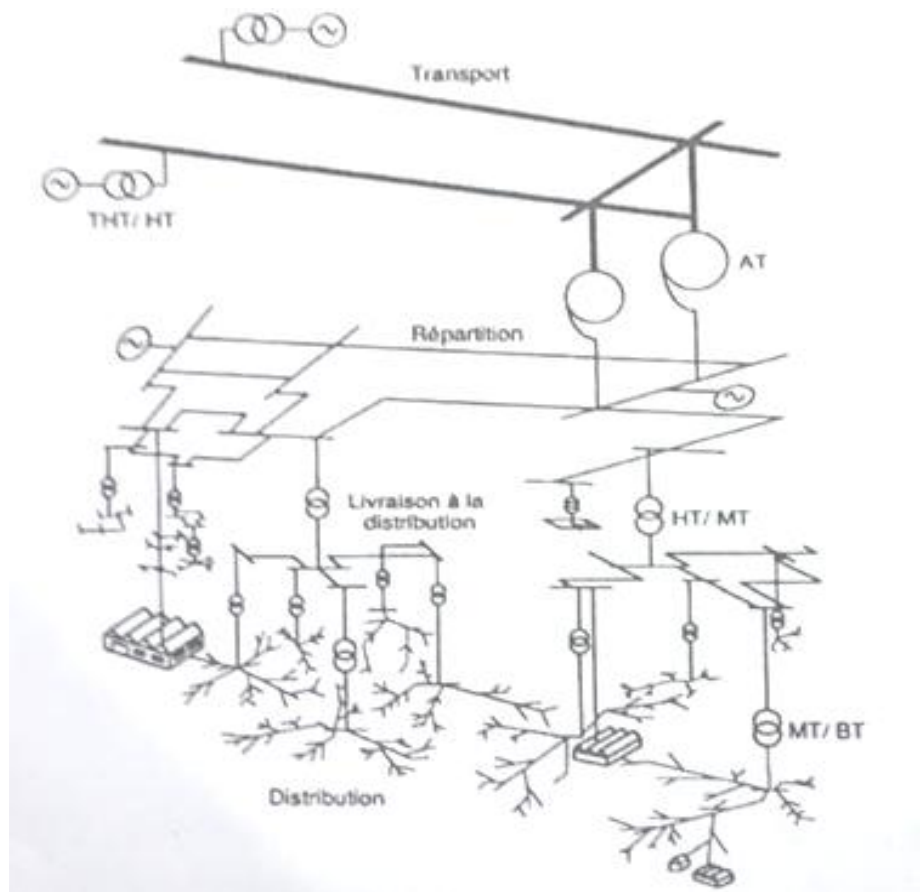
I-2- Fonction générale d'un réseau électrique

Fonction générale d'un réseau électrique est d'acheminer l'énergie électrique des centres de production jusque chez les consommateurs et, l'électricité n'étant pas directement stockable (dans ce traité, article **Stockage de l'électricité dans les systèmes électriques** [D 4 030]), d'assurer la liaison à tout instant dans l'équilibre **production-consommation**.

De plus, le réseau un rôle de transformation, puisqu'il doit permettre de livrer aux utilisateurs un bien de consommation adapté à leurs besoins, le produit électricité, caractérisé par :

- **Une puissance** disponible, fonction des besoins quantitatifs du client
- **une tension** fixée, fonction de cette puissance et du type de clientèle
- **une qualité** traduisant la capacité à respecter les valeurs et la forme prévues de ces deux paramètres et d les maintenir dans le temps.

Fig.I.1. Schéma d'un réseau électrique



I-3- Architecture générale des réseaux d'énergie électrique

Schéma de différentes étapes de production ; transport et distribution de l'énergie électrique

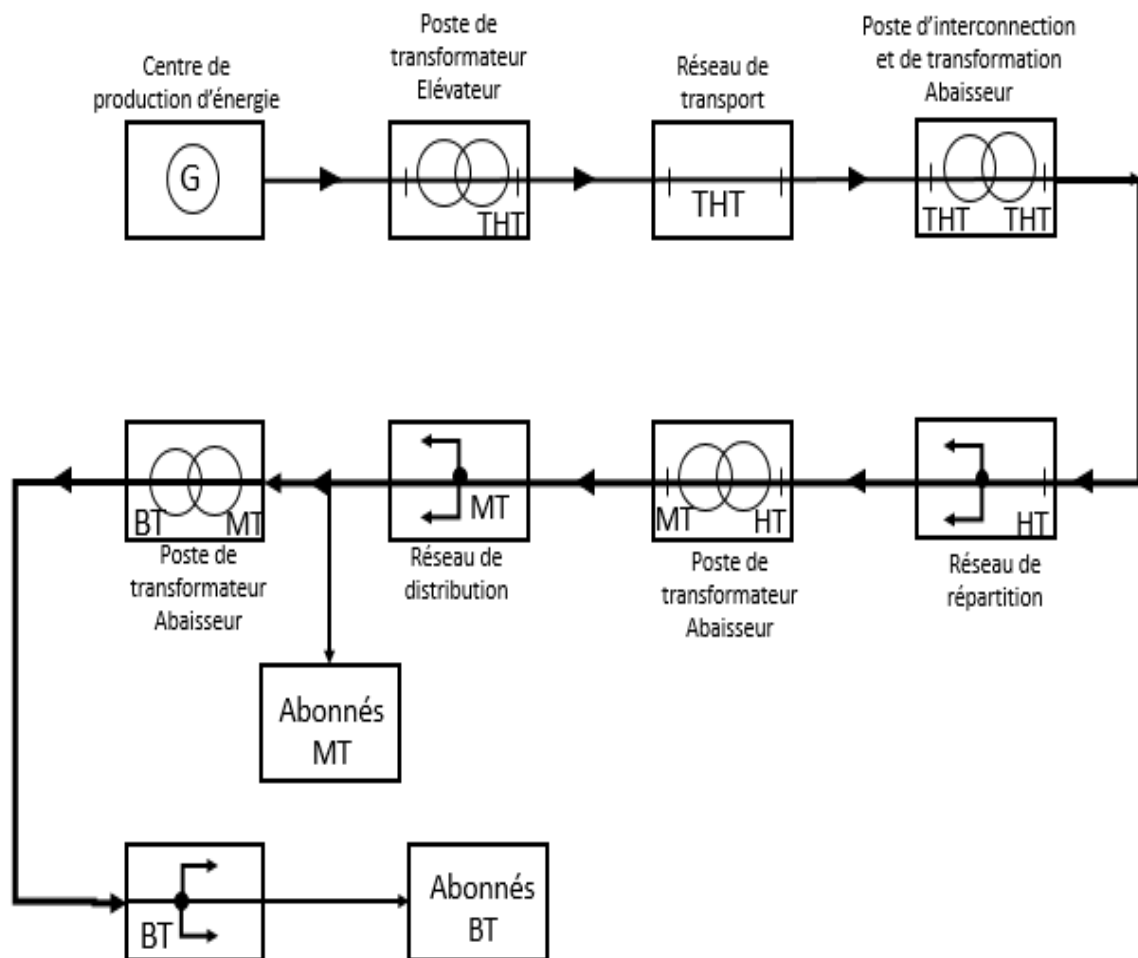


Fig.I.2. Schéma de différentes étapes de production ; transport et distribution de l'énergie électrique :

I-4-Les plages de tension dans les réseaux

L'échelle des tensions utilisées dans le réseau d'énergie est très vaste ou peut distinguer plages suivantes :

I-4-1. Très Haute Tension(THT)

Sont des tensions égales ou supérieure à 300KV, le rôle de c'est réseaux et le transport port et répartir des grandes puissances à des grandes distances, la tension la plus utilisée dans ce cas et 220KV-400KV.

I-4-2.Haut Tension(HT)

Des tensions entre 60-90-110KV actuellement utilisées pour transporter et répartir les grandes puissances dans les centres de consommation principales.

I-4-3.Moyenne Tension(MT)

Les niveaux de tension(MT) comprises entre 1KV-35KV sont utilisés surtout dans les réseaux de distribution, Mais en remarquant que l'utilisation inférieure à 10KV et plus utilisé surtout dans les réseaux urbain et région industrielles, mais le développement de la demande est l'augmentation des distance des réseaux de transport et le besoin de transporté une grande puissance dans les réseaux MT, l'échélement des tensions sont augmenté de 6KV jusqu'à 15-20-30KV et 60KV.

I-4-4.Base Tension(BT)

Il existe deux types de tension BT

- La tension entre 121V-220V

Ce type de tension utilisée pour l'alimentation de tous les appareils domestiques et industriels.

- La tension entre 500V-600V

Ce type de tension utilisée pour l'alimentation des réseaux industriels à l'intérieur des usines à cause de l'utilisation de grande puissance de certaines machines.

Mais en générale en remarque que la majorité des pays utilisent la tension standard 220V entre ph et neutre.

I-4-5. Très Basse Tension(TBT)

Sont des tensions à 50V utilisées aux alimentations des petits appareils domestique et électrique.

I-5-Différentes fonctions du réseau électrique

D'après la fonction à remplir, on distingue 5 types de réseaux électriques :

- **Les réseaux d'utilisations** : doivent pouvoir alimenter un grand nombre de moteurs et d'appareils domestiques dont la puissance industrielle varie de quelques dizaines de watts à quelques kilowatts. Ce sont les réseaux basse tension (B T)
- **Les réseaux industriels** : qui sont aussi des réseaux d'utilisations nécessitant des puissances élevées. Ils peuvent utiliser soit la basse tension de 500 à 600 V soit la moyenne de 5 à 6 kV
- **Les réseaux des distributions** : qui ont pour fonction de fournir a réseaux d'utilisations la puissance dont ils ont besoin.

Il est important de noter que les réseaux de distributions sont conduits à utiliser au moins deux échelons de tensions. On installe dans un poste équipé d'un transformateur MT/BT. et de plusieurs départ BT. Les réseaux des répartitions: comprend les lignes de ransport et le postes de transformation; dits réseax locax; ils fournissent la puissance ax réseaiia de distributions mais ne peuvent pas la transiter que sur des distances limitées à 99km les réseawx des transports: qui assurent l'alimentation de l'ensemble du territoire grâce à des transits de puissance importantes sur des distances atteignant quelques centaines de kilomètres, la tension utilisée est: 110 à 1250 kV. elle comprend les centrales, ainsi que les lignes et les postes de transformation

issus de celles-C. Les réseaur d'interconnexions: constituent les liaisons entre les ESeata de transport; de telles liaisons ont un double rôle de sécurite et un role d'économie.

Chapitre II : Mode de transport répartition et distribution de l'énergie électrique

II-1-Structure tautologique réseau électrique

II-1-1- Réseaux radiaux

II-1-2- Réseaux bouclés

II-1-Structure topologique des réseaux

Les réseaux doivent assurer le transit de l'énergie électrique avec une sécurité d'alimentation est sécurité d'alimentation est augmentée soit :

- Par les lignes avec appareillages plus solides.
- Par des circuits plus nombreux.

Alors il y'a donc un compromis à réaliser entre le coût des investissements supplémentaires et la valeur de ce qu'ils permettent de sauver ce qui conduit à des topologies des réseaux différents.

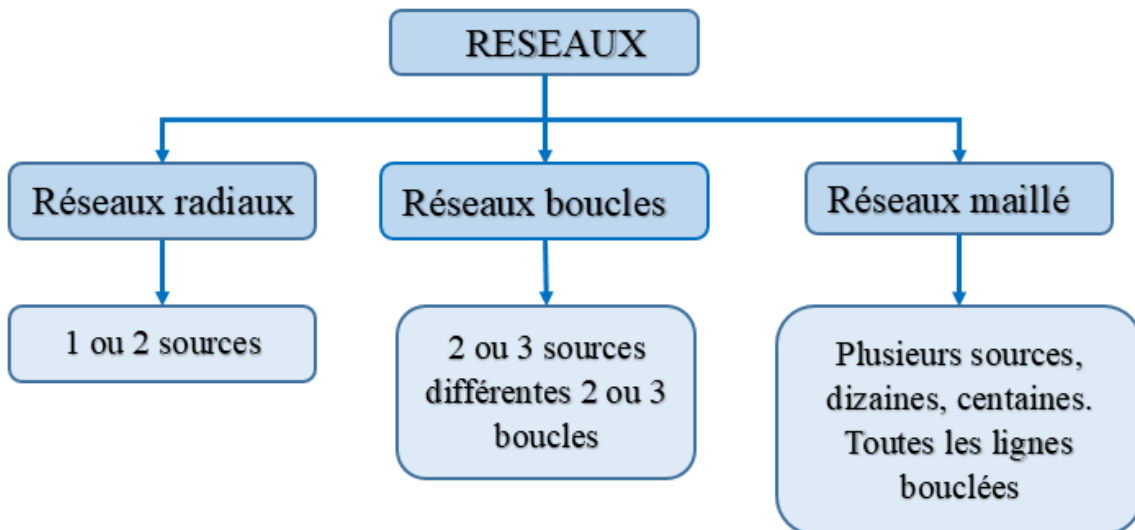


Figure I.3 : Structure topologique des réseaux.

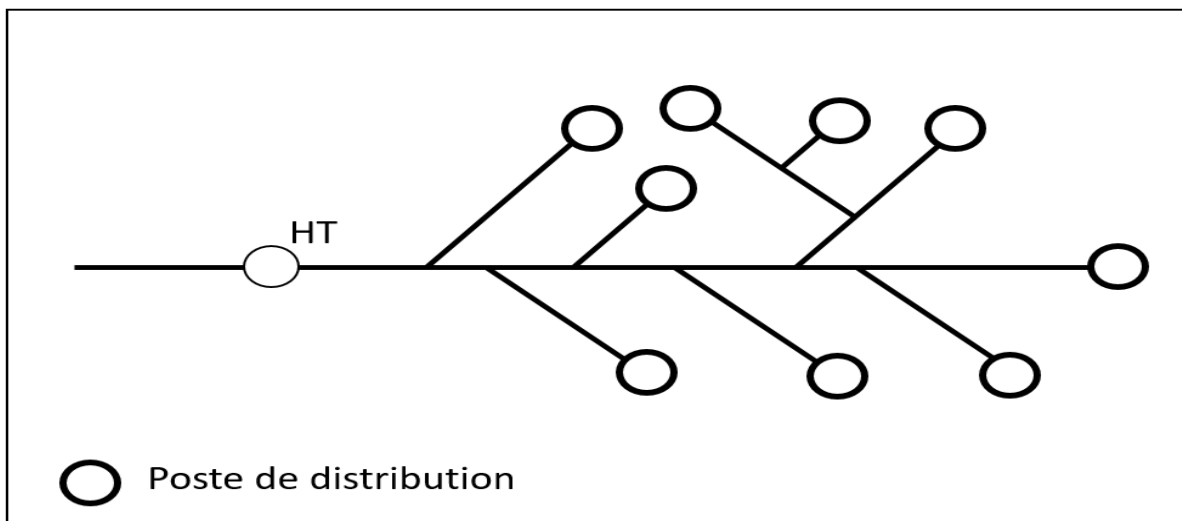
II-1-1-Réseaux radiaux

En milieu rural, on trouve des architectures arborescentes bouclés mais exploitées en radial.

Les boucles peuvent se situer entre les postes (HT/MT) ou entre départs voisins (du même poste source).

