

Réseau

Électrique

chapitre I :

Généralités sur les réseaux électriques

I. 1 : Introduction

I. 2 : Architecture générale du réseaux d'énergies électriques

I. 3. les plages de tension dans les réseaux électriques

I. 4. Différents types de réseaux électriques. دورات les étapes de réseau électrique (Fonctions)

1^{er} étape

Production

le E. E

2^{eme} étape

(long trajet) Transporte

le E. E

3^{eme} étape

distribution

de E. E

Structures

(lignes, transformateur)

Puissance

Abrissées

E

à l'origine
Effet courant

Conducteur

Phase 1

phase 2

phase 3

Ternes

3 phase

ligne :

1) phase (conducteur) (3 phases)

2) support

3) isolateur

courant Alt

Foudre = éclatage
Éclateurs

support $\xrightarrow{\text{dans}}$ 2 Tennes \rightarrow Tennes: 3phase
 $\xrightarrow{\text{par}} 6\text{ phase}$

A cheminer de E-E

Électricité

- 1) Puissance (Active, réactif, apparente)
- 2) tension
- 3) qualité

les plages de tension dans les réseaux

$$UBT \leq 1\text{ kV}$$

$$1\text{ kV} \leq UMT \leq 30\text{ kV}$$

$$30\text{ kV} \leq UHT \overset{\text{moyen}}{\leq} 300\text{ kV}$$

$$TBT \quad U_n \leq 50\text{ V}$$

⊗ Transport le THF pour minimiser les pertes

- ① Réseau de transports
- ② Réseau d'interconnexions
- ③ Réseau de répartitions
- ④ " de Distributions
- ⑤ " Utilisateur

⑥ Réseaux Indust

Chapitre II : Modes Transport, Répartitions et distribution de l'énergie électrique

II. 1 Structure topologique des réseaux

II. 1. 1 Réseaux radiaux

II. 1. 2 Réseaux bouclés

II. 1. 3 Réseaux mailles

Topologie d'R.E

carte dBE

Transit de L'E.E
ou des puissance

↓ ↓ ↓ ↓

Pointe
d'interconne

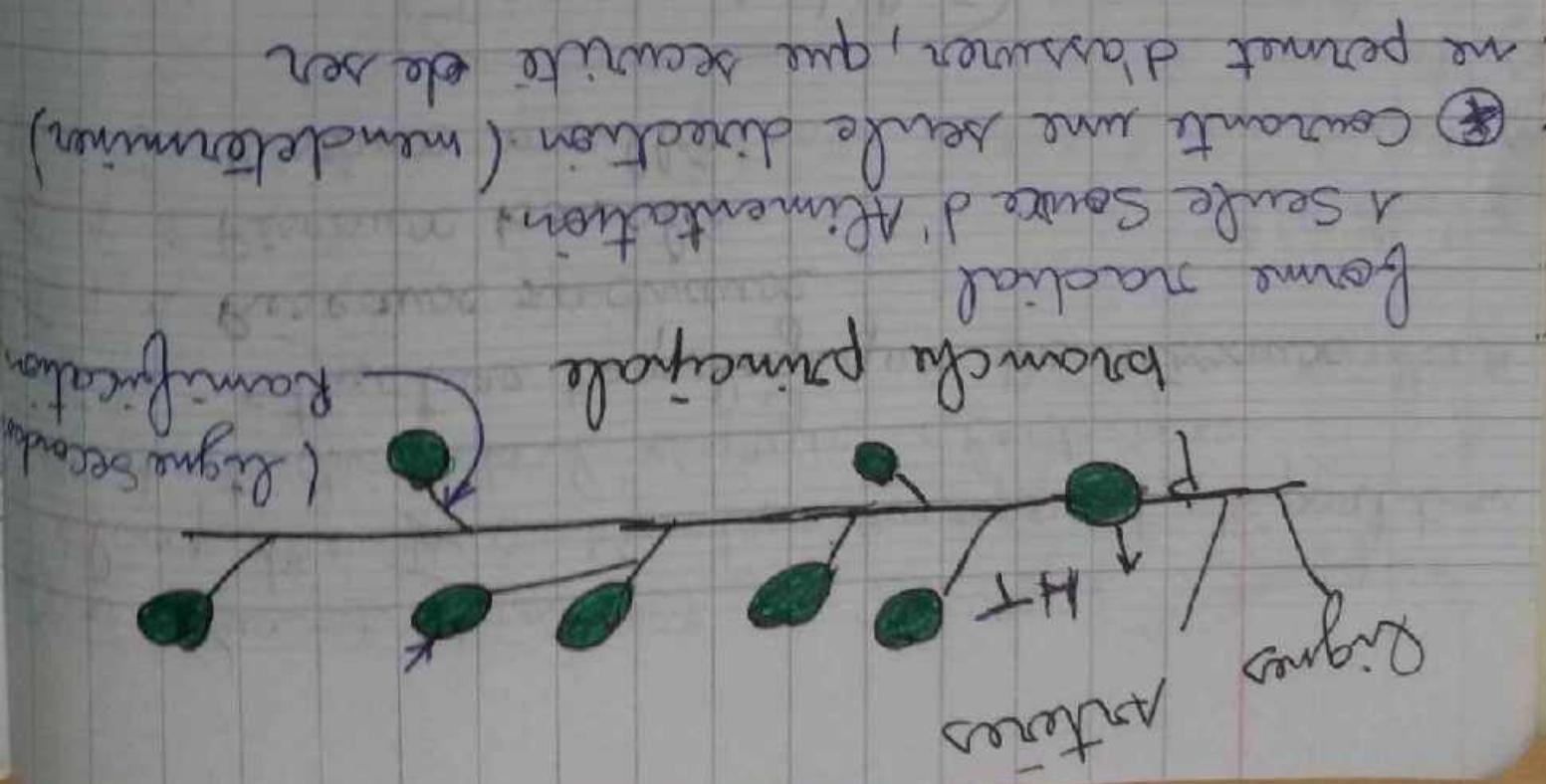
Réseau F

↓ Topologie

Réseau radial
(1 ou 2 sources)

Réseau bouclé R
(2 à 3 sources
différents 2 ou 3
boucles)

maille
(plusieurs
sources)



Chapitre III : Calculs des Réseaux Électriques

III. 1 Détermination des paramètres de la ligne

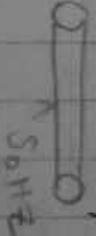
- d'un réseau électrique
- III. 1. 1 Résistance active d'une ligne électrique
 - * La résistance est l'impédance dans laquelle on ne peut emmagasiner de l'énergie
 - * La résistance d'un conducteur, en fonction alternatif et la température de service est déterminée à partir de la résistance en courant continu à 20°C, en tenant compte de l'influence de la température et des phénomènes liés 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 élevée à la périphérie qui au centre du conducteur, ce phénomène est appelé "effet de peau" (effet pelliculaire)
 - La résistance active de la ligne en courant continu est déterminée par

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}$$

ρ : résistivité du conducteur de phase [Ω.m]
Surface : S



ρ



ρ

l : longeur du conducteur en mètre

S : section du conducteur en mm²

* la résistance active de la ligne en courant alternatif est déterminée par :

$$R = r_0 \cdot l [Ω]$$

r_0 : Résistance linéique en [Ω/Km] lorsque la température de 20°C elle est fonction de cette dernière par la relation ci-dessous:

$$R_t =$$

$$R_t = R_0 [1 + \alpha_{20} (t - 20^\circ)]$$

* α_{20} : coefficient départ de la nature du matériau

* t : température

* R_0 : résistance à 20°C

ou bien

$$R_t = R_0 (1 + \alpha_0 t)$$

$$R_0 = R (1 + \alpha_0 t)$$

R_0 : résistance à 0°C

α_0 : coefficient de température à 0°C

III. 1.2 Reactance d'une ligne électrique.

$$X_L = L \cdot w \text{ pulsation : } 2\pi f$$

Inductance [H]

le champ \vec{H} créé par le courant de charge passant par le conducteur est à l'origine de l'apparition

de la reactance (Resistance Réactice)