Caractéristique :

- ❖ Points forts :
 - Simplicité
 - Exploitation.
 - Coûts d'installation.
- ❖ Points faibles :
 - qualité de service.



FigureI.4 : Schémas d'un réseau radial

II-1-2- Réseaux bouclés

Cette structure est pratique lorsque le centre de gravité des charges est excentré par rapport au poste source, dans ce cas, on alimente un poste nommé poste tête de pétales par un ou deux départs issus du poste source (HT/MT).

Par ailleurs, la puissance des câbles est limitée à la puissance maximale divisée par deux pour que ceux-ci puissent tenir en cas de défaut, contrairement à la maille, il n'y a plus de liaisons entre les boucles.

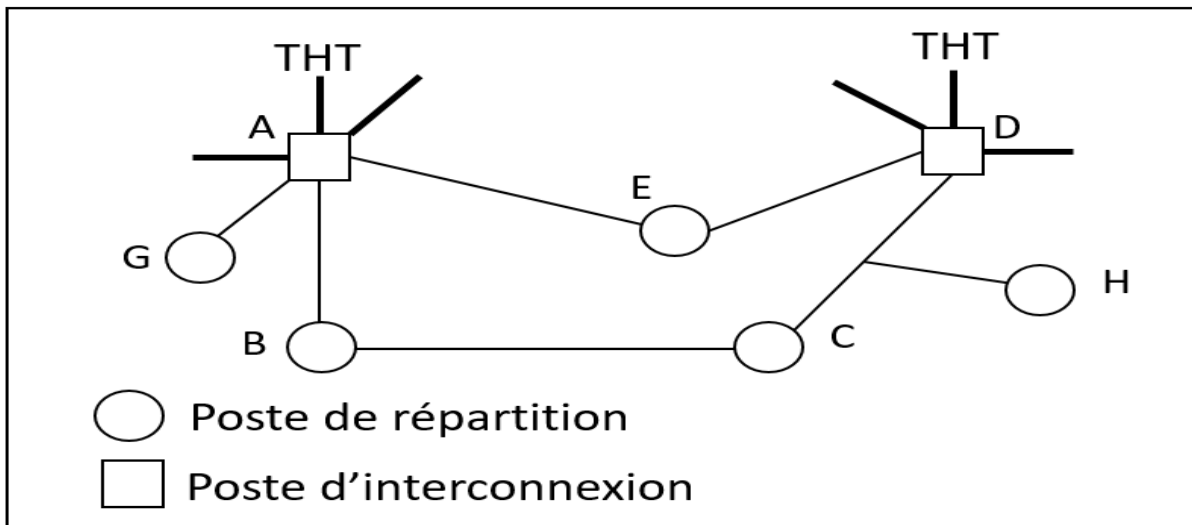
Caractéristique :

❖ Points forts

- Simplicité.
- Qualité de service.

❖ Points faibles :

- Exploitation avec les manœuvres plus nombreuses.
- Coûts d'installation



FigureI.4 : Schémas d'un réseau bouclés

II-1-3- Réseaux maillés :

Cette structure est composée de boucles alimentées directement par les sources (HT/MT) ou via des postes têtes de boucle reliés aux sources (HT/ MT) par des conducteurs de section importante appelés câbles de structure. Les postes têtes de boucle ont la même structure que les postes source sauf qu'il n'y a pas de transformateur (HT/MT).

Des liaisons inter-boucles permettent le transfert de la charge d'une boucle sur l'autre en cas de perte d'un câble de structure.

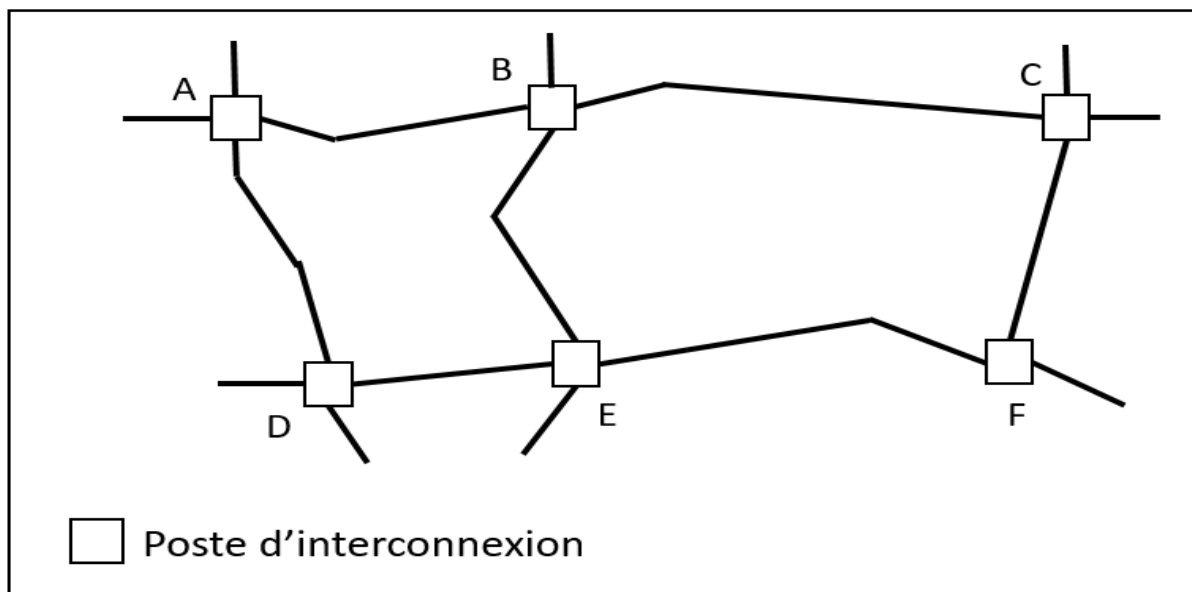
Caractéristiques :

❖ Points forts :

- Qualité de service.
- Continuité de service.

❖ Points faibles :

- Exploitation avec les manœuvres plus nombreuses.
- Coûts d'installation. Complexe.



FigureI.4 : Schémas d'un réseau maillés

Chapitre III : Calcule de réseau électrique

III-1- Détermination des paramètres de la ligne d'un réseau électrique

III-1-2- Résistance active d'une ligne électrique

III-1-2- Réaction d'une ligne électrique

III.1.3 Capacité d'une ligne électrique

III.1.4. Conducteur spécifique d'une ligne électrique

III.2. Circuit équivalents des lignes électrique

III-1- Détermination des paramètres de la ligne d'un réseau électrique

III-1-2- résistance active d'une ligne électrique

- la résistance et l'impédance laquelle on ne peut magasinier de l'énergie
- La résistance d'un conducteur en courant alternatif et la température de service est déterminée à partir de la résistance au courant continu à 20 degrés en tenant compte de l'influence de la température il à phénomène lié à l'alimentation en courant alternatif
- Dans un conducteur parcouru par un courant alternatif la densité de ce courant n'est pas uniforme mais elle est plus élevé à la préféree que centre du conducteur s'appeler effet de peau (effet pelliculaire)

➤ **La résistance active de la ligne un coran continue et déterminé par :**

$$R = \delta \cdot \frac{l}{s} \quad (\text{III.1})$$

δ : Résistance du conducteur de phase [$\Omega \cdot \text{mm}^2$]

l : Longueur du conducteur en mètre

S : Section du conducteur en mm^2

➤ **La résistance active de la ligne en courant alternative et déterminé par :**

$$R = r_0 \cdot l [\Omega] \quad (\text{III.2})$$

r_0 : Résistance prêtre linéique en [Ω/Km] lorsque la température et de 20°c .

Elle est fonctions de cette dernière par la relation ci-dessous :

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha_{20} (t - 20^\circ)] \quad (\text{III.3})$$

α_{20} :Dépend de la nature de la des matériaux

t : température

R_{20} : Résistance à 20°c

ou

$$R_t = R_0 [1 + \alpha_0 \cdot t] \quad (\text{III.4})$$

R_0 : Résistance à 0°c

α_0 : Coefficient du température à 0°C

III-1-2- réaction d'une ligne électrique :

le champ H créer par le courant de charge passant par le conducteur est à l'origine de l'apparition de la réaction (résistance réactive) soit :

$$L = \frac{\Phi}{I} \quad (\text{III.5})$$

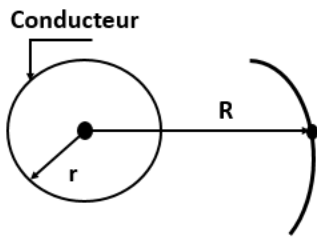
Φ : Flux magnétique

I : Courant variable dans l'espace.

La réactance linéique est calculée comme suit :

$$X = \omega \cdot L = 2\pi f \cdot L \quad /f : \text{fréquence [HZ]}$$

➤ **Inductance d'une phase :**

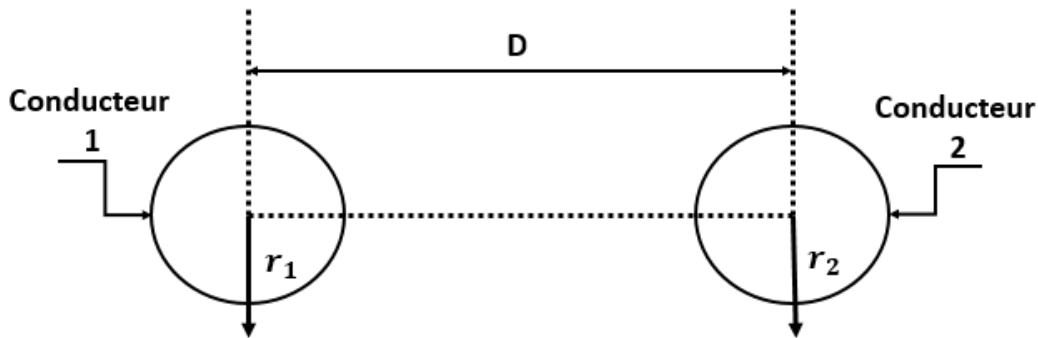


L'inductance est calculée comme suit :

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{R}{r} [H/m]$$

$$\text{Ou } r' = r \cdot e^{-0.25} = 0.7788 \cdot r \quad (\text{III.6})$$

r' : Rayon d'un conducteur



➤ **Inductance pour une ligne monophasée :**

➤ **Inductance pour une phase**

Phase 01 : $L = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D}{r_{1'}} [H/m]$

Ou $r_{1'} = 0.7788 \cdot r$ (III.7)

Phase 02 : $L_2 = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D}{r_{2'}} [H/m]$

Ou $r_{2'} = 0.7788 \cdot r_2$ (III.8)

➤ **Inductance de la ligne monophasée est :**

$$L = L_1 + L_2$$

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \left(\ln \frac{D}{r_{1'}} + \ln \frac{D}{r_{2'}} \right)$$

$$L = 4 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D}{\sqrt{r_{1'}} \cdot \sqrt{r_{2'}}} [H/m] \quad (\text{III.9})$$

Si $r_1 = r_2 \Rightarrow$

$$L = 4 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D}{r'} [H/m] \quad (\text{III.10})$$

➤ **Inductance de la ligne triphasée symétrique :**

Une ligne triphasée est dite symétrique si la distance entre deux conducteurs de ces trois conducteurs est égale ainsi la somme algébrique des courants des trois phases sont nuls.

L'inductance pour chaque phase est donnée comme suit :

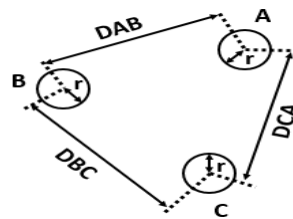
$$L = L_A = L_B = L_C = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D}{r'} [H/m] \quad (III.11)$$

➤ **Inductance de la ligne triphasée disymétrique (déséquilibrée)**

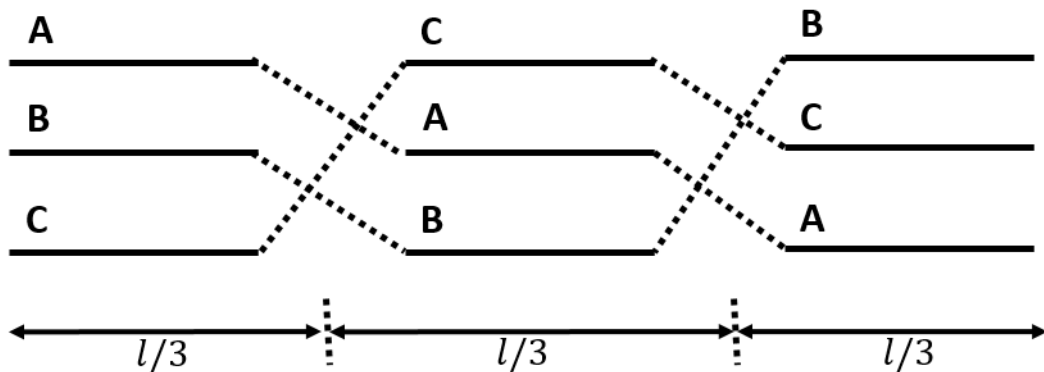
$$L_A \neq L_B \neq L_C$$

$$DAB \neq DBC \neq DCA$$

$$\Delta U_{AB} \neq \Delta U_{BC} \neq \Delta U_{CA}$$



(Chutes de tensions) n'ont pas le même pour cela on change la position du conducteur pour des distances égales cette méthode s'appelle : Changement des positions des phases:



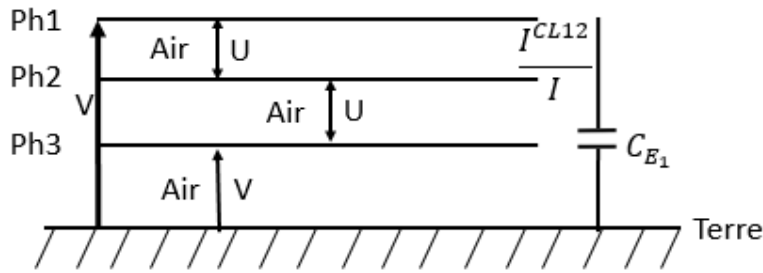
La valeur moyenne de l'inductance pour un conducteur avec un changement de position de phases

$$L = L_A = L_B = L_C = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D_e}{r'} [H/m] \quad (III.12)$$

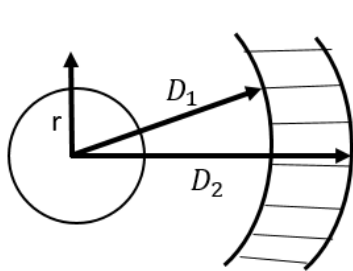
$$D_e = (DAB \cdot DBC \cdot DCA)^{1/3}$$

D_e : Distance moyenne

III.1.3 Capacité d'une ligne électrique



➤ Capacité d'une ligne pour une phase :



$$C = \frac{2\pi \cdot \epsilon}{\ln \frac{D_2}{D_1}} [F/m] \quad (III.13)$$

ϵ : perméabilité

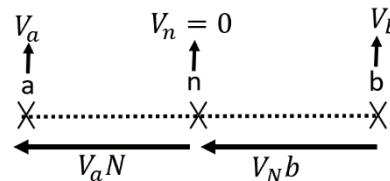
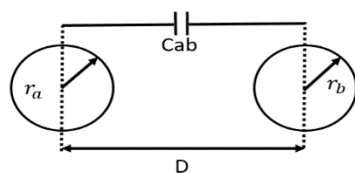
$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$$