La reactance linéique est calculée comme

$$\boxed{X = L \omega = L 2\pi f} \quad [\Omega/\text{km}]$$

L : Inductance [H/km]

ω : pulsation / f : fréquence [Hz]

* Inductance d'une phase

L'inductance est calculée

comme sur

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{R}{r'} \quad [\text{H}/\text{km}]$$

$$r' = r \cdot e^{-0,25} = 0,7788 \cdot r$$

r' = rayon Imaginaire

r = rayon d'un conducteur

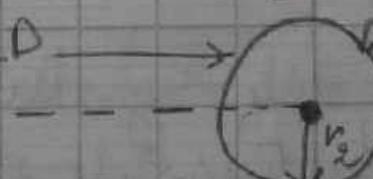
* Inductance d'une ligne monophasé

conducteur

N° 1

de rayon r_1

r_1



conducteur N°02

de rayon r_2

Inducteur pour une phase

$$L_1 = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r_1} \quad [\text{H}/\text{m}]$$

$$\text{ou } r_1 = 0,7788 r_1$$

conduit amélioré

$$\text{Phase 2: } L_2 = 2 \times 10^{-7} \frac{D}{r_2} \cdot [\text{H}/\text{m}]$$

$$\ln \frac{P}{r_1} + \ln \frac{P}{r_2} = \ln P \cdot \frac{2}{r_1 + r_2} = \frac{2 \ln P}{2 \times 10^7} = 4 \times 10^{-7}$$

$$\frac{r_2}{r_1} = 0,7788 \cdot r$$

Inductance de la ligne monophasée

$$L = L_1 + L_2 = 2 \times 10^7 \left[\ln \frac{P}{r_1} + \ln \frac{P}{r_2} \right] [H/m]$$

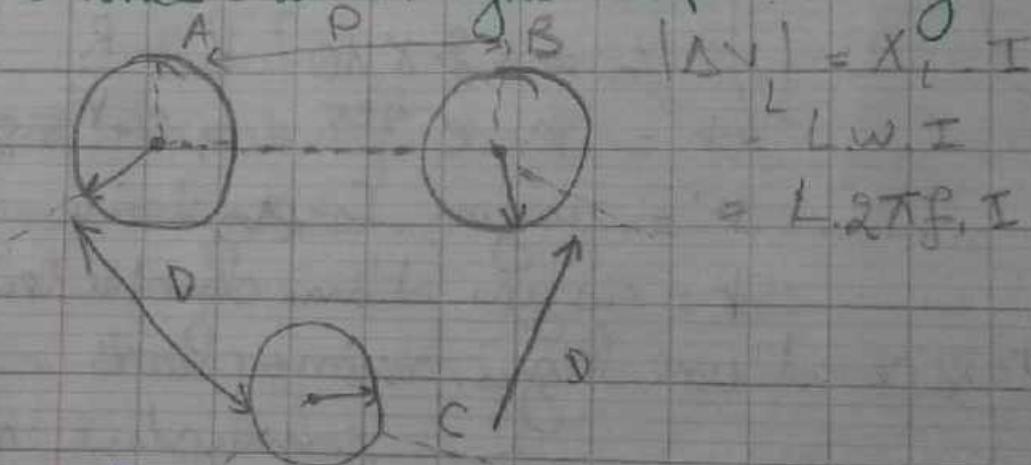
$$L = 4 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{P}{\sqrt{r_1} \cdot \sqrt{r_2}} \right) r_i$$

$$\text{Si } r_1 = r_2 = r \Rightarrow \sqrt{r_1} \cdot \sqrt{r_2} = r$$

$$L = 4 \times 10^{-7} \ln \frac{P}{r} [H/m]$$

IV Détermination des paramètres de la ligne d'un réseau électrique

* Inductance d'une ligne Triphasé symétrique



$$| \Delta V | = X_L I$$

$$L I \omega I$$

$$= L \cdot 2\pi f \cdot I$$

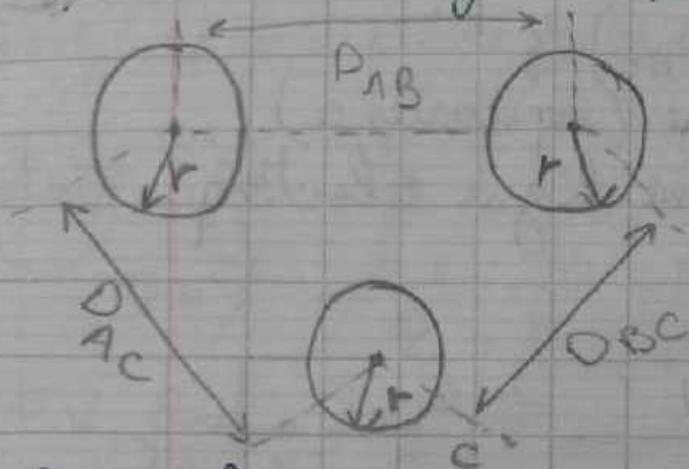
Une ligne triphasée est dite symétrique si la distance entre les conducteurs de ces trois est égales. Ainsi la somme algébrique des courants des trois phases pour nuls

- l'inductance pour chaque phase est donnée comme suit

$$L = L_A = L_B = L_C = 2 \times 10^7 \ln \frac{P}{r} [H/m]$$

$$r = 0,7788 \cdot r$$

Inductances d'une ligne Triphasé désymétrique (déséquilibre)

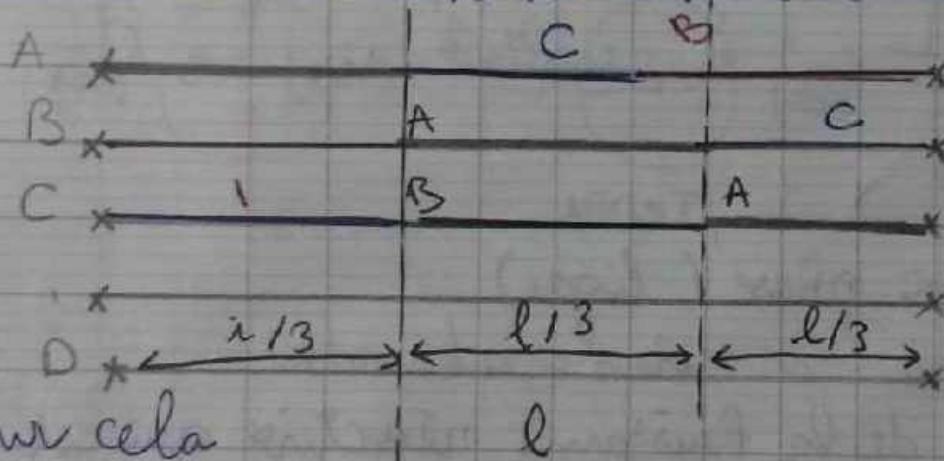


$$D_{AB} \neq D_{BC} \neq D_{AC} \Rightarrow$$

$$L_A \neq L_B \neq L_C \Rightarrow$$

$$\Delta V_A \neq \Delta V_B \neq \Delta V_C$$

(chutes de tensions au niveau de chaque phases)



Pour cela

on change la position du conducteur pour des distances égales (cette méthode s'appelle changement des positions des phases)