ϵ_r = Perméabilité relative égale à 1 pour l'air

ϵ_0 = Perméabilité relative à vide

$$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} [F/m]$$

➤ Capacité d'une ligne monophasée



$$\text{si } r_a = r_b = r$$

$$C_{ab} = \frac{\pi \cdot \epsilon_0}{\ln \frac{D}{r}} [F/m] \quad (III.14)$$

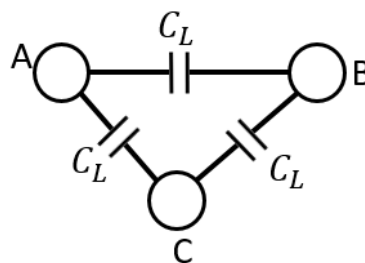
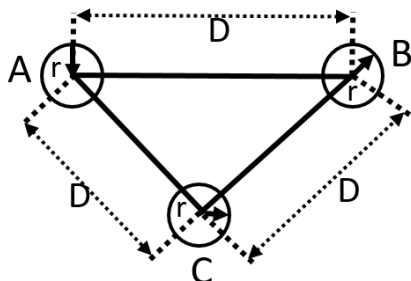
$$C_N = \frac{2\pi \cdot \epsilon_0}{\ln \frac{D}{r}}$$

$$C_N = 2 \cdot C_{ab} \Rightarrow \frac{2}{c_n} \Rightarrow \frac{1}{c_{ab}} \quad (III.15)$$

$$|X_C| = \frac{1}{c \cdot \omega} \quad \text{Réactive capacitive}$$

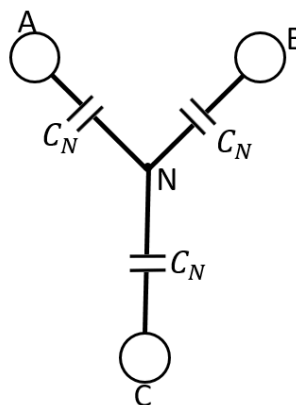
$$|Y_C| = \frac{1}{|X_C|} = c \cdot \omega \quad \text{Admittance capacitive}$$

➤ **Capacité d'une ligne triphasée équilibrée**

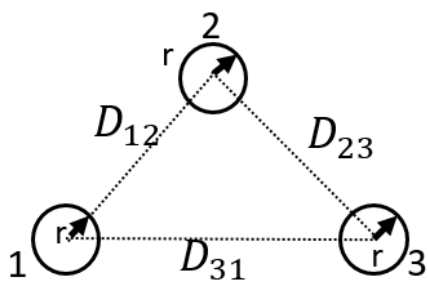


$$C_L = \frac{\pi \cdot \epsilon}{\ln \frac{D}{r}} [F/m] \quad (\text{III.16})$$

$$C_N = \frac{2\pi \cdot \epsilon}{\ln \frac{D}{r}} [F/m]$$



➤ **Capacité d'une ligne pour triphasée déséquilibrée**



$$C_L = \frac{\pi \cdot \epsilon}{\ln \frac{D}{r}} [F/m] \quad (\text{III.18})$$

Tel que : $D_e = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}}$

$$C_N = \frac{2\pi \cdot \epsilon_0}{\ln \frac{D_e}{r}} \quad (\text{III.19})$$

III.1.4. Conducteur spécifique d'une ligne électrique

$$g_0 = \frac{\Delta ph}{U_n^2} \quad (\text{III.20})$$

Δph : pertes active transversales

Ligne aérienne $\Rightarrow \Delta ph = \Delta p$ couronne

$$\Delta P_{\text{couronne}} = \frac{0.18}{\delta} \cdot \sqrt{\frac{reond}{D_{\text{moy}}}} \cdot (U_s \cdot U_{er})^2 [kw/km] \quad (\text{III.21})$$

U_s : tension simple source

U_{er} : tension simple critique de l'apparition de l'effet couronne

$$U_{er} = 48,9 \cdot m_0 \cdot m_t \cdot \delta \cdot R_{\text{cond}} \cdot \text{Log}_{10} \left(\frac{D_{\text{moy}}}{R_{eq}} \right) \quad (\text{III.22})$$

m_0 : coefficient tenant compte de l'état du câble

$$\text{nu}(m_0 = 0.83 - 0.87)$$

δ : coefficient tenant compte de la pression atmosphérique

$$(\text{pour } t=+25^\circ\text{c} \quad c ; \delta = 1)$$

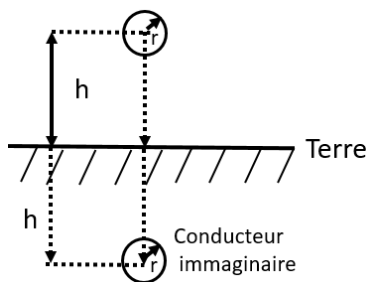
m_t : coefficient tenant compte de la saison

$$m_t = 1 \text{ lorsqu'il faut beau, } m_t = 0.8 \text{ pour un mauvais temps}$$

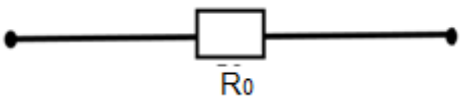
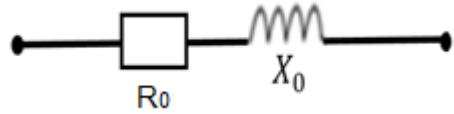
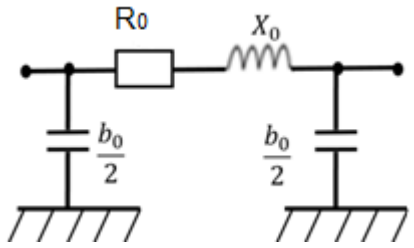
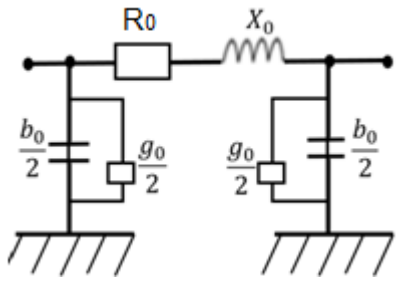
➤ Effet de terre sur la capacité d'une ligne électrique :

❖ Cas d'un conducteur

$$C_N = \frac{2\pi \cdot \epsilon_0}{\ln \frac{D}{r}} [F/m] \quad (\text{III.22})$$



III.2. Circuit équivalents des lignes électrique

Tension nominale et type de la ligne	Schéma équivalent	Calcul du paramètre total
Ligne en câble 6 à 10 KV		$R_0 = r_0 \cdot l$
Ligne aériennes des réseaux de répartition et de distribution (BT.MT) 6 à 35 KV		$R_0 = r_0 \cdot l$ $X_0 = X_0 \cdot l$ $Z = R + jX$ $X = \frac{L \cdot w}{w}$ L : inductance
Ligne aériennes des réseaux de transport $U < 220KV$; $L < 250KV(240KV)$		$R_0 = r_0 \cdot l$ $X_0 = X_0 \cdot l$ $B = b_0 \cdot l$ $B = C_0 \cdot w \cdot l = \frac{1}{X_0}$
Ligne aériennes des réseaux de transport $U < 220KV$; $L < 250KV$	 y=G+jB admittance	$R_0 = r_0 \cdot l$ $X_0 = X_0 \cdot l$ $B = b_0 \cdot l$ $G = g_0 \cdot l$ l : longueur R : résistance B : susceptance G : conducteur

Chapitre IV : Modélisation des lignes électriques et transformateur

IV -1-Modélisation des lignes électriques

IV -1-1- Etude de la ligne courte

IV -1-2- Etude de la ligne moyenne

IV -1-3- Détermination des paramètres A-B-C et D d'un quadripôle représentant une ligne électrique

IV -2-Modélisation des transformateurs

IV-2-1-Introduction générale

IV-2-2-Transformateur idéal

IV-2-3-Transformateur idéal comportant un noyau Réel

IV-2-4-Circuit équivalent d'un transformateur mini projet

IV -1-Modélisation des lignes électriques

Introduction :

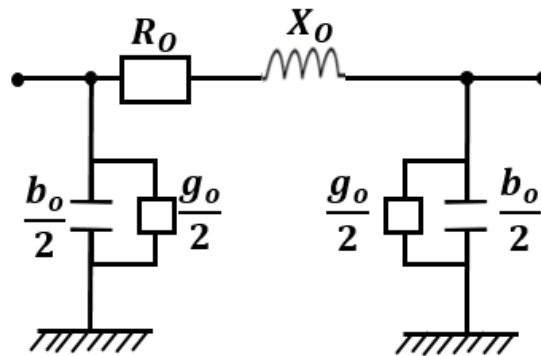
Théoriquement, une ligne de transport doit être considérée comme un ensemble de résistance et réaction parti le Lang de la ligne.

Pour des raisons de calcule une ligne peut être représentée sous forme d'un schéma électrique dans les paramètres sont :

- Paramètres longitudinaux appelés Z de la ligne :

$$Z_l = R_l + jX_l = R_o \cdot l + X_o \cdot l$$

- R_l : résistance de la ligne
- X_l : réactance de la ligne
 - $X_l = L \cdot W / W = 2\pi f$
 - L : inductance



- Paramètres transversaux appelés admittance :

$$Y = G_l + jB_l$$

- G_l : conductance de la ligne
- B_l : susceptance de la ligne
- $G_l = g_o \cdot l$; $g_o = \frac{\Delta l t}{U_n^2}$;

$\Delta l t$: perte active

U_n : Tension nominale

- $B_l = b_o \cdot l = \frac{1}{X_o} = C_o \cdot w \cdot l$

IV -1-1- Etude de la ligne courte

Introduction :

Une ligne courte c'est une ligne de longueur comprise entre 50 et 80 km son schéma équivalent est représenté sur la figure suivante :

➤ schéma équivalent

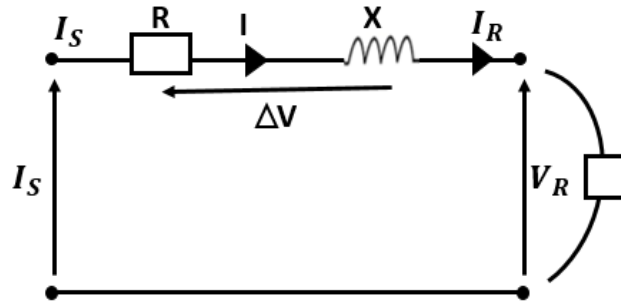


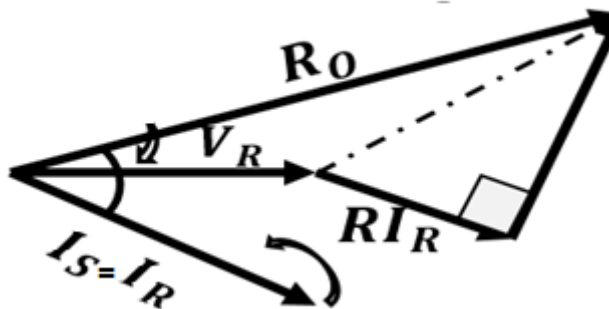
Schéma équivalent d'une phase d'une ligne courte

➤ Modèles mathématiques

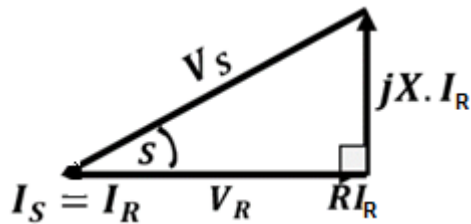
$V_S = V_R + \Delta V$	V_S : Tension simple à l'origine (début) a la ligne
$\Delta V = Z \cdot I$	« tension source »
$I = I_R = I_S$	V_R : Tension simple à l'extrémité (fin) de la
$Z = R + jX$	ligne « tension source »
$X = L \cdot W$	I_S : Courant simple à l'origine de la ligne
	I_R : Courant simple à l'extrémité de la ligne

➤ Diagramme vectoriel :

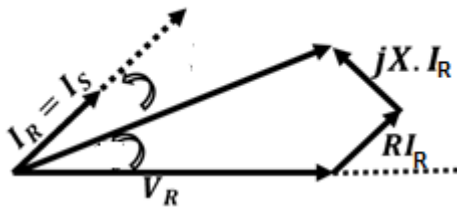
A) Facteur de puissance en arrière :



B) Facteur de puissance égale 1 :



C) Facteur de puissance en avance :



➤ Coefficient de régulation de tension

$$\varepsilon \% = \frac{|V_S| - |V_R|}{|V_R|} \cdot 100$$

➤ Le rendement de la ligne

➤

$$\eta = \frac{p_{out}}{p_{in}} = \frac{P_R}{P_S} = \frac{P_R}{P_R + P_j}$$

P_R : Puissance de récepteur

P_S : Puissance de source

P_j : Pertes joule de la ligne

$$P_R = \sqrt{3} \cdot U_R \cdot I_R \cdot \cos C_R$$

$$P_S = \sqrt{3} \cdot U_S \cdot I_S \cdot \cos C_S$$

$$P_j = 3 \cdot R \cdot I^2$$

IV -1-2- Etude de la ligne moyenne

Introduction :

Les lignes moyennes sont caractérisées par la longueur comprise entre 80 et 250 Km. Il existe deux types ; type π et type T.

- type π : admittance totale de la ligne et divisé en deux parties égales placés à l'origine et l'extrémité de cette ligne.