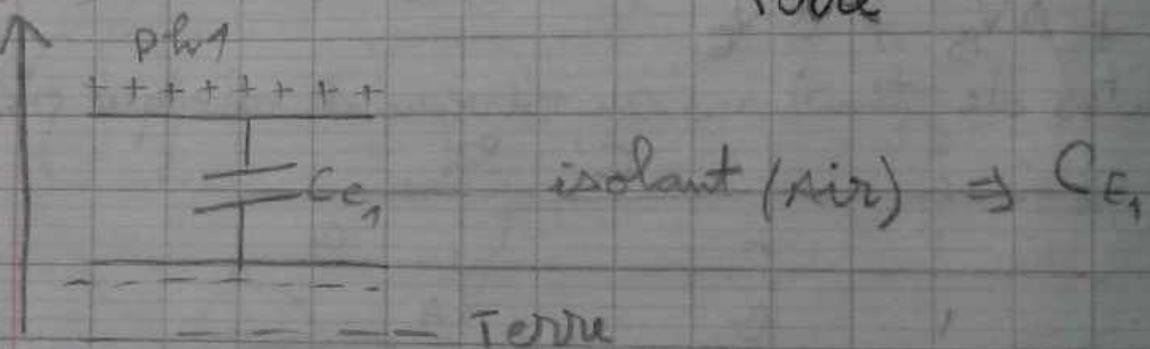
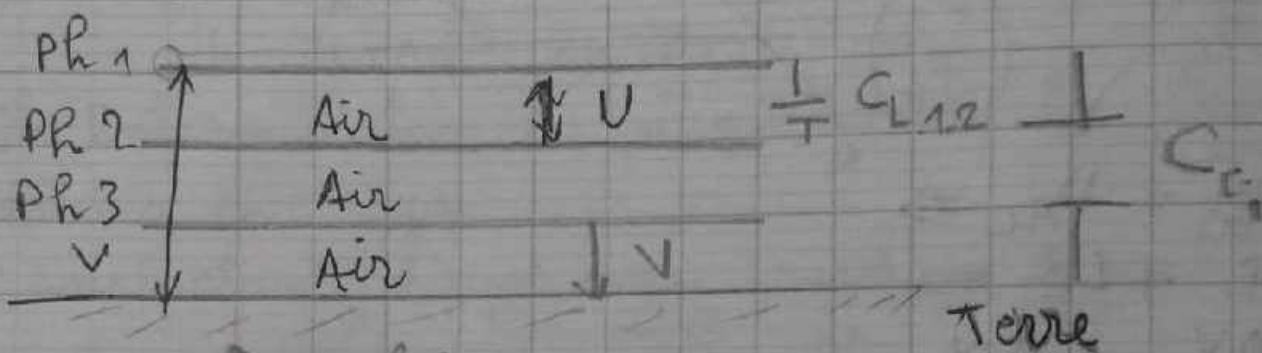
la valeur moyenne de l'inductance pour une phase avec le changement des positions des phases

$$L = L_A = L_B = L_C = 2 \times 10^{-9} \ln \frac{D_e}{r} \text{ [H/m]}$$

$$D_e = (D_{AB} + D_{BC} + D_{AC})^{\frac{1}{3}}$$

D_e = Distance moyenne (équivalence)

III.1.3. Capacité d'une ligne électrique



C_L : capacité entre phase (ligne)

C_E : capacité entre // et Terre (Earth)

* Capacité fournie de la Puissance réactive qui est proportionnelle au U_c^2

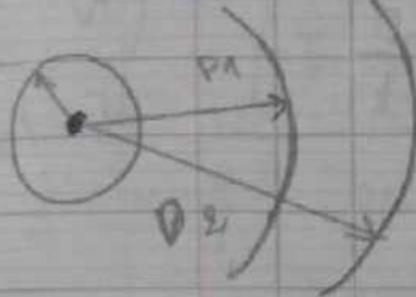
$$\begin{aligned} * Q_C &= X_C \cdot I^2 \\ &= X_C \cdot \frac{U_c^2}{X_C^2} \end{aligned}$$

$$Q_C = C \cdot W \cdot U_c^2$$

$$\begin{aligned} Q_C &= \\ C \uparrow \text{et } U_c \uparrow &\Rightarrow \\ Q_C \uparrow \Rightarrow \Delta V \uparrow \Rightarrow Z \uparrow & \end{aligned}$$

$C \propto$ et $U_C \uparrow \Rightarrow Q_C \uparrow$

capacité d'une ligne pour une phase



$$C = \frac{2\pi \cdot \epsilon}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad [F/m]$$

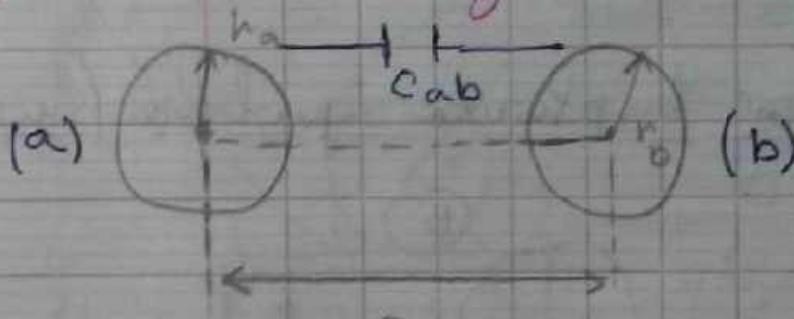
ϵ : perméabilité

$$\epsilon = \epsilon_n \cdot \epsilon_0$$

ϵ_n : perméabilité relative égale à 1 pour l'air

$$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-13} \quad [F/m]$$

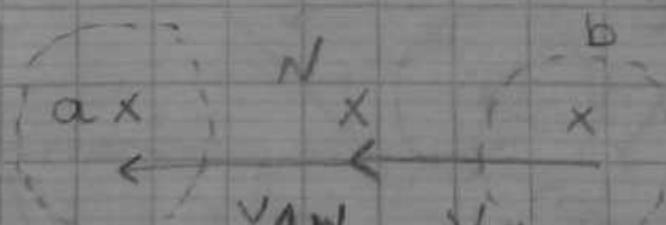
* capacité d'une ligne monophasé



Si

$$r_a = r_b = r$$

$$C_{ab} = \frac{\pi \epsilon_0}{\ln \frac{D}{r}} \quad [F/m]$$



$$(D_{aN} + D_{Nb} = D)$$

N : se trouve au milieu de la Distance D

$$\begin{aligned} V_{aN} &= \frac{1}{2} V_{ab} \\ V_{Nb} &= \frac{1}{2} V_{ab} \end{aligned}$$

$$\left\{ C_N = \frac{2\pi \epsilon_0}{\ln \frac{D}{r}} \right\} \Rightarrow C_N = 2C_{ab} \quad [F/m]$$

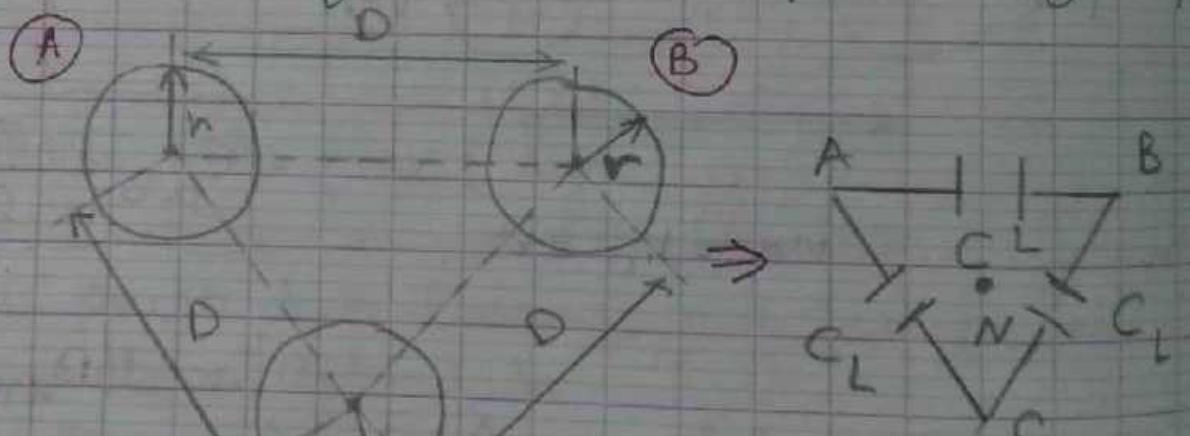
Réactance capacitive X_C

$$|X_C| = \frac{1}{C \cdot \omega} \quad [R/m]$$

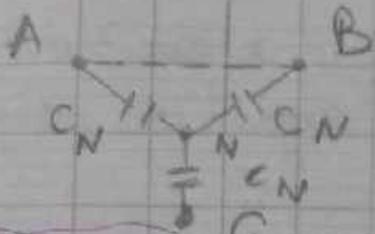
admittance capacitive

$$|Y_C| = \frac{1}{|X_C|} = C \cdot \omega \quad [R^{-1}/m]$$

capacité d'une ligne triphasée équilibrée (synchrone)