➤ schéma équivalent de la ligne moyenne type π :

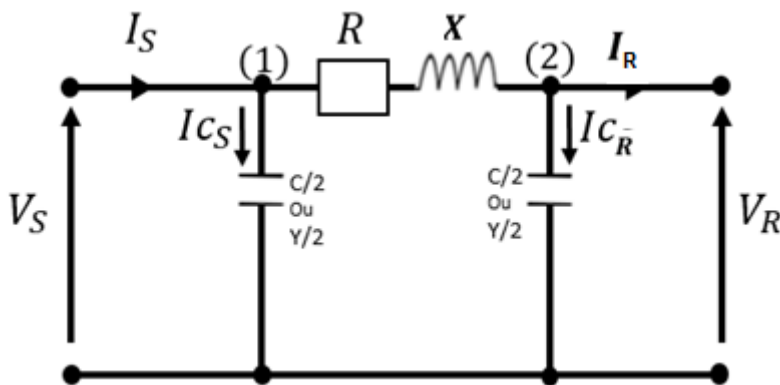


Schéma équivalent pour une phase d'une ligne moyenne type π

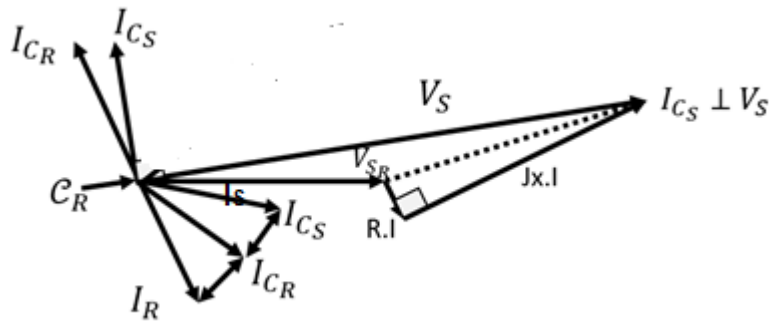
$$\begin{array}{l}
 V_S = V_R + Z \cdot I \\
 \bullet \text{ Nœud N}^\circ 02 : I = I_R + I_{C_R} \\
 I_{C_R} = V_R \cdot \frac{Y}{2}
 \end{array}
 \left| \begin{array}{l}
 Z = R + jX \\
 Y = \frac{1}{X_c}
 \end{array} \right.$$

- Nœud N^o01

$$I_S = I + I_{C_S}$$

$$I_{C_S} = V_S \cdot \frac{Y}{2}$$

✓ **Diagramme vectoriel :**



➤ **Schéma équivalent pour une phase d'une ligne moyenne type T :**

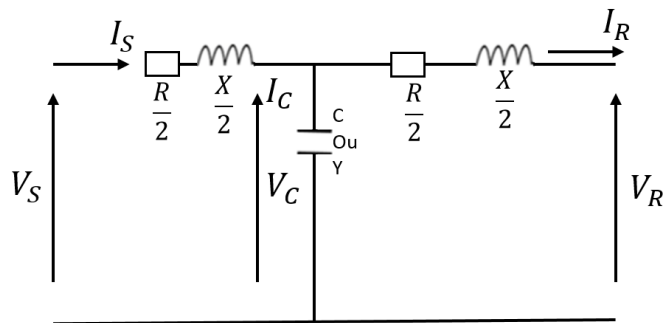


Schéma équivalent pour une phase d'une ligne moyenne type I

$$V_S = V_C + \frac{Z}{2} \cdot I_S$$

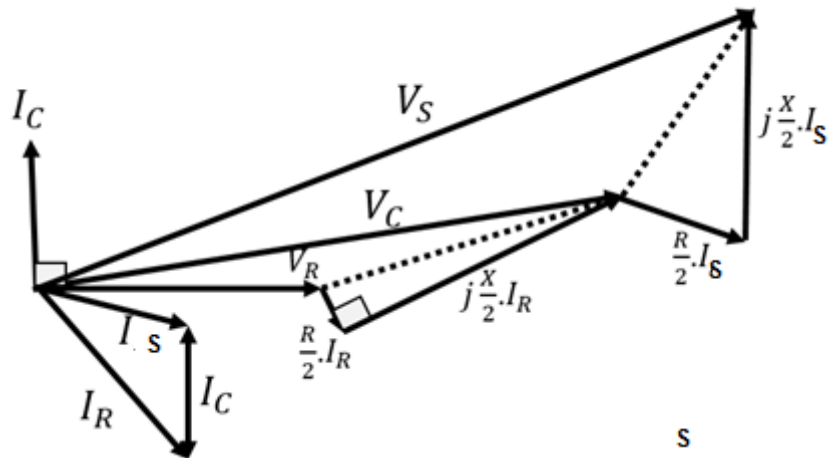
$$I_S = I_R + I_C$$

$$I_C = V_C \cdot Y$$

$$V_C = V_R + \frac{Z}{2} \cdot I_R$$

✓ Diagramme novectoriel :

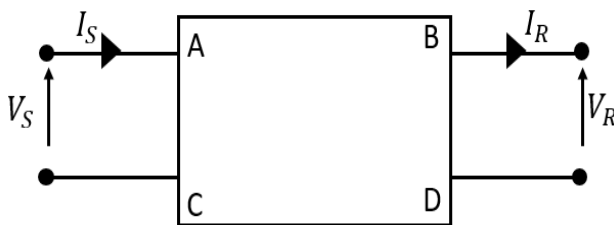
$$I_C \perp V_C$$



IV -1-3- Détermination des paramètres A-B-C et D d'un quadripôle représentant une ligne électrique

Introduction :

On peut représenter un tronçon de ligne par un quadripôle comportant une entrée et une sortie ; on peut calculer les grandeurs d'entrée ou de sortie en utilisant ce dernier.



$$V_S = A \cdot V_R + B \cdot I_R$$

$$I_S = C \cdot V_R + D \cdot I_R$$

$$\begin{pmatrix} V_S \\ I_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_R \\ I_R \end{pmatrix}$$

$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$: Matrice de transport (diagonale) $A=D$

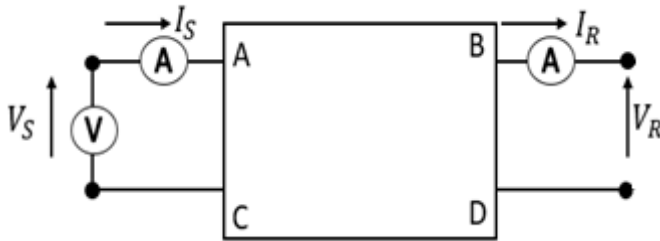
➤ A, B, C et D pour une ligne courte et ligne moyenne

	A	B	C	D
Ligne courte	1	z	o	1
Ligne moyenne type II	$1 + \frac{1}{2}Y.Z$	Z	$Y(1 + \frac{1}{4}Y.Z)$	$1 + \frac{1}{2}Y.Z$
Ligne moyenne type I	$1 + \frac{1}{2}Y.Z$	$Y(1 + \frac{1}{4}Y.Z)$	Y	$1 + \frac{1}{2}Y.Z$

Détermination des paramètres A, B, C et D

Pour déterminer A, B, C et D du quadripôle nous devons examiner deux régimes de fonctionnement de la ligne.

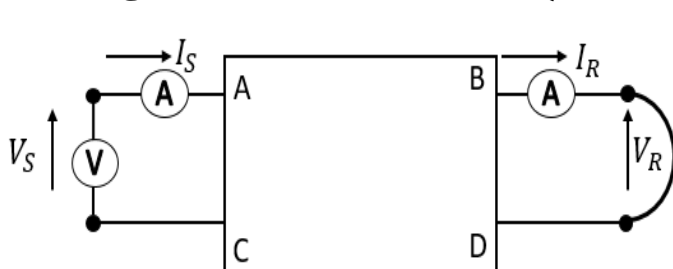
- Régime à vide ($I_R = 0$)



$$A = \frac{V_S}{V_R} \text{ gain de courant}$$

$$C = \frac{I_S}{V_R} \quad [S]$$

- Régime en court-circuit : ($V_R = 0$)



$$B = \frac{V_S}{V_R} \quad [\Omega]$$

$$D = \frac{I_S}{V_R} \quad [S]$$

La vérification du coefficient du quadripôle se fait par satisfaction de relation suivante : $A.D-BC \cong 1$

IV -2-Modélisation des transformateurs

IV-2-1-Introduction générale :

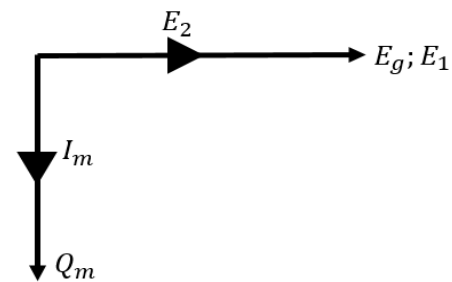
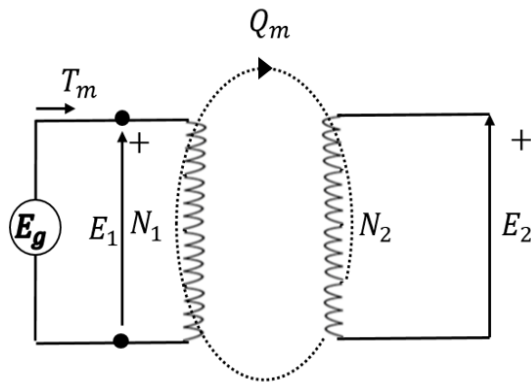
Le transformateur est un appareil électrique très simple, il permet de modifier la tension et le courant dans un circuit. Grâce à lui, l'énergie électrique peut être transportée à grande distance de façon économique et distribuée dans les usines et les maisons.

IV-2-2-Transformateur idéal

➤ Transformateur idéal à vide :

Un transformateur idéal n'a aucune perte et son noyau est infiniment perméable.

De plus, le couplage entre le primaire et le secondaire est parfait. Un transformateur idéal n'a aucun flux de fuite.



Transformateur idéal à vide

Diagramme vectoriel

Remarque : pour toute inductance, le courant I_m est déphasé de 90° en arrière de la tension E_1

Soit : $E_1 = E_g$

$$E_1 = 4.44. f. N_1. \phi_{max} \dots \dots (1) ; \text{ et } E_2 = 4.44. f. N_2. \phi_{max} \dots \dots (2)$$

L'équation (1) divisée par l'équation (2)

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow \text{Rapport de transformation}$$

E_1 : Tension induite au primaire [V]

E_2 : Tension induite au secondaire [V]

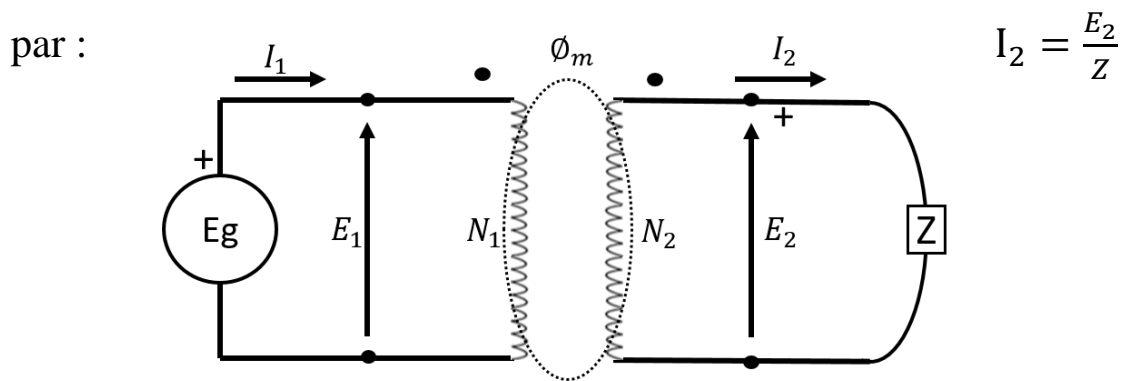
N_1 : Nombre de spires du primaire.

N_2 : Nombre de spires du secondaire.

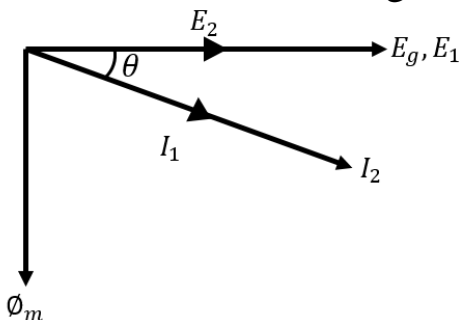
Comme il s'agit d'un transformateur idéal, le circuit magnétique est infiniment perméable, ce qui veut dire qu'un courant magnétisant infiniment petit suffit à créer le flux ϕ_m

➤ **Transformateur idéal en charge :**

racordons une charge Z au secondaire d'un transformateur idéal, un courant I_2 circulerait immédiatement se courant est donné



Transformateur idéal en charge ; il produit seulement un flux mutuel.



Si l'on propose une charge résistive-inductive, le courant I_2 sera en retard d'un angle θ sur la tension E_2

Diagramme vectoriel des grandeurs

- Premièrement :

Le rapport de transformation en charge est le même qu'à vide,

$$\text{soit : } \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

- Deuxièmes :

- la tension E_g de la source demeure constante ; la tension conduite E_1 (induite par Φ_m) reste également constante ; E_2 ne change pas lorsque la charge est branchée au secondaire.

- Le courant I_2 produit une fmm secondaire $N_2 \cdot I_2$
- Une fmm $N_1 \cdot I_1$ d'égale valeur mais opposée à $N_2 \cdot I_2$

Le courant I_1 circuitant au primaire doit respecter la relation

$$N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2$$

Les courants I_1 et I_2 sont en phase et ils sont définis par l'équation

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

I_1 : Courant primaire [A]

I_1 : Courant primaire [A]

N_1 : Nombre de spire au primaire

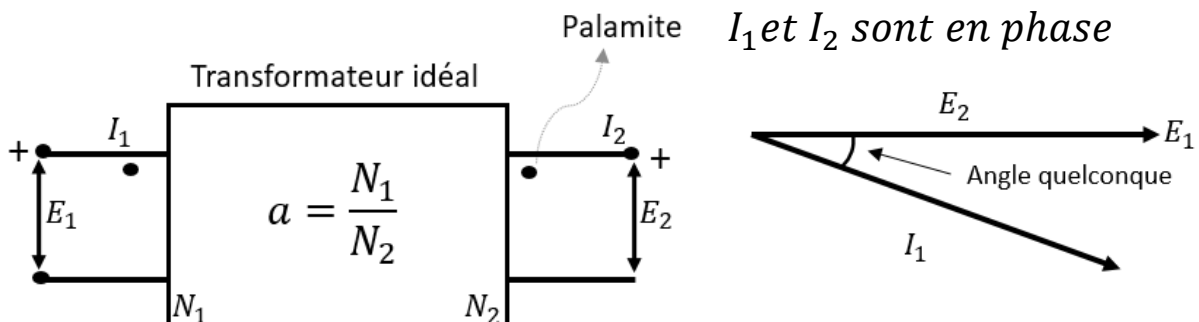
N_2 : Nombre de spire au secondaire

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_2}{I_1}$$

On tire : $E_1 \cdot I_1 = E_2 \cdot I_2$

La puissance apparente absorbée au primaire et donc égale à la puissance débitée par la seconde débitées par la secondaire sont exactement égales à celles absorbées par la primaires .