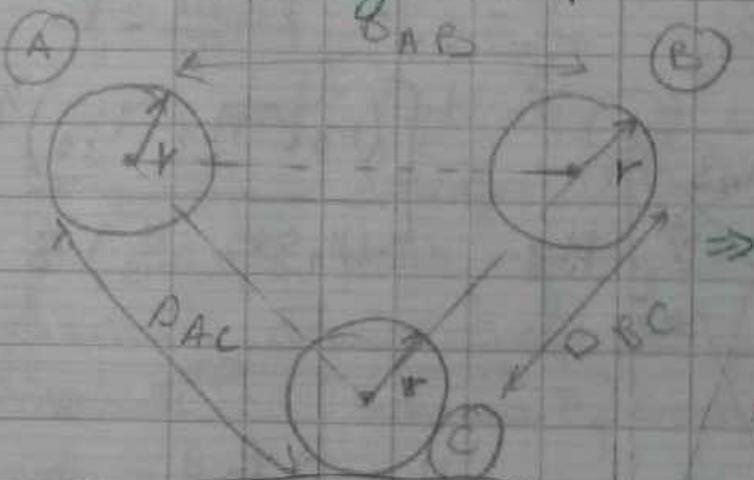
$$Y_L = \frac{\pi \cdot \epsilon_0}{\ln \frac{D}{r}} \quad [R^{-1}/m]$$



$$\left\{ C_N = 2 \cdot C_L \right\} [F/m]$$

$$C_N = \frac{2\pi \epsilon_0}{\ln \frac{D_e}{r}} [F/m]$$

1 capacité d'une ligne triphasé déséquilibrée



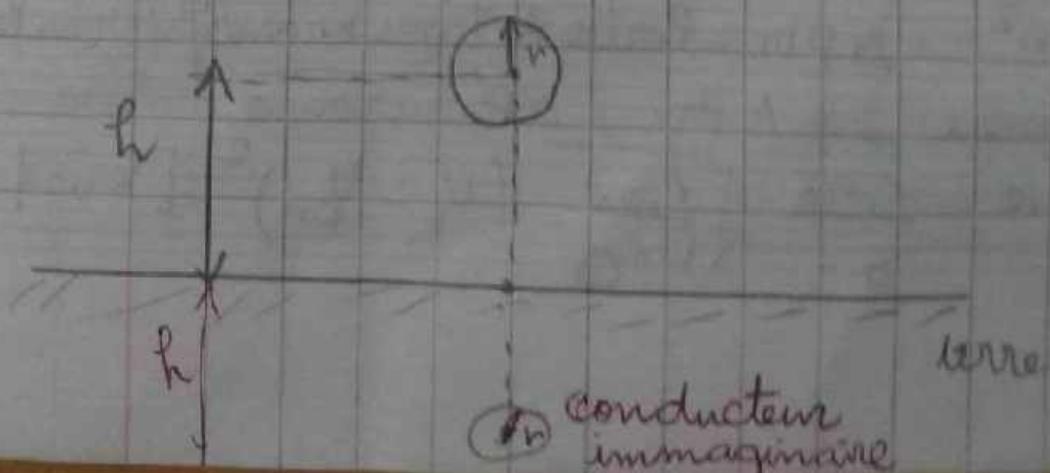
$$D_C = D_m = \sqrt[3]{D_{AB} \cdot D_{BC} \cdot D_{AC}}$$

$$C_L = \frac{\pi \epsilon_0}{\ln \frac{D_e}{r}} [F/m]$$

$$\left\{ C_N = 2 \cdot C_L = \frac{2\pi \epsilon_0}{\ln \frac{D_e}{r}} \right\}$$

* effet de la terre sur la capacité d'une ligne électrique

• cas d'un conducteur



$$\Delta P_{\text{convergence}} \leftarrow \Delta P_{\text{convergence}} - \frac{0.18}{(U_s - U_n)^2} \left[\frac{r_{\text{cen}}}{D_{\text{max}}} \right] [k_w | k_w]$$

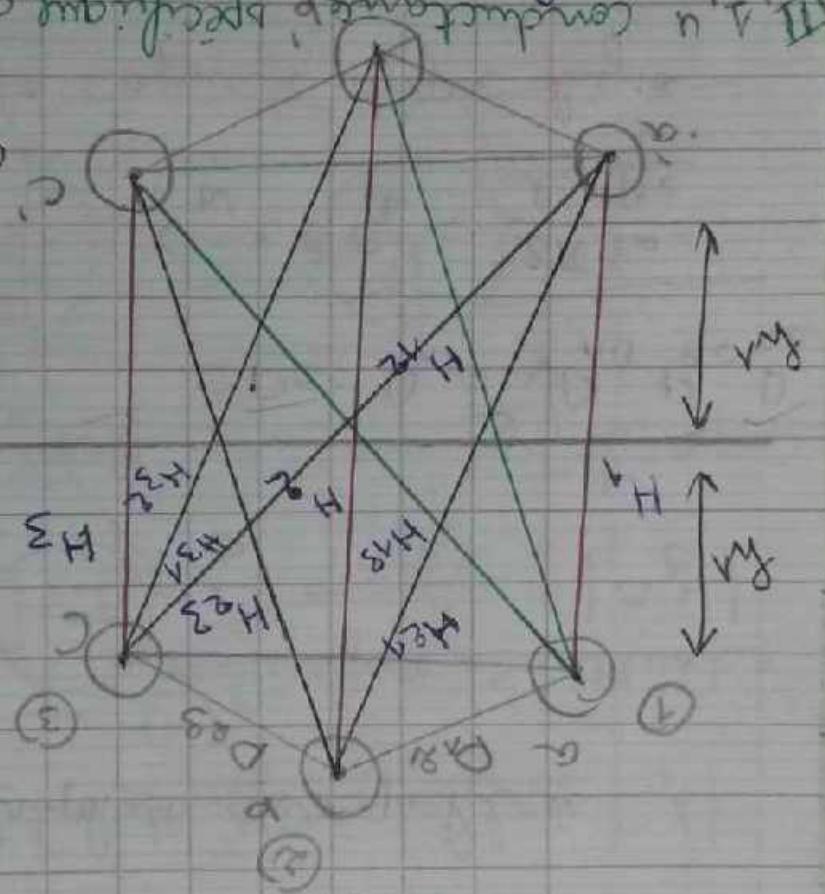
Δ Ph: Perla Active Formulas Venables

$$y_0 = \frac{u_{n/2}}{\sqrt{n}}$$

III. A. u conductance, specific and some longer electrode

Conducteur magnétique

$$\sqrt{y} \propto = \sqrt{H}$$



$$\left[\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \right]$$

$$C = \frac{q\sqrt{3}}{2} - \frac{\pi}{N}$$

card, our long experience

$$C = \frac{m}{\rho g}$$

$$X = l \cdot w / w = l \cdot \pi$$

$$Z = R + jX$$

$$X = X_0 \cdot \alpha$$

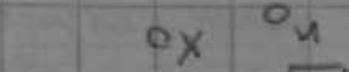
$$R = V_0 \cdot \beta$$

(MT, BT) Gc 35 kV

et de distribution

Réseau de ligne des

lignes à haute tension



$$R_0 = V_0 \cdot \beta$$

Gc 10 kV

Lignes en corde

Total (Perte)

et lignes de transmission

II A circuit électrique dans les lignes d'distribution

$$m_f = 0,8 \text{ pour un mésangeais français}$$

$m_f = 1$ lorsqu'il faut le faire

m_f : coefficient de courant continu du fil de source

$$(Power P = +25 C \quad S = 1)$$

S : coefficient continu du fil de transmission primaire

$$(m_f = 0,83 - 0,87)$$

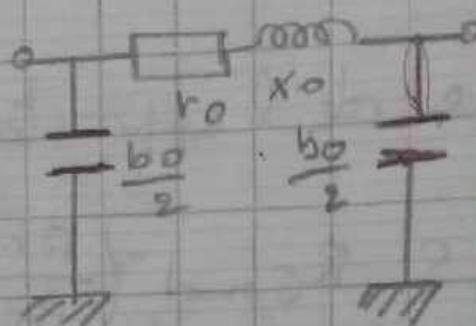
$$U_c = 48,9 \text{ m} \cdot m_f \cdot S \cdot R_{\text{cend}} \left(\frac{P_{\text{max}}}{R_{\text{eq}}} \right)$$

calculer

U_c : tension continue de la distribution de la

A : tension source

lignes aériennes
des réseaux de
Transport
 $U < 220 \text{ KV}$,
 $l < 250 \text{ Km}$
 $\approx 40 \text{ Km}$



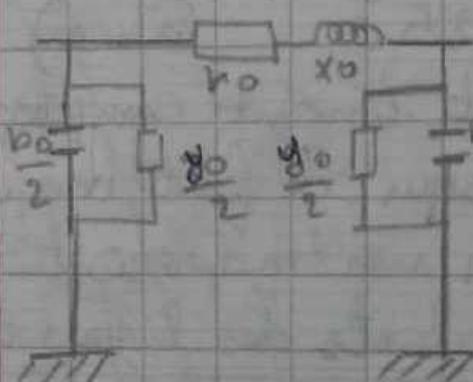
$$R = R_0 \cdot l \quad X = X_0 \cdot l$$

$$B = b_0 \cdot l$$

$$B = C_0 \cdot u \cdot l$$

$$= \frac{1}{X_0} \cdot l$$

lignes aériennes
des réseaux de
transport
 $U > 220 \text{ KV}$
 $l \geq 250 \text{ Km}$



$$R = R_0 \cdot l, \quad X = X_0 \cdot l$$

$$B = b_0 \cdot l$$

$$G = g_0 \cdot l$$

$$l: \text{longeur}$$

$$R: \text{Resistance}$$

$$B: \text{susceptance}$$

$$G: \text{conductance}$$

chapitre 04 : Modélisation des lignes

Électrique et transformateurs

II Modélisation des lignes Électriques

Introduction

Théoriquement, une ligne de transport doit être considérée comme un ensemble de résistances et réactances réparties le long de la ligne. Pour la forme d'un schéma électrique dont les paramètres sont :

Paramètres longitudinaux
appelés Z de la ligne

$$Z_L = R_L + jX_L = (R_0 \cdot l + jX_0 \cdot l)$$

R_L : Résistance de la ligne

X_L : Réactance de la ligne

$$X_L = Lw / w = 2\pi f; L = \text{Inductance}$$

* Paramètres transversaux appelés

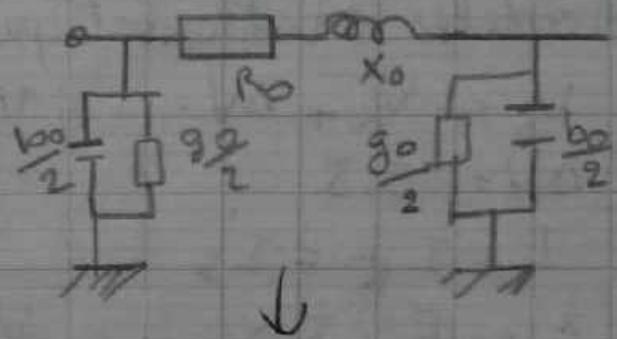
1) admittances

$$G = +jBL$$

$$G_L = g_0 \cdot l, g_0 = \frac{\Delta P_{tr}}{U_{tr}^2}, BC = b_0 \cdot l = C_0 \cdot w \cdot l$$

ΔP_{tr} : Pertes actives transversale (Perte couronne)

U_{tr} : tension nominal, l : longueur de la ligne



\downarrow

$$G + jBL$$

G_L : conductance
 B_L : susceptance
de la ligne

1.1 Etude de la ligne courte

une ligne courte c'est une ligne de longueur comprise entre 50 Km et 80 Km

schéma équivalent

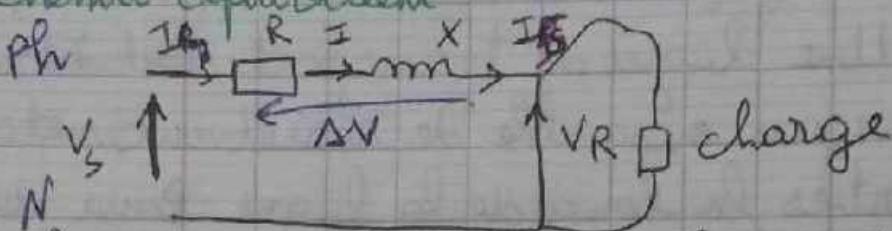


schéma équivalent d'une phase d'une ligne courte

Modèles mathématiques

$$V_s = V_R + \Delta V$$

$$\Delta V = Z \cdot I$$

$$I = I_R = I_s$$

$$Z = R + jX$$

$$X = L\omega$$

$$\omega = 2\pi f$$

V_s = tension simple à l'origine (début) de la ligne
"tension source"

V_R : Tension simple à l'extrémité (Fin) de la ligne
"Tension récepteur"

I_R = courant simple à l'origine de la ligne

I_s = courant simple à l'origine de la ligne
 I_R = ligne courant simple à l'extrémité de la ligne

ΔV : chute de tension

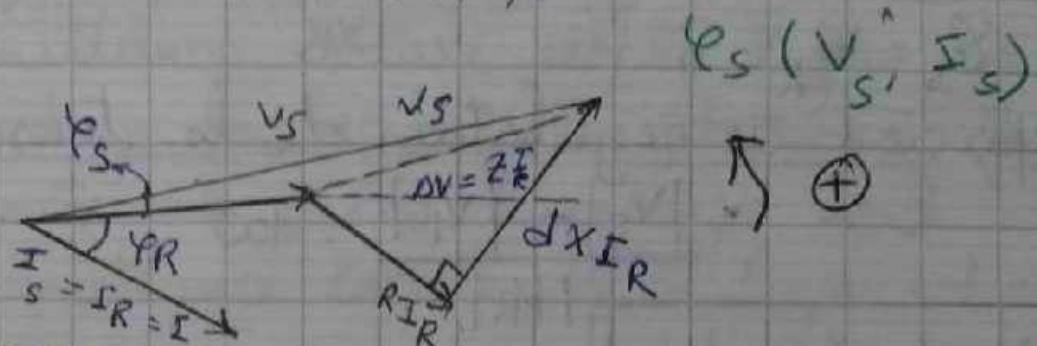
Z : Impédance en série

L : Inductance

ω : Pulsation

Diagramme vectoriel

1) Facteur de Puissance en Amplitude



S : Angle de charge
(Transport)

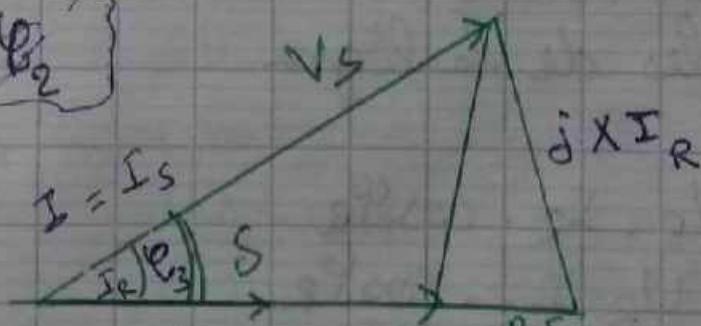
$$S (V_R^{\wedge}, V)$$

$$\epsilon_s = S + \epsilon_e$$

3) Facteur de Puissance égale à l'unité (1)