➤ Conversions et représentations symbolique d'un transformateur idéal :

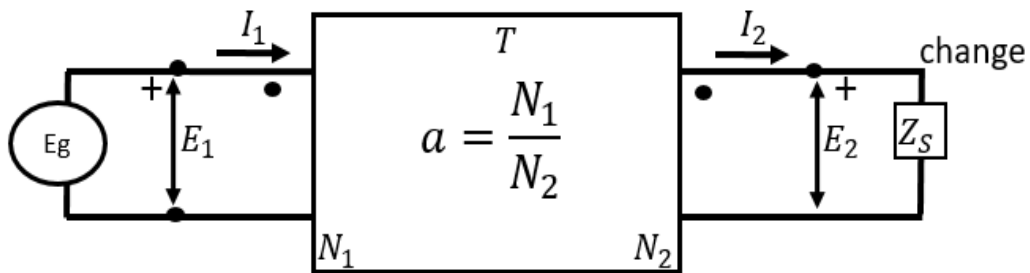


$$a = \frac{N_1}{N_2}$$

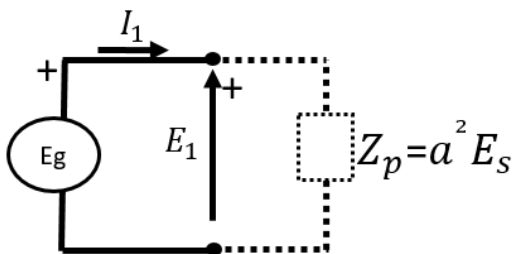
Il s'ensuit que : $E_1 = aE_2$

$$I_2 = a \cdot I_1$$

Rapport d'impédance :



La transformation modifier une tension ou un courant aussi une transformation d'impédance \Rightarrow



L'impédance vu par la source est a^2 fois l'impédance réelle

- $Z_p = a \cdot E_2$ et $I_1 = \frac{I_2}{a}$ (1)
- $Z_s = \frac{E_2}{I_2}$ (2)
- $Z_p = \frac{E_1}{I_1}$ (3)

Substituant les équations (1) et (2) dans (3) on obtient

$$Z_p = \frac{E_2}{I_2} = \frac{a.E_2}{I_2/a} = a^2 \frac{E_2}{I_2} = a^2 Z_s$$

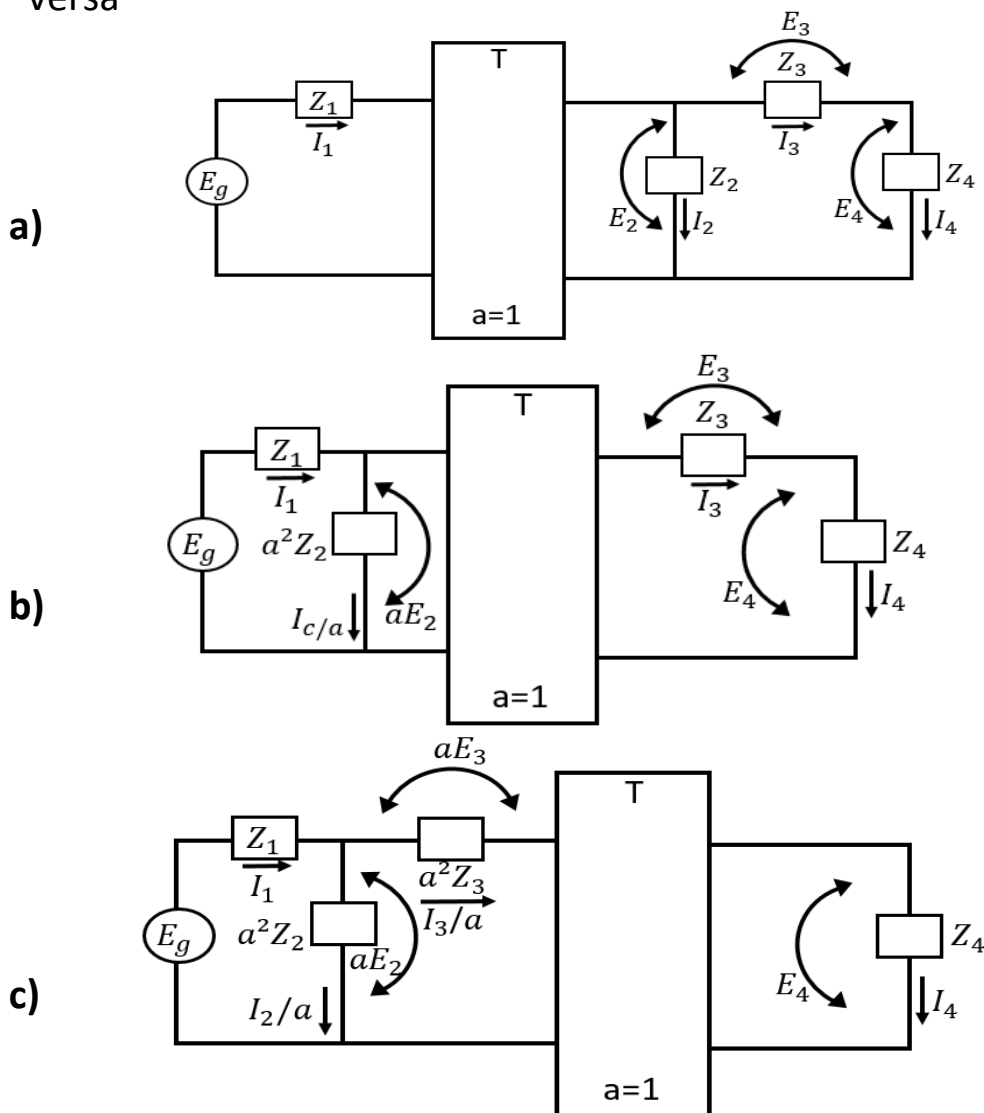
$$Z_p = a^2 \cdot Z_s$$

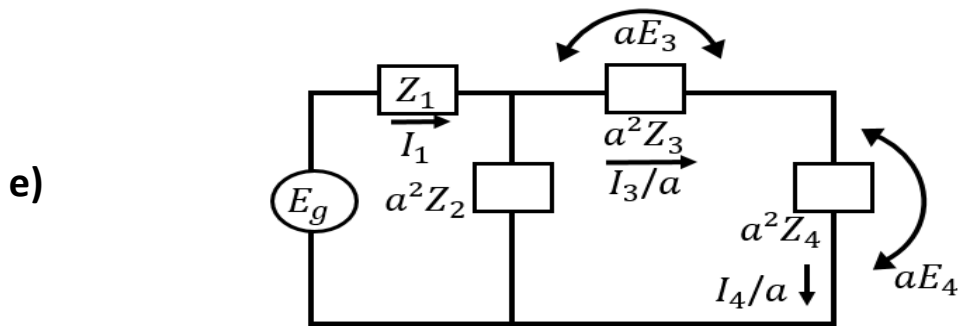
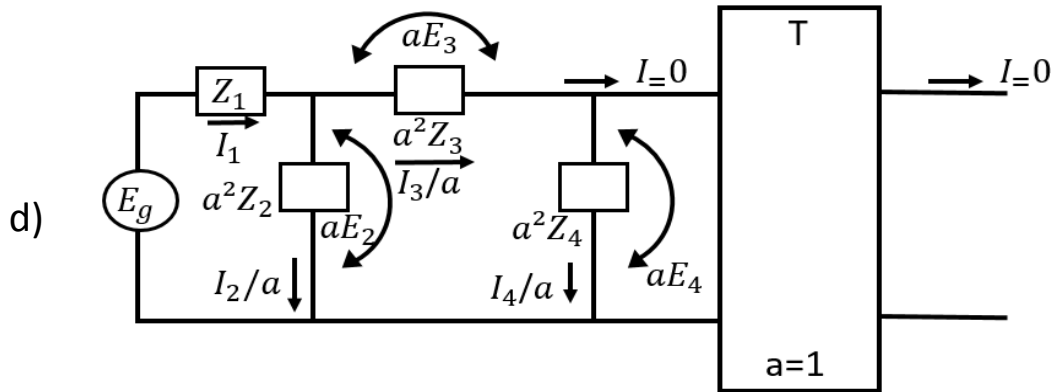
Z_p : Impédance vue entre les bornes du primaire [Ω]

Z_s : Impédance réelle entre les bornes secondaire [Ω]

a : Rapport de transformation

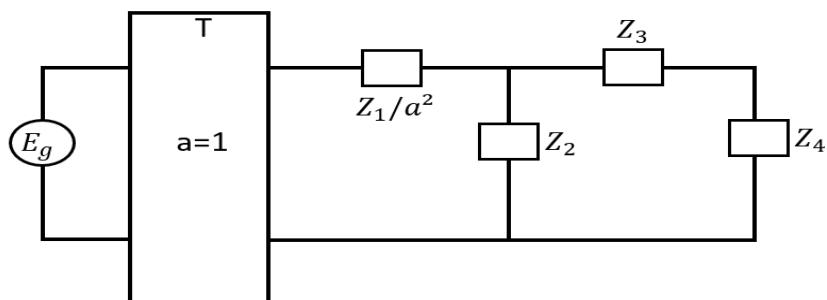
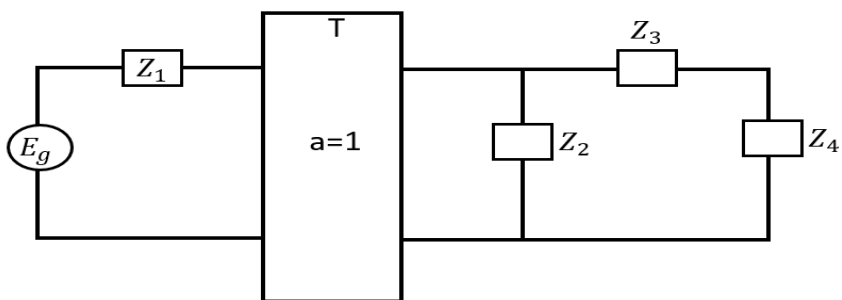
Déplacement des impédances du secondaires au primaire et vice versa

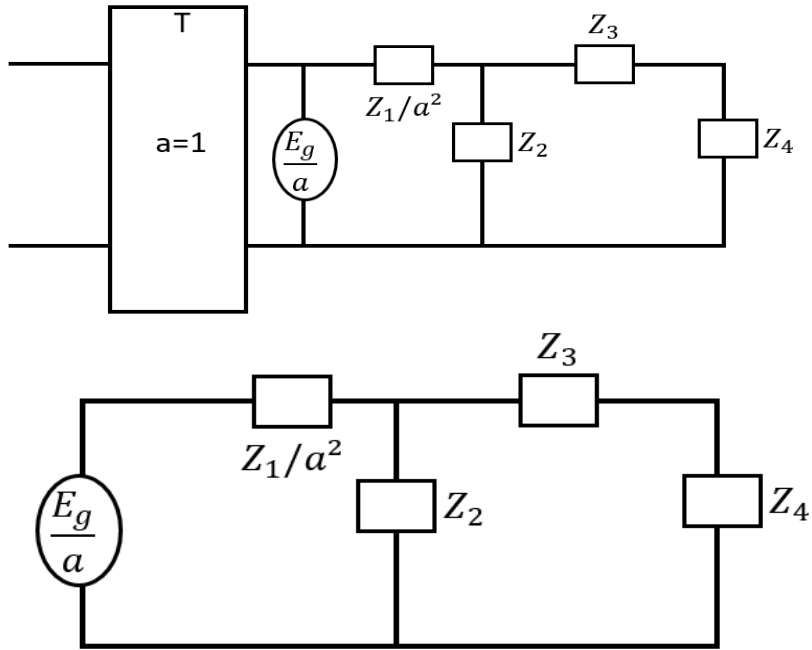




Circuit équivalent après élimination du transformateur

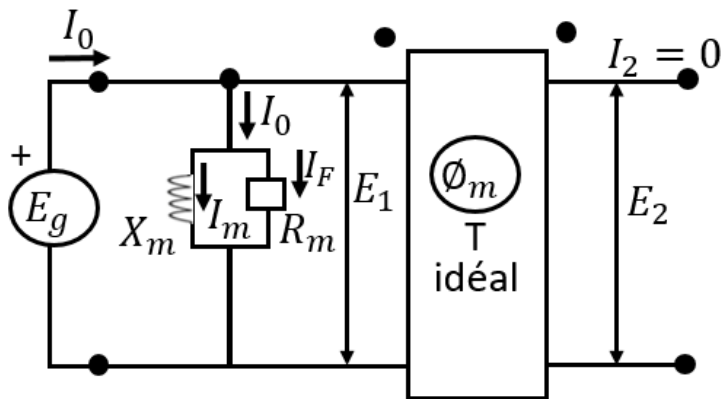
➤ **Transfert des éléments primaires au cote secondaire**





IV-2-3-Transformateur idéal comportant un noyau Réel

Soit :



Circuit Transformateur idéal comportant un noyau Réel

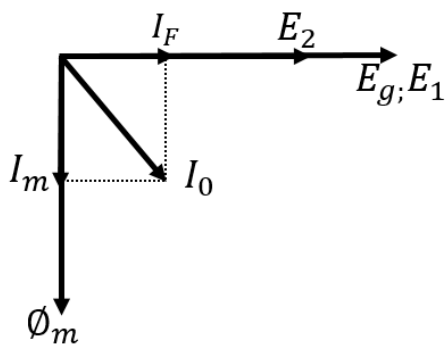


Diagramme vectoriel des variables

$$R_m = \frac{E_1^2}{P_m}$$

$$X_m = \frac{E_1^2}{Q_m}$$

R_m : Résistance représentant les pertes dans le feu [Ω]

X_m : Réactance magnétisante du primaire [Ω]

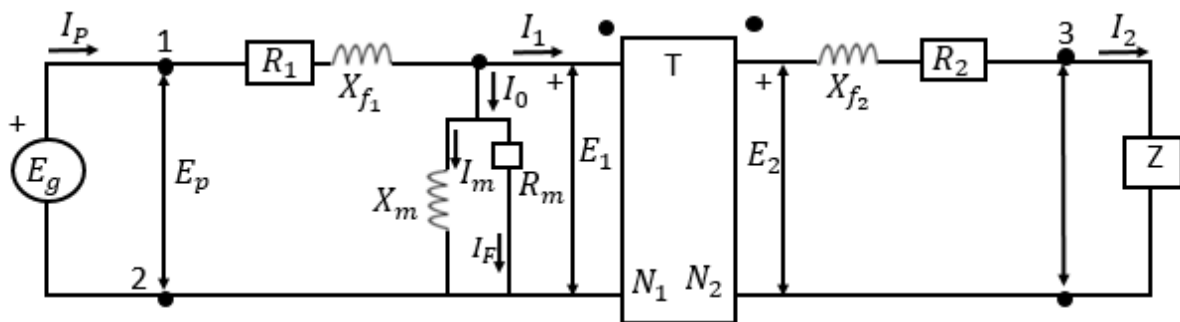
E_1 : Tension induite au primaire [V]

P_m : Perte dans le fer [w]

Q_m : puissance réactive requise pour créer le flux mutuel Φ_m [var]

$$\Phi_m = \frac{E_1}{4.44fN} = \frac{E_g}{4.44fN}$$

IV-2-4-Circuit équivalent d'un transformateur réel



Circuit équivalent d'un transformateur réel

Le rectangle T représente un transformateur idéal

R_1 : Résistance d'enroulement du primaire

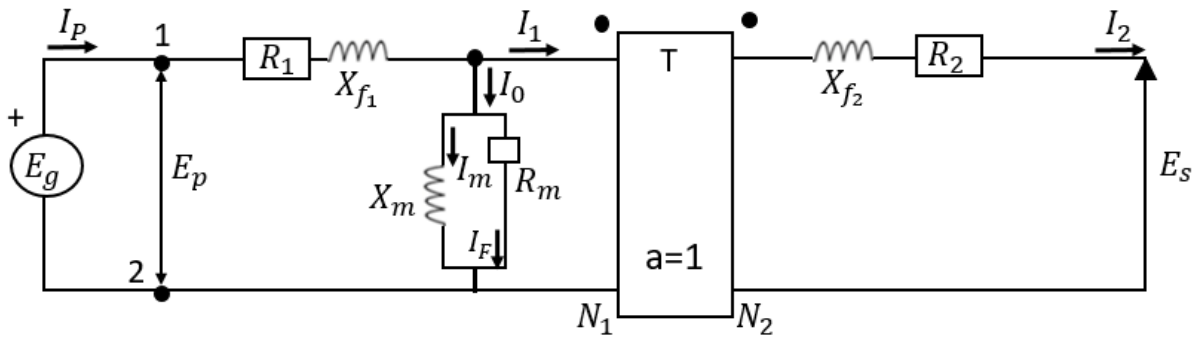
R_2 : Résistance d'enroulement secondaire

X_{f1} : Réactance de fuite au primaire

X_{f2} : Réactance de fuite au secondaire

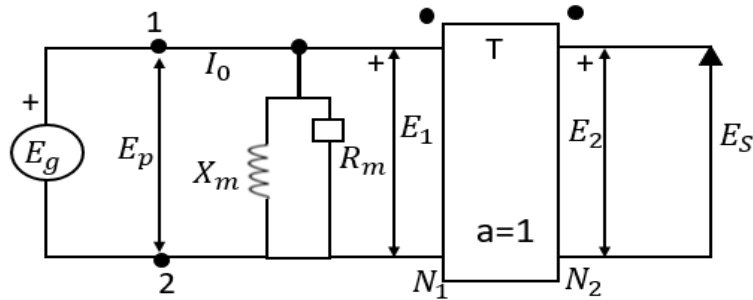
➤ **Transformateur fonctionnant à vide**

$$I_2 = 0 \Rightarrow I_1 = 0$$



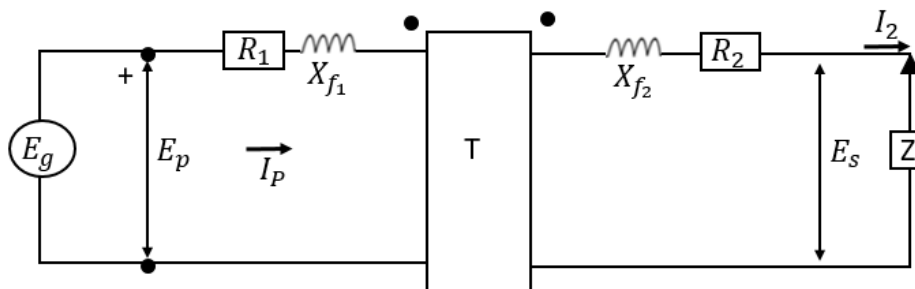
Circuit équivalent lorsque transformateur à vide

$$I_0 \text{ Très faible} \Rightarrow \Delta U_{R_1} \Rightarrow \Delta U_{R_2} \approx 0$$

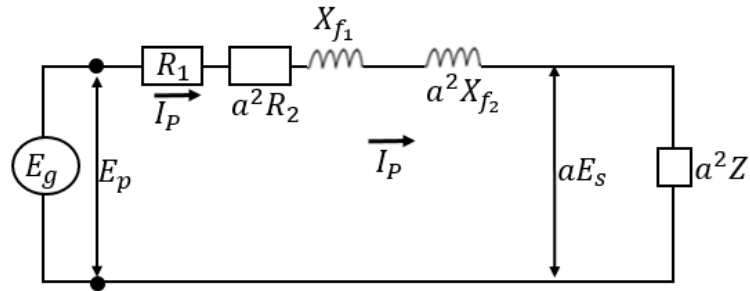


➤ **Transformateur fonctionnant en charge**

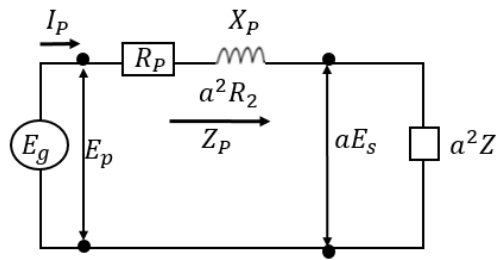
Charge est supérieure à 20% de puissance nominale du transformateur



➤ Impédance rapportées au côté primaire



⇓

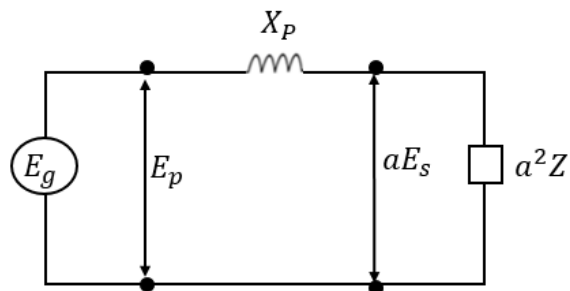


$$R_P = R_1 + a^2 \cdot R_2 \text{ (Résistance totale rapporté au primaire du T)}$$

$$X_P = X_{f1} + a^2 \cdot X_{f2} \text{ (Réactance totale rapporté au secondaire du T)}$$

$$Z_P = \sqrt{R_P^2 + X_P^2}$$

➤ Un gros transformateur



Chapitre V : Le système de grandeurs réduites (le per-unit)

V.1- Introduction

V.2- Calcul avec les grandeurs réduites

V.3- Choix des valeurs de base dans un réseau électrique

V.4- Schéma unifilaire

V.5- Puissance, tension courant de base.

V.6- Impédance et admittance de base

V.7- Chute de tension

V.8- Transformateur en « PU » (Per-Unit)

V.1- Introduction

Le système par rapport à un système de grandeur réduite qui permet à l'ingénieur électricien d'avoir constamment à l'esprit des ordres de grandeur relatifs de certains paramètres indépendants indépendamment des niveaux de tension et de puissance de plus l'utilisation de ce système simplifier certaines formules et schéma équivalent en particulier un bon choix initial permet de s'affranchir de la présence des transformateurs idéaux et se ramener à l'étude de circuit monophasé Système associée à une variable quelconque alpha l'heure de base alpha base et la part à sa valeur vrai alpha vrai de manière à l'exprimer dans un système adimensionnel « Pu » eau (en % de sa valeur de base) les ordres de grandeur sont bien connus.

L'utilisation de la grande grandeur réduite permet :

- de simplifier les problèmes ($\Delta, y, \sqrt{3}$)
- de nous informé davantage ($V_{nominal}$; $I_{nominal}$; P_{nomi} )

V.2- Calcul avec les grandeurs réduit

Le calcul avec les grandeurs réduites effectué de la même façon avec les grandeurs ordinaire ou physique Une fois toutes les calculs avec les grandeurs réduit terminé on peut obtenir les grandeurs ordinaire en considérant les valeurs de base choisi au départ.

La définition des quantités voltage ; Courant et impédance en système est donnée par Quantité par :

Quantité (per unit) = quantité (unité normal)/ valeur de base de la quantité (unité normal)

V.3- Choix des valeurs de base dans un réseau électrique

➤ Puissance de base

$$P_{base} = Q_{base} = S_{base} = S_N \quad (V.2)$$

S_N : Puissance apparente nominal

➤ Tension de base

V_{base}

La puissance de base et la tension de base sont choisis indépendantes ; les deux autres peuvent être déduites, habituellement, on choisit la puissance et la tension comme valeurs de base.

Par conséquent :

- Courant de Base :

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{V_{base}} \quad (V.3)$$

- Impédance de base :

$$Z_{base} = R_{base} = X_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} \quad (V.4)$$

- Admittance de Base :

$$Y_{base} = G_{base} = B_{base} = \frac{1}{Z_{base}} \quad (V.5)$$

- Les quantités en « Per Unit » sont donnés par :

$$V_{pu} = \frac{V}{V_{base}} \quad (V.6)$$

$$I_{pu} = \frac{I}{I_{base}} \quad (V.7)$$

$$S_{pu} = \frac{S}{S_{base}} \quad (V.8)$$

$$Z_{pu} = \frac{Z}{Z_{base}} \quad (V.9)$$

Remarque : la valeur de base est réelle

V.4- Schéma unifilaire

Pour représenter les circuits rapidement et simplement. Nous avons recours à un schéma uniflores, qui montre les équivalences avec d'autre schématisation et prouve bien l'avantage d'une telle représentation.

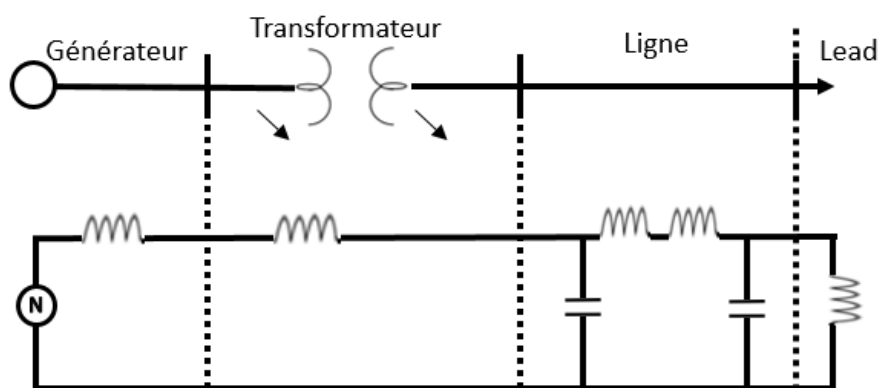


Fig. V.1 : Schéma unifilaire d'un système triphasé

V.5- Puissance, tension courant de base :

Soit une ligne triphasée :

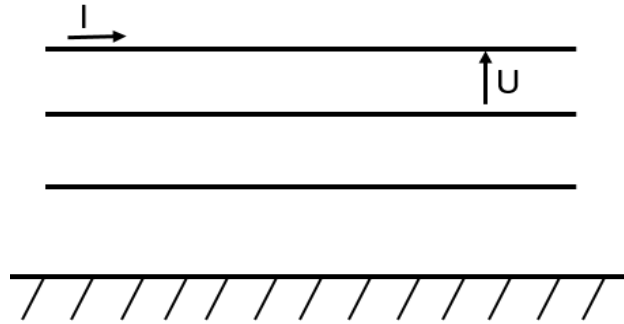


Fig. V.2 : Ligne triphasée

➤ Dans un système triphasé équilibré nous avons :

$$U = \sqrt{3}.V[V] \quad (V.10)$$

$$\bar{S} = 3.\bar{V}\bar{I} = \sqrt{3}.\bar{U}.\bar{I} = P + jQ \quad (V.11)$$

$$\bar{V} = \bar{Z}.\bar{I} \quad (V.12)$$

➤ Les grandeurs réduites « per unit »

$$\bar{S}_{pu} = \frac{\bar{S}}{S_B} \quad ; \quad \bar{U}_{pu} = \frac{\bar{U}}{U_B} \quad ; \quad \bar{I}_{pu} = \frac{I}{I_B} \quad \text{et} \quad \bar{Z}_{pu} = \frac{\bar{Z}}{Z_B} \quad (V.13)$$

$$U_B = \sqrt{3}.V_B \quad (V.14)$$

$$S_B = \sqrt{3}.U_B.I_B \quad (V.15)$$

$$V_B = Z_B.I_B \quad (V.16)$$

Divisons les équations(V.10)et(V.13) nous obtenons :

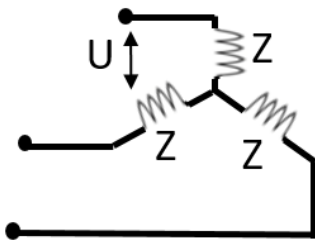
$$U_{pu} = V_{pu} \quad (V.17)$$

Divisons les équations(V.11)et(V.14) nous obtenons :

$$\bar{S}_{pu} = \bar{U}_{pu} = \bar{I}_{pu} \quad (V.18)$$

V.6- Impédance et admittance de base

Soit :



charge (équilibré) triphasé en étoile

$$\bar{S} = 3 \cdot \bar{V} \frac{\bar{V}}{\bar{Z}} = 3 \cdot \frac{V^2}{\bar{Z}} = \frac{U^2}{\bar{Z}} \quad (V.19)$$

➤ Les grandeurs de base :

$$S_B = \frac{U_B^2}{Z_B} \quad (V.20)$$

$$S_B = \frac{U_B^2}{S_B} \quad (V.21)$$

$$\bar{S}_{pu} = \frac{U_{pu}^2}{Z_{pu}} \quad (V.22)$$

De la même manière à l'impédance

$$Y_B = \frac{S_B}{U_B^2} \quad (V.23)$$

$$\bar{Y}_{pu} = \frac{\bar{Y}}{Y_B} \quad (V.24)$$

$$\bar{S}_{pu} = \bar{Y}_{pu} \cdot U_{pu}^2 \quad (V.25)$$

V.7- Chute de tension

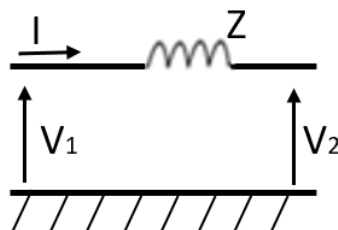


Fig. V.3 : Variation de la tension du ou passage de courant à travers une ligne impédance

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_2 + \bar{Z} \cdot \bar{I} \quad (V.26)$$

$$Z_B \cdot I_B = V_B \quad (V.27)$$

$$\bar{V}_{1pu} = \bar{V}_{2pu} + \bar{Z}_{pu} \cdot \bar{I}_{pu} \quad (V.28)$$

➤ Changement de base :

Nous pouvons écrire pour deux systèmes de base différents :

$$\bar{Z} = \bar{Z}_{pu1} \cdot Z_{B1} = \bar{Z}_{pu2} \cdot Z_{B2} \quad (V.29)$$

$$\bar{Z}_{pu2} = \bar{Z}_{pu1} \cdot \frac{Z_{B1}}{Z_{B2}} = \bar{Z}_{pu1} \cdot \frac{U_{B1}^2}{U_{B2}^2} \cdot \frac{S_{B2}}{S_{B1}} \quad (V.30)$$

pour les admittances:

$$\bar{Y}_{pu2} = \bar{Y}_{pu1} \cdot \frac{Y_{B1}}{Y_{B2}} = \bar{Y}_{pu1} \cdot \frac{U_{B2}^2}{U_{B1}^2} \cdot \frac{S_{B1}}{S_{B2}} \quad (V.31)$$

V.8- transformateur en « PU »

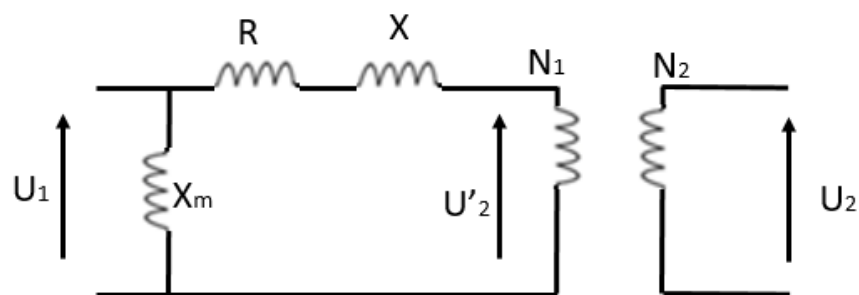


Fig. V.4 : Modèle du transformateur

$$\begin{cases} R = R_1 + n^2 R_2 [\Omega] \\ X = X_{F1} + n^2 X_{F2} [\Omega] \end{cases} \quad / n = \frac{N_1}{N_2} \quad (V.32)$$

-L'impédance caractérisant le transformateur s'exprime à travers la tension de court-circuit (U_{cc}) de ce dernier (en%)

« U_{cc} » représente le pourcentage de la tension nominale à appliquer à un des enroulements pour qu'il passe un courant nominal dans l'autre enroulement lorsque celui-ci est court-circuit. Cette tension correspond à l'impédance de fuite lorsque sa valeur est donnée dans le système per unit lié aux grandeurs nominales de l'appareil

- Dans le système Pu ; à partir du modèle de la figure Fig. V.4 ; la tension de court-circuit se déduit par ($U_{cc\ pu} = Z_{cc\ pu} \cdot I_{n\ pu}$)
Avec $I_{n\ pu} = 1$; naturellement $Z_{cc\ pu}$ représente l'impédance donnée du transformateur ($= R_{pu} + jX_{pu}$) ou cours de cette essai.
Nous prendrons les grandeurs de base comme étant les grandeurs nominales du système.