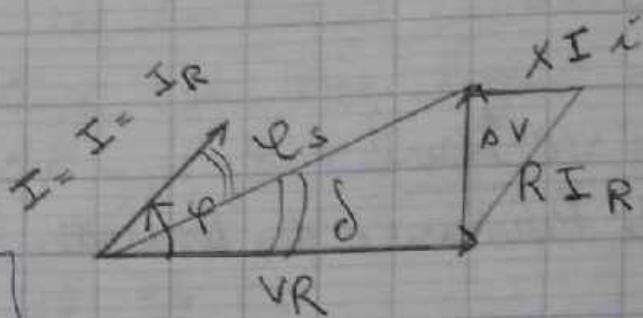
$$\epsilon_R = 0$$

$$\epsilon = S + \epsilon_2$$



$$S = \epsilon_s$$

Facteur de Puissance en Amplitude



$$\epsilon_s = \epsilon_R - \delta$$

coefficient de régulation de la tension

$$\epsilon \% = \frac{|V_s| - |V_R|}{|V_R|} \cdot 100$$

$$\Delta V = \epsilon \% |V_R|$$

Rendement de la ligne

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_R}{P_S} = \frac{P_R}{R_R + \Delta P_j}$$

P_R : Puissance de Recepteur

P_S : Puissance de Source

Δ P_j : Pertes Joules de la ligne

$$\begin{aligned} P_R &= 3 V_R \cdot I_R \cdot \cos \varphi_R \\ &= \sqrt{3} U_R I_R \cdot \cos \varphi_R \end{aligned}$$

$$P_S = 3 V_s \cdot I_s \cdot \cos \epsilon_s$$

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

IV 1.2 Etude de la ligne moyenne

les lignes moyennes sont caractérisées par les longueurs comprises entre 80 Km et 250 Km, il existe deux types : Type II et type I

Type II : admittance totale de la ligne est divisée en deux parties égales placées à l'origine et à l'extrémité de cette ligne.

Type I : admittance totale de la ligne est placée au milieu de la ligne

Schéma équivalent de la ligne moyenne type II

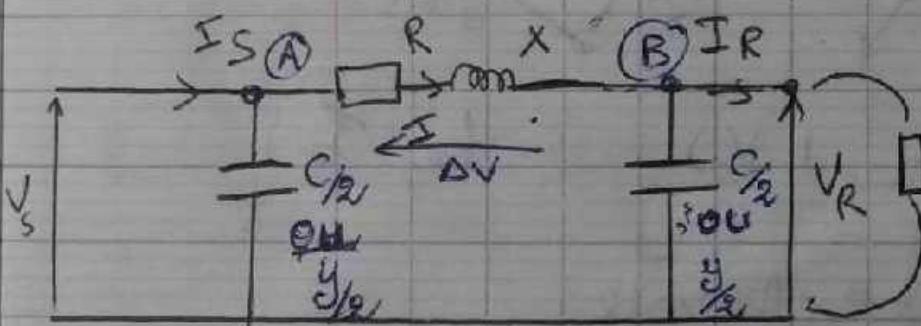


Schéma équivalent d'une phase d'un ligne moyenne Type II

Modèle mathématiques

$$V_s = V_R + \Delta V$$

$$\Delta V = Z \cdot I$$

$$Z = R + jX$$

$$X = L \cdot w$$

$$\omega = 2\pi f$$

Notion $N=2$

$$I = I_R + I_{CR}$$

$$V_s = V_R + Z \cdot I$$

$$I_{CR} = V_R \cdot \frac{Y}{2}$$

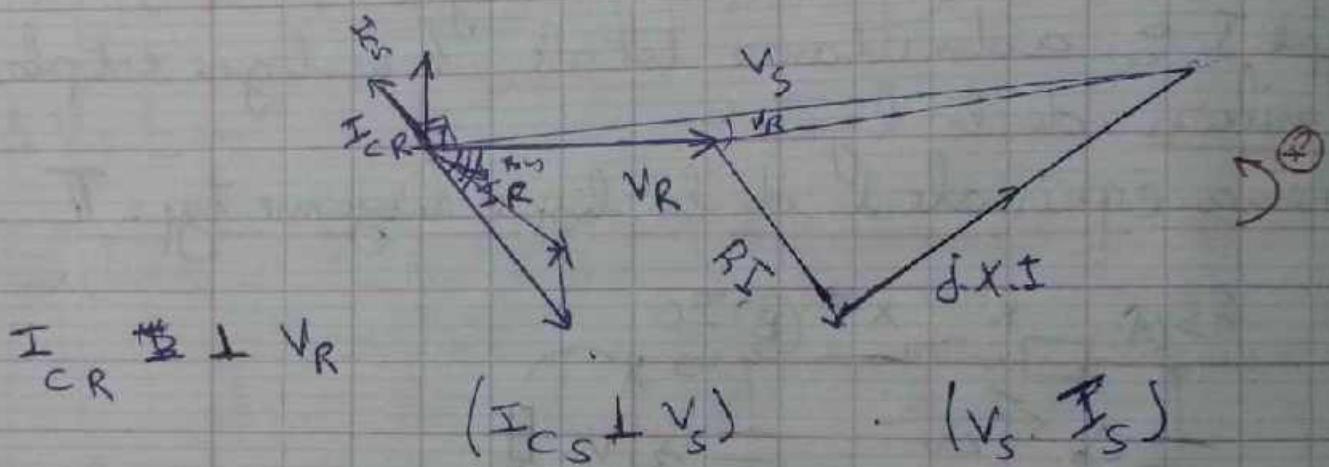
$$y = \frac{1}{X_C}$$

Nouvel $N = 1$

$$I_s = I + I_{CS}$$

Diagramme vectoriel

$$I_{CS} = V_s \cdot \frac{Y}{Z}$$



Facteur de Puissance en Arrière

Schéma équivalent d'une ligne moyenne type T

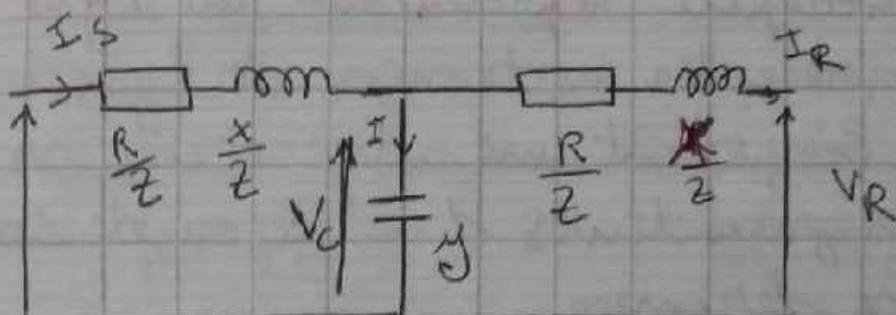


Schéma équivalent d'une phase pour une ligne moyenne
Modèle mathématique

$$V_S = V_C + \frac{Z}{2} \cdot I_S \quad (\Delta V_1 = \frac{Z}{2} \cdot I_S)$$

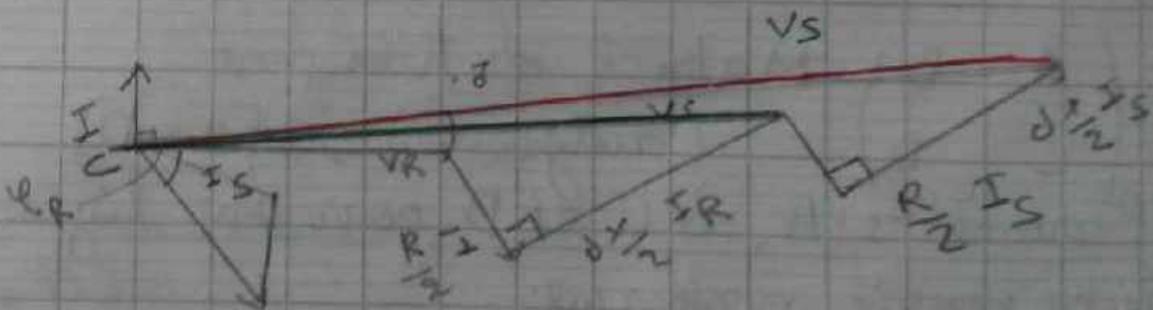
$$V_C = V_R + \frac{Z}{2} \cdot I_R \quad (\Delta V_2 = \frac{Z}{2} \cdot I_R)$$