- Le système Per Unit :

Choissant « S_{B1} » et « U_{B1} » puissance et tension de base des réseaux « 1 »

$$\bar{U}_{1pu} = \frac{1}{U_B} \cdot \bar{U}_1 \quad (V.33)$$

$$\bar{I}_{1pu} = \frac{1}{I_B} \cdot \bar{I}_1 \quad (V.34)$$

La tension de base du réseau « 2 » comme suit

$$U_{B2} = nU_{B1} \quad (V.35)$$

Nous avons $S_{B1} = B \cdot I_{B1} \cdot V_{B1}$; $S_{B2} = B \cdot I_{B2} \cdot V_{B2}$

En choisissant ($S_{B1} = S_{B2} = S_B \Rightarrow I_{B2} = \frac{I_{B1}}{n}$) (V.36)

$$\bar{U}'_{2pu} = \bar{U}_{2up} \quad (V.37)$$

$$\bar{I}'_{2pu} = \bar{I}_{2up} \quad (V.38)$$

Chapitre VI : composantes symétriques

Introduction

VI-1- Décompositions des grandeurs électriques

VI-1-1 Composantes directes

VI-1-2 Composantes inverses

VI-1-3 Composantes homopolaires

VI-2- Schémas équivalent des séquences

VI-3- Applications

Introduction

La méthode des composantes symétriques est utilisée pour transformer le système triphasé déséquilibré en système triphasé équilibré.

Cette méthode est utilisée pour les calculs de court-circuit.

VI-1- décompositions des grandeurs électriques

Soit trois tension des trois phases . V_A ; V_B et V_C .

Il est possible d'exprimer ces trois tensions pour la somme des tensions comme suit :

$$\text{Soit : } \left\{ \begin{array}{l} V_{A=} V_{A+} + V_{A-} + V_{A0} \\ V_{B=} V_{B+} + V_{B-} + V_{B0} \\ V_{C=} V_{C+} + V_{C-} + V_{C0} \end{array} \right. \quad (\text{VI.1})$$

Note : $V_{A+=} V_d$; $V_{A-=} V_i$; $V_{A0=} V_o$

d : directe
 i : indirecte
 o : omopolaire

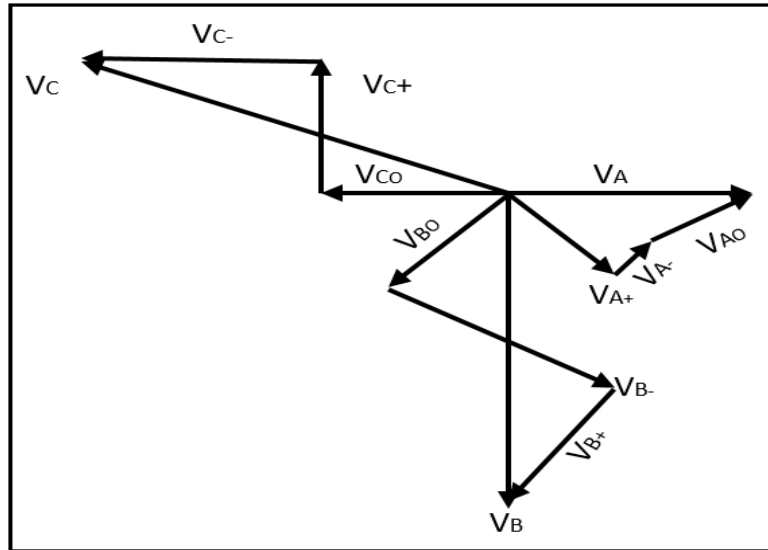


Figure VI. 1 : Système déséquilibré Des trois tensions et différent possible de décomposition des derniers

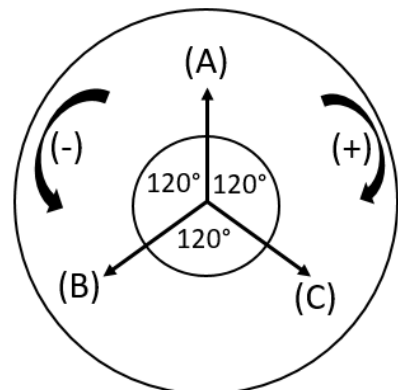
Il existe plusieurs méthodes pour décomposer ses trois voltages des trois phases pour la simplification ; ou introduit un opérateur complexe a définie par :

$$e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (\text{VI.2})$$

VI-1-1 Composantes directes

- La séquence des voltages V_{A+} ; V_{B+} et V_{C+} . Des systèmes équilibrés positive (directe) ; les amplitudes des phases sont égale et décalé de 120° (apparue dans la séquence A-B-C.

$$\left. \begin{aligned} V_{B+} &= a^2 V_{A+} \\ V_{C+} &= a V_{A+} \end{aligned} \right| (\text{VI.3})$$

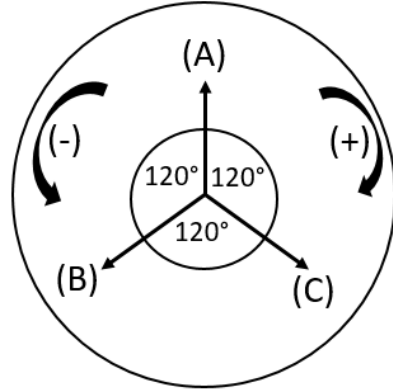


VI-1-2 Composantes inverses

- De la même manière la séquence voltage V_{A-} ; V_{B-} et V_{C-} des systèmes équilibrés négative (indirecte) ;

La séquence et C-B-A

$$\left. \begin{aligned} V_{B+} &= a^2 V_{A-} \\ V_{C+} &= a V_{A-} \end{aligned} \right| \quad (\text{VI.4})$$



VI-1-3 composantes homopolaires

La séquence des voltages V_{A+} ; V_{B+} et V_{C+} . Sont égale en phase et ampli trole :

$$\left. \begin{aligned} \text{Soit : } \quad V_{B0} &= V_{A0} \\ V_{C0} &= V_{A0} \end{aligned} \right| \quad (\text{VI.5})$$

D'où :

Les tensions d'origines V_A ; V_B et V_C sont exprimé par :

$$\left\{ \begin{aligned} V_A &= V_{A+} + V_{A-} + V_{A0} = V_d + V_i + V_o \\ V_B &= a^2 V_{A+} + a V_{A-} + a V_{A0} = a^2 V_d + a V_i + V_o \\ V_C &= a V_{A+} + a^2 V_{A-} + V_{A0} = a V_d + a^2 V_i + V_o \end{aligned} \right| \quad (\text{VI.6})$$

La résolution de ce système d'équations nous donne :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{A+} = \frac{1}{3}(V_A + aV_B + a^2V_C) = V_d \\ V_{A-} = \frac{1}{3}(V_A + a^2V_B + aV_C) = V_i \\ V_{Ao} = \frac{1}{3}(V_A + V_B + V_C) = V_o \end{array} \right. \quad (\text{VI.6})$$

Tel que :

- **Propriété d'opérateurs a**

$$a^2 = a^{-1}$$

$$a^3 = a^1$$

$$1 + a + a^2 = 0$$

- **Ecriture simplifié**

$$V_A = V_{A+} + V_{A-} + V_{Ao} = V_d + V_i + V_o$$

$$V_B = a^2V_+ + V_- + V_o =$$

$$V_C = aV_+ + a^2V_- + V_o$$

Tel que :

$$a^2 = a^{-1}$$

$$a^3 = 1$$

VI-2- Schémas équivalent des séquences

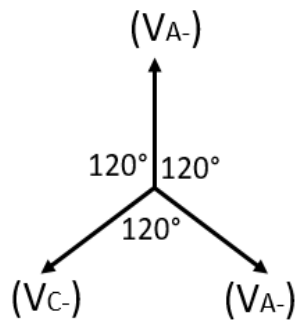


Fig. VI-2:
séquence négative des
tensions des phases

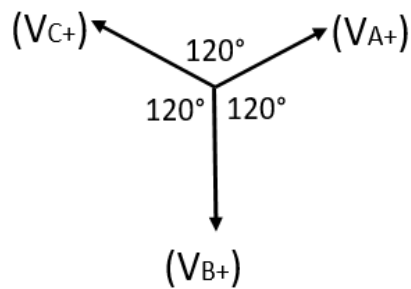


Fig. VI-3:
séquence positive des
tensions des phases

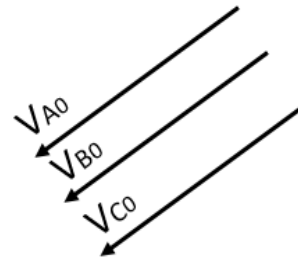


Fig. VI-4:
séquence zéro(homopolaire)
des tensions des phases

La méthode des composantes symétriques est appliquée aussi pour les courants de la même manière

VI-3- Applications

$$I_A = 150 \angle 45^\circ \text{ A}$$

$$I_B = 250 \angle 150^\circ \text{ A}$$

$$I_C = 100 \angle 300^\circ \text{ A}$$

Calculez les composants positives ; négative ; zéro des courants pour chaque phase

Solution :

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C)$$

$$I_0 = \frac{1}{3}(106.04 + j106.07 + j106.07 - 216.51 + j125 + 50 - j86.6) = 52.2 \quad [112.7^\circ \quad [A]$$

$$I_+ = \frac{1}{3}(I_A + aI_B + a^2I_C) = I_d$$

$$I_+ = \frac{1}{3}(150 + 250 + 100) = 48.02 \quad [-87.6^\circ \quad [A]$$

$$I_- = \frac{1}{3}(I_A + a^2I_B + aI_C) = I_i$$

$$I_0 = 163.21 \quad [40.45^\circ \quad [A]$$

Chapitre VII : Défaut équilibrée est déséquilibré

Introduction

VII -1-Différent forme de court-circuit et leur courant

VII -2-Calculs de court- circuit

VII -2-2-Méthode de composantes symétrique

VII -2-2-Principe de superposition

VII -3-Défaut symétrique

VII -3-1-Court-circuit triphasé

VII -4- Défaut symétrique

VII -4-1-Court-circuit triphasé isolé

VII -4-2-Court-circuit triphasé de la terre

VII -4-3-Court-circuit monophasé

INTRODUCTION

Un court-circuit et un bouclage accidentelle de deux ou plusieurs conducteurs entre le moteur et il la source

Formes de court-circuit

- Court-circuit monophasé isolé ou la terre ils sont de la basse tension
- court-circuit triphasé isolé ou à la terre
- court-Circuit triphasé ou à la terre ils sont rares représentant que 5 % de qui peuvent effectuées le réseau

VII -1-Différentes formes des courts-circuits et leurs courent

A-Court-circuit phase terre :

C'est le défaut de plus fréquent avec 65 % des défauts effectués le réseau

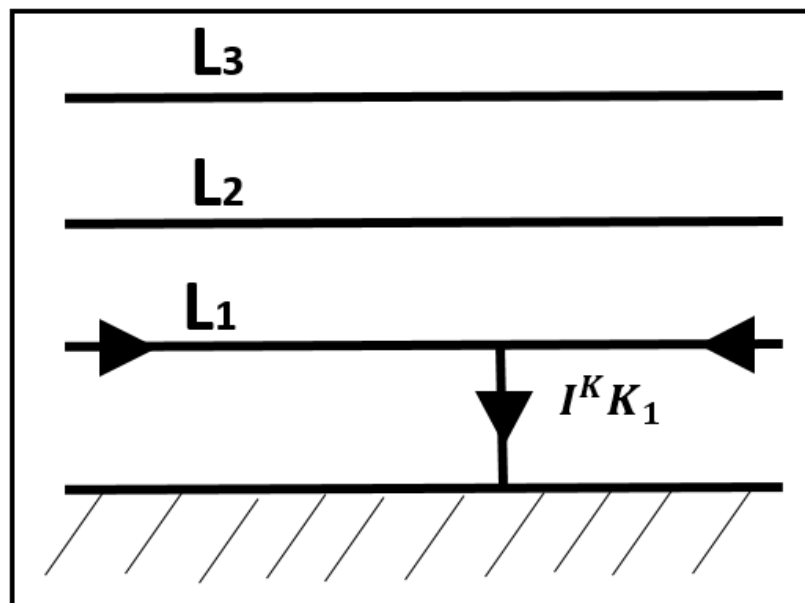


Figure VII-1 : court-circuit phase terre

B-Court-circuit triphasé-terre :

C'est la liaison entre deux phases et la terre avec 15% de défauts effectuer le réseau

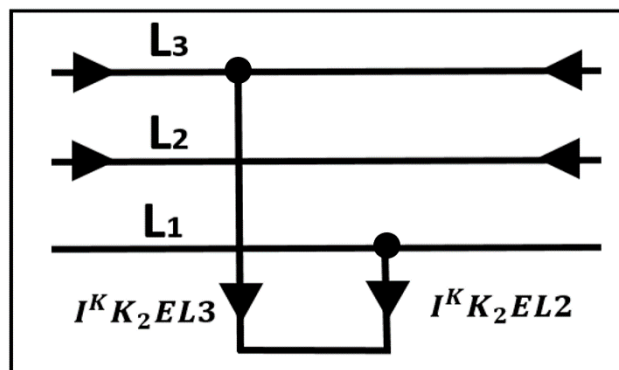


Figure VII-2 : court-circuit triphasé isolé

C-Court-circuit triphasé ; isolé :

Est la liaison de deux phases pourcentage de 10 % de fou effectuer le réseau

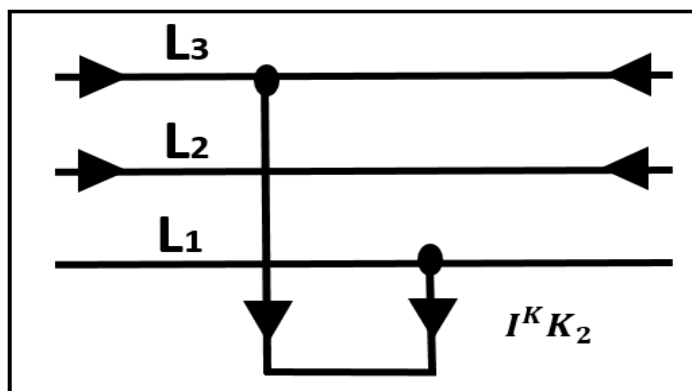


Figure VII-3 : court-circuit terre triphasé ; isolé

D-Court-circuit triphasé:

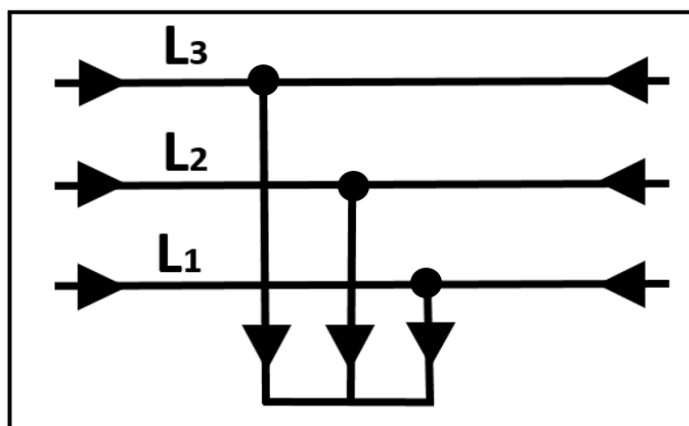


Figure VII-4 : court-circuit triphasé

VII -2-Calcul de court-circuit

Le Courant de court-circuit dépend de l'intensité est la durée de court-circuit pour ce calcul ; la méthode de composantes symétrique est le principe de superposition sont utilisées