$$I_S = I_R + I_C$$

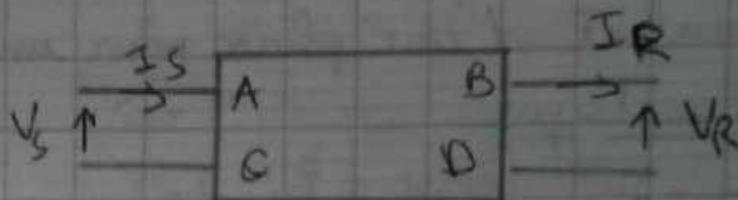
$$I_C = V_C \cdot \gamma$$

Diagramme vectoriel

$$I_C \perp V_C$$



III 1.3 Détermination des paramètres A B C est D d'un quadripôle représentant une ligne électrique
 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



quadripôle représentant une ligne électrique

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

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

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

$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$ matrice de transport

(diagonale) $\Rightarrow [A = D]$

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

$$A, B, C, D \geq 1 - \frac{1}{2}y^2$$

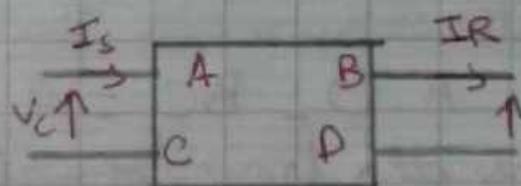
$$V_s = A V_R + B \cdot I_R$$

	A	B	C	D
ligne courte	1	2	0	1
ligne Moyenne Type II	$(1 + \frac{1}{2}y \cdot z)$	z	$y(1 + \frac{1}{4}yz^2)$	$(1 + \frac{1}{2}yz^2)$
ligne Diagramme type T	$(1 + \frac{1}{2}yz^2)$	$z(1 + \frac{1}{4}yz^2)$	y	$(1 + \frac{1}{2}yz^2)$

Détermination des paramètres A, B, c et D

Pour Déterminer A, B, c et D des quadripôle nous devons examiner deux régimes de fonctionnement de la ligne

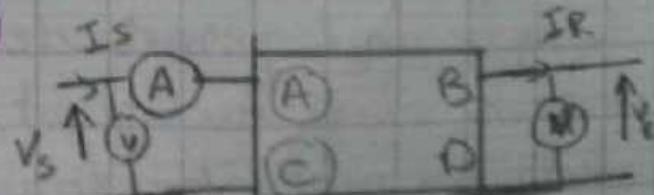
Régime à vide ($I_R = 0$)



$$V_s = A V_R + B I_R$$

$$I_s = C V_R + D I_R$$

Régime à vide ($I_R \neq 0$)

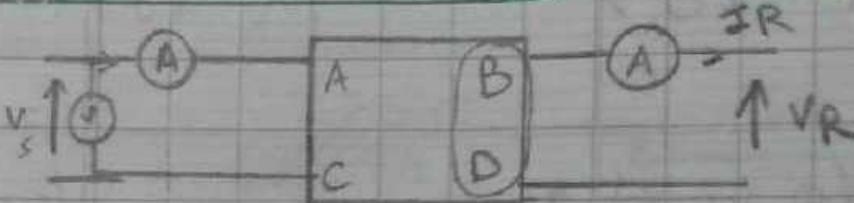


$$\frac{[A]}{[V]} = [n^{-1}] = [S]$$

$$A = \frac{Vs}{R} \quad |_{I_R=0} \text{ Gain de Tension}$$

$$C = \frac{Is}{VR} \quad |_{I_R=0} \quad [n^{-1}] [S] \text{ (admittance Y)}$$

Régime en court circuit ($VR=0$)



$$B = \frac{Vs}{IR} \quad |_{VR=0} \quad [n] [I \text{ impédance}]$$

$$D = \frac{Is}{IR} \quad |_{VR=0} \quad \text{Gain de courant}$$

Remarque : La vérification des coefficients du quadripôle se fait par la satisfaction de la relation suivante

$$A \cdot D - BC = 1$$

III.2 Modélisations des transformateurs

III.2.1 Introduction générale

Le transformateur est un appareil électrique très simple, qui permet de modifier la tension et le courant dans un circuit. Grâce à lui, l'énergie électrique peut être transportée à grande distance.

de fonction économique et distribué dans ces usines
et les maisons

IV.22 Transformateur Idéal

Un transformateur idéal n'a aucune perte et son noyau est uniforme infiniment perméable De plus le couplage entre le primaire et le secondaire est parfait donc un transformateur Ideal n'a aucun flux de fuite

transformateur Ideal à vide

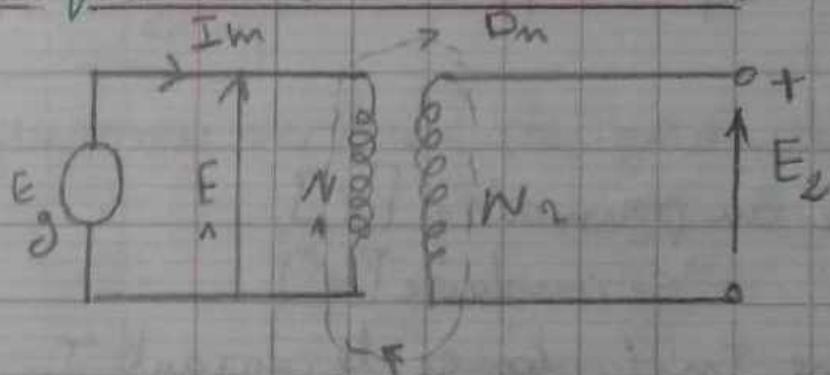
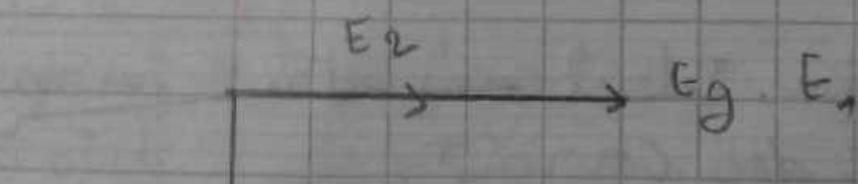


Diagramme vectoriel des grandeurs sinusoidales



I_m
 ϕ_m

III.2 Modélisations des transformateurs

Soit $E_1 = E_g$

$$E_1 = 4,44 f \cdot N_1 \Phi_{max} \quad \textcircled{1}$$

$$\text{et } E_2 = 4,44 f \cdot N_2 \Phi_{max} \quad \textcircled{2}$$

f : fréquence

N_1 : Nombres de spires du primaire

N_2 : // // / secondaire

Φ_{max} : flux maximum

En divisant la 1^{ère} équation par la deuxième

$$\boxed{\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}}$$

E_1 : tension induite au primaire [V]

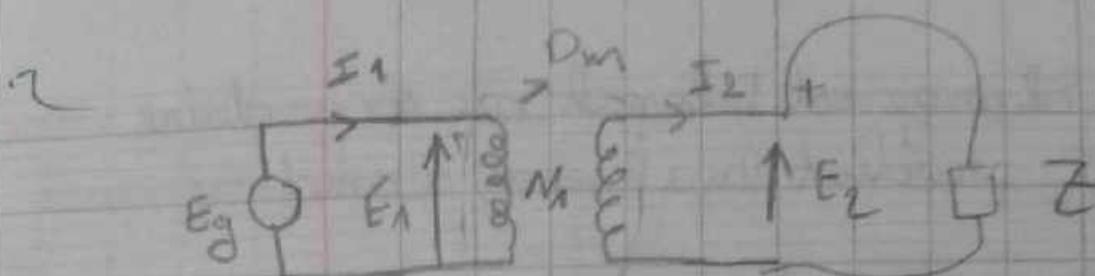
E_2 : " " " secondaire [V]

Remarque: pour une inductance le courant I_m est déphasé de 90° en arrière de la tension sur E_1 .