VII -2-1-Méthode de composante symétrique :

Soit les grandeurs direct : V_d ; I_d ; Z_d

- **système direct** : Il est obtenu par une progression symétrique de raison a^2
(1, a^2 , a) ; V_d ; I_d ; Z_d
 - **Un système inverse** : il est obtenu au moyen d'une progression géométrique de raison a
 a (1, a , a^2) ; I_i ; V_i ; Z_d
 - **Un système homopolaire** : V_o ; I_o ; Z_o
- ✓ Les Composantes symétrique des tensions V_1 ; V_2 et V_3 des trois phases sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_1 = V_d + V_i + V_o \\ V_2 = a^2 \cdot I_d + a \cdot I_i + I_o \\ V_3 = a \cdot I_d + a^2 \cdot I_i + I_o \end{array} \right. \quad (\text{VII.1})$$

- ✓ Les Composantes symétrique des tensions I_1 ; I_2 et I_3 des trois phases sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_1 = I_d + I_i + I_o \\ I_2 = a^2 \cdot I_d + a \cdot I_i + I_o \\ I_3 = a \cdot I_d + a^2 \cdot I_i + I_o \end{array} \right. \quad (\text{VII.2})$$

✓ Les Composantes symétrique des tensions $Z_1 ; Z_2$ et Z_3 des trois phases sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_1 = Z_d + Z_i + I_o \\ I_2 = a^2 \cdot Z_d + a \cdot Z_i + Z_o \\ I_3 = a \cdot Z_d + a^2 \cdot Z_i + Z_o \end{array} \right. \quad (\text{VII.3})$$

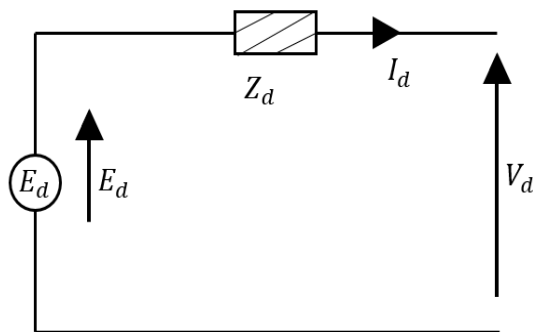
Tels que :

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = 1 \dots \dots 120^\circ$$

VII -2-2-Principe de superposition :

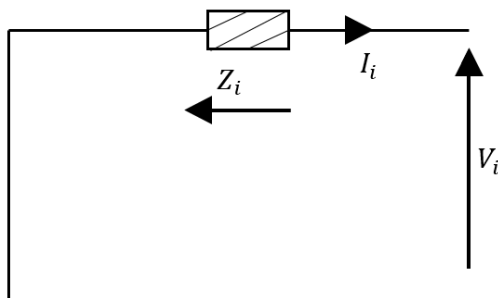
On distingue

1) Séquence positive



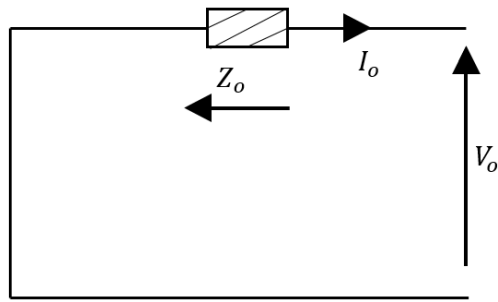
$$Z_d \cdot I_d + V_d = E_d \quad (\text{VII.4})$$

2) Séquence négative



$$Z_i \cdot I_i + V_i = 0 \quad (\text{VII.5})$$

3) Séquence zéro



$$Z_o \cdot I_o + V_o = 0 \quad (\text{VII.6})$$

Le système d'équation de principe de superposition est :

$$\left\{ \begin{array}{l} E_d = Z_d \cdot I_d + V_d \\ 0 = Z_i \cdot I_i + V_i \\ 0 = Z_o \cdot I_o + V_o \end{array} \right. \quad (\text{VII.7})$$

VII -3- Défaut symétrique

VII -3-1-Court-circuit triphasé

Soit le circuit suivant :

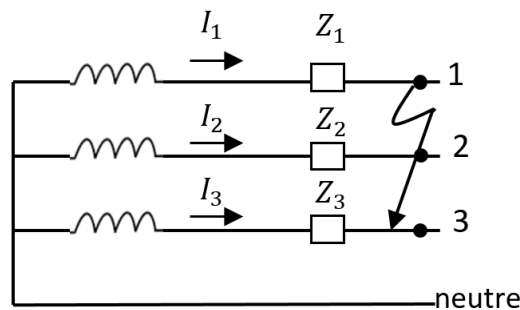


Fig.(VII.5) : Court-circuit triphasé

$$\text{Pour un Court-circuit triphasé on a : } V_1 = V_2 = V_3 = 0 \quad (\text{VII.8})$$

Les Composantes symétrique

$$\left\{ \begin{array}{l} V_d + V_i + V_o = \mathbf{0} = V_1 \\ a^2 V_d + a V_i + V_o = \mathbf{0} = V_2 \\ a V_d + a^2 V_i + V_o = \mathbf{0} = V_3 \end{array} \right. \quad (\text{VII.9})$$

La solution du système nous donne : $V_o = 0 \Leftrightarrow V_d = 0 \Leftrightarrow V_i = 0$

Remplaçons les valeurs dans le système on aura :

$$\left\{ \begin{array}{l} E_d = Z_d \cdot I_d \\ I_i = \mathbf{0} \\ I_o = \mathbf{0} \end{array} \right. \quad (\text{VII.10})$$

D'où le courant de court-circuit triphasé du système :

$$I_{CC3} = I_d = \frac{E_d}{Z_d} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_d} \quad (\text{VII.11})$$

$$\text{Tels que : } U_n = \sqrt{3} \cdot V_n = \sqrt{3} \cdot E_d \Leftrightarrow E_d = \frac{U_n}{\sqrt{3}}$$

VII -4- Défaut symétrique

VII -4-1-Court-circuit triphasé isolé

Soit le circuit suivant :

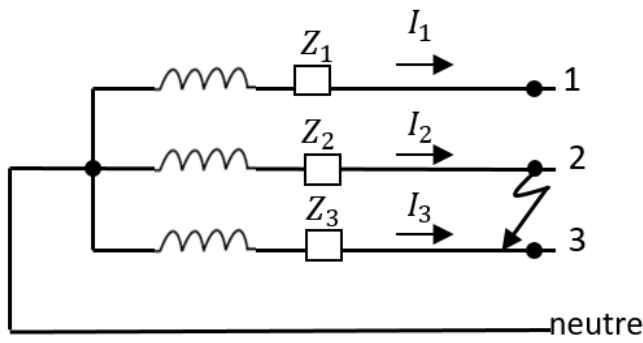


Fig.(VII.6) : Court-circuit triphasé isolé

À partir de ce circuit on peut écrire :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_1 = V_3 \dots\dots\dots(\text{VII.12}) \\ I_1 = -I_3 \dots\dots\dots(\text{VII.13}) \\ I_1 = 0 \dots\dots\dots(\text{VII.14}) \end{array} \right.$$

Nous introduisons $I_1 = 0$ dans le système (VII. 2) .nous obtenons :

Composants symétriques :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{I_1 = I_d + I_i + I_o = 0} \\ \mathbf{I_2 = a^2 \cdot I_d + a \cdot I_i + I_o} \\ \mathbf{I_3 = a \cdot I_d + a^2 \cdot I_i + I_o} \end{array} \right. \quad (\text{VII.15})$$

La résolution du système (VII.15) nous donne

$$\left\{ \begin{array}{l} I_0 = 0 \\ I_i = -I_d \end{array} \right. \quad (\text{VII.16})$$

Remplaçons le système (VII.16) dans (VII.13) nous obtenons :

$$I_1 = -I_3 = -j\sqrt{3} \cdot I_d = (a^2 - a) \cdot I_d \dots\dots\dots(\text{VII.17})$$

À partir de système d'équation (VII.1) nous faisons $V_2 = V_3$ nous obtenons $V_d = V_i$ (VII.18)

Remplaçons les expressions (VII.16) dans (VII.17) et (VII.18) nous obtenons le courant de court-circuit :

$$E_d = (Z_d + Z_i) \cdot I_d \quad I_d = \frac{E_d}{(Z_d + Z_i)} = \frac{V_n}{(Z_d + Z_i)}$$

Et $I_3 = \sqrt{3} \cdot I_d = \sqrt{3} \cdot \frac{V_n}{(Z_d + Z_i)} = I_{3\text{ CC}} \quad (\text{VII.19})$

VII -4-2-Court-circuit triphasé de la terre

Soit le circuit suivant :

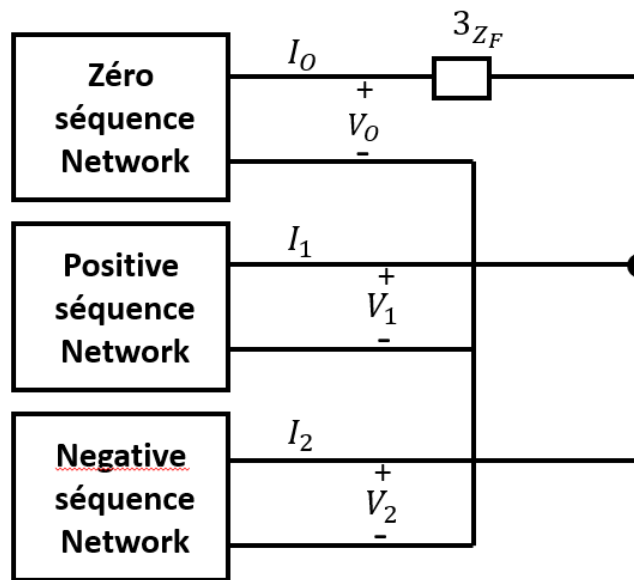


Fig.(VII.7) : Court-circuit triphasé à la terre

Ce type de défaut fait intervenir l'impédance Z_0

En cas de défaut entre la phase (1) et (2)

$$|I_1| = |-I_2| = \frac{\sqrt{Z_i^2 + Z_0 Z_i + Z_0^2}}{Z_d \cdot Z_i + Z_i \cdot Z_0 + Z_d \cdot Z_0} \cdot \sqrt{3} \cdot V_n \dots \dots \dots (\text{VII.20})$$

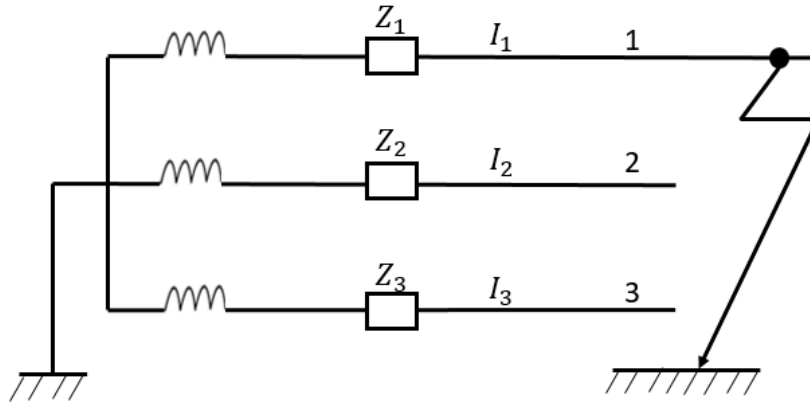
En cas de $Z_d = Z_i$

$$I_1 = I_2 = \frac{\sqrt{Z_i^2 + Z_0 Z_d + Z_0^2}}{Z_i^2 + 2Z_0 \cdot Z_d} \cdot \sqrt{3} \cdot V_n \dots \dots \dots (\text{VII.21})$$

VII -4-3-Court-circuit monophasé

La valeur de court-circuit dépend du régime du neutre par le défaut :

Soit :



A partir de ce circuit on a :

$$I_1 = I_2 = 0 \dots (VII.22)$$

$$V_1 = 0 \dots (VII.23)$$

Remplaçons l'équation (VII.22) dans le système d'équation (VII.2)

nous obtenons :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_1 = I_d + I_i + I_o \dots (3) \\ I_2 = a^2 \cdot I_d + a \cdot I_i + I_o = 0 \dots (1) \\ I_3 = a \cdot I_d + a^2 \cdot I_i + I_o = 0 \dots (2) \end{array} \right. (VII.24)$$

Remplaçons l'équation (VII.23) dans (VII.1) nous obtenons :

$$V_1 = V_d + V_i + V_o \dots (4)$$

La soustraction de l'équation (1) et (2) nous donne :

$$I_d = I_i \dots (VII.25)$$

$$D'où : I_d = I_i = I_o \dots (VII.26)$$

De l'équation (1) nous obtenons :

$$I_1 = 3.I_d \Rightarrow I_d = \frac{1}{3}.I_1$$

$$\text{D'où : } I_d = I_i = I_0 = \frac{1}{3}.I_1 \dots (\text{VII.27})$$

Introduisons l'équation (VII. 26) dans le système d'équation (VII.7) et avec $V_1 = V_d + V_i + V_o = 0$

Nous donne :

$$I_d = \frac{E_d}{Z_d+Z_i+Z_o} \quad \text{avec} \quad I_1 = 3.I_d = I_{1c_c}$$

$$\text{d'où} \quad I_{1c_c} = 3.\frac{E_d}{Z_d+Z_i+Z_o} \dots(\text{VII.26})$$

$$\text{avec} \quad E_d = \frac{U_n}{\sqrt{3}}$$

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Turan Gönen, Electric power distribution system engineering, McGraw-Hill 1986.
2. Hadi Saadat, Power system analysis, McGrawHill 2000.
3. F.Kiessling et al, Overhead Power Lines.Planning, design, construction, Springer 2003.
4. Mohamed. El-Hawary Introduction To Electrical Power Systems, IEEE PRESS, series Editor on power engineering.
5. J. Duncan Glover, Mulukutla s. Sarma , Thomas J. Overbye Power system analysis and design, Fifth edition, and Fourth edition, Northeastern University of Illinois ,New Nork 2008.
6. Jean-Louis Lilien , Transport et Distribution de l'Énergie Electrique, Manuel de travaux pratiques destiné au cours , Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, Année académique 1999/2000
7. Anderson, P.M. Analysis of Faulted Power Systems. New York: IEEE Press,1973.
8. Weeks,W.L. Transmission and Distribution of Electrical Energy. New York, Harper & Row Publishers, 1981 .
9. James H. Harlow, Electric Power Transformer Engineering, Third Edition, CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business 2012.
10. John D. McDonald, Electric Power Substations Engineering, Third Edition, CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business 2012.
11. Leonard L. Grigsby, Power Systems, Third Edition, CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business 2012.
12. Anderson, P.M. and Fouad. A.A Power System Control and Stability. Ames, Iowa,The Iowa State University Press, 1977.
13. El-Hawary, M.E. Electrical Power Systems Design and Analysis. New York, IEEE Press, 1996.
14. Bergseth, F.R. and Venkata, S.S. Introduction to Electric Energy Devices. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1987.