~~surtout~~

III.2.3 Transformateur Ideal comportant un noyau en charge rapport des courants

Raccordons une charge Z au secondaire d'un transformateur Ideal

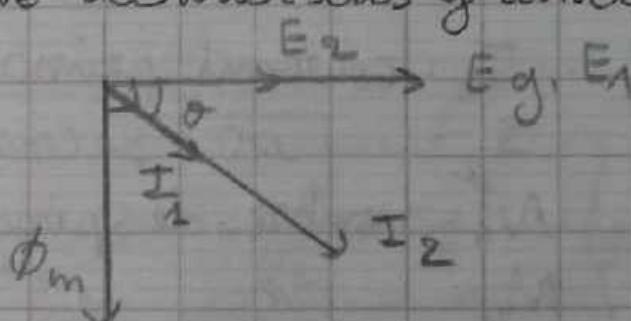


Transformateur idéal en charge Il produit un flux mutuel

- un courant I_2 circulera immédiatement, ce courant est donné par

$$I_2 = \frac{E_2}{Z}$$

Diagramme vectoriel des grandeurs sinusoidales



* prenant

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

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

* Deuxièmement la tension E_g de la source demeure constante, la tension E_1 (induite par ϕ_m) reste également constante; Il s'ensuit que E_2 ne change

Pas lorsque la charge est branché au secondaire

a) Le courant I_2 produit une Fmm secondaire

$$F_{mm} = N_2 \cdot I_2$$

Une Fmm $N_1 I_1$ d'égale valeur mais opposée à $N_2 I_2$

$$N_1 I_1 = N_2 I_2$$

Remarque : Si l'on suppose une charge inductive le courant I_2 sera en retard d'un angle θ sur la tension E_2

I_1 et I_2 en phases

$$\left\{ \begin{array}{l} I_1 = \frac{N_2}{N_1} \\ I_2 = \end{array} \right.$$

I_1 : courant primaire [A]

I_2 : " secondaire [A]

N_1 : nombre de spires au primaire

N_2 : " " au secondaire

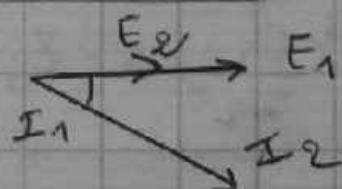
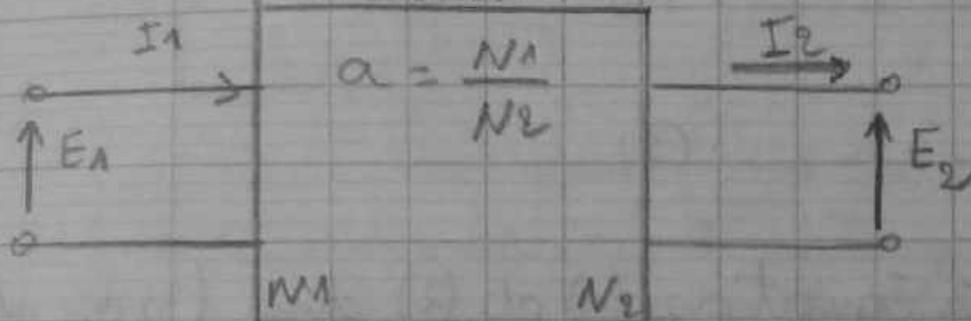
$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

$$\text{on tire } E_1 I_1 = E_2 I_2$$

la puissance apparente absorbée au primaire égale à la puissance débitée par le secondaire

Convertisseurs et représentation symbolique d'un transformateur Ideal

T. Ideal

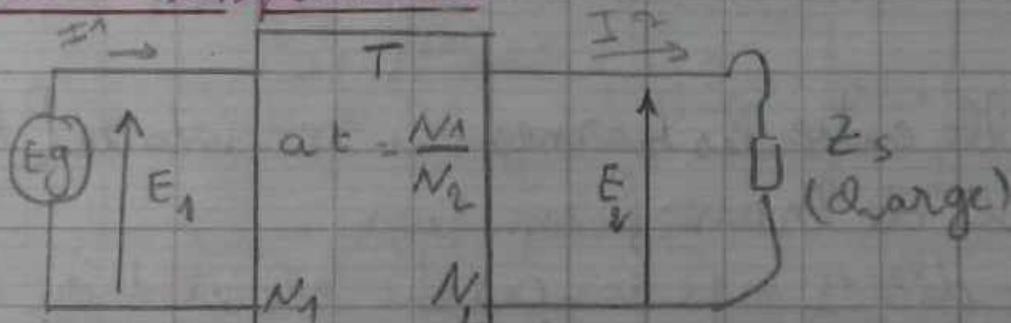


$$a = \frac{N_1}{N_2}$$

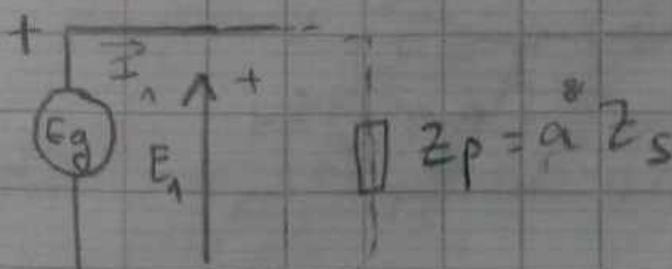
$$E_1 = a \cdot E_2$$

$$I_2 = a I_1$$

Rapport d'impédance



le transformateur modifier une tension ou un courant aussi il est transformateur d'Impédance



$$Z_p = a^2 Z_s$$

l'impédance true par la source est a^2 fois l'impédance

réelle

$$\begin{cases} E_1 = a E_2 \text{ et } I_1 = \frac{I_2}{a} + i \\ Z_s = \frac{E_2}{I_2} \end{cases} \quad (1)$$

$$3) Z_p = \frac{E_1}{I_1} \quad (3)$$

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

$$Z_p = \frac{E_1}{I_1} = \frac{a E_2}{(I_2/a)} = a^2 \frac{E_2}{I_2} = a^2 Z_s$$

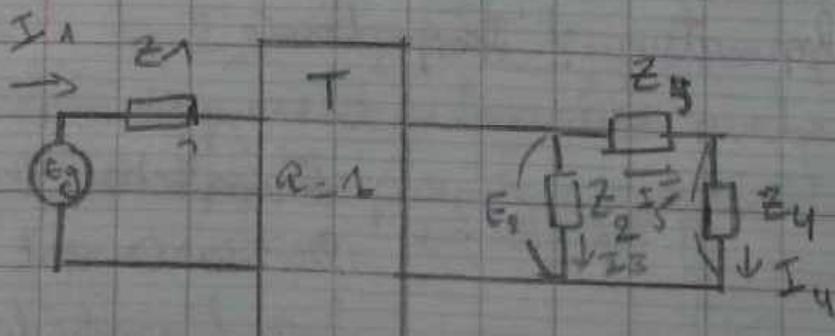
$$Z_p = a^2 \cdot Z_s$$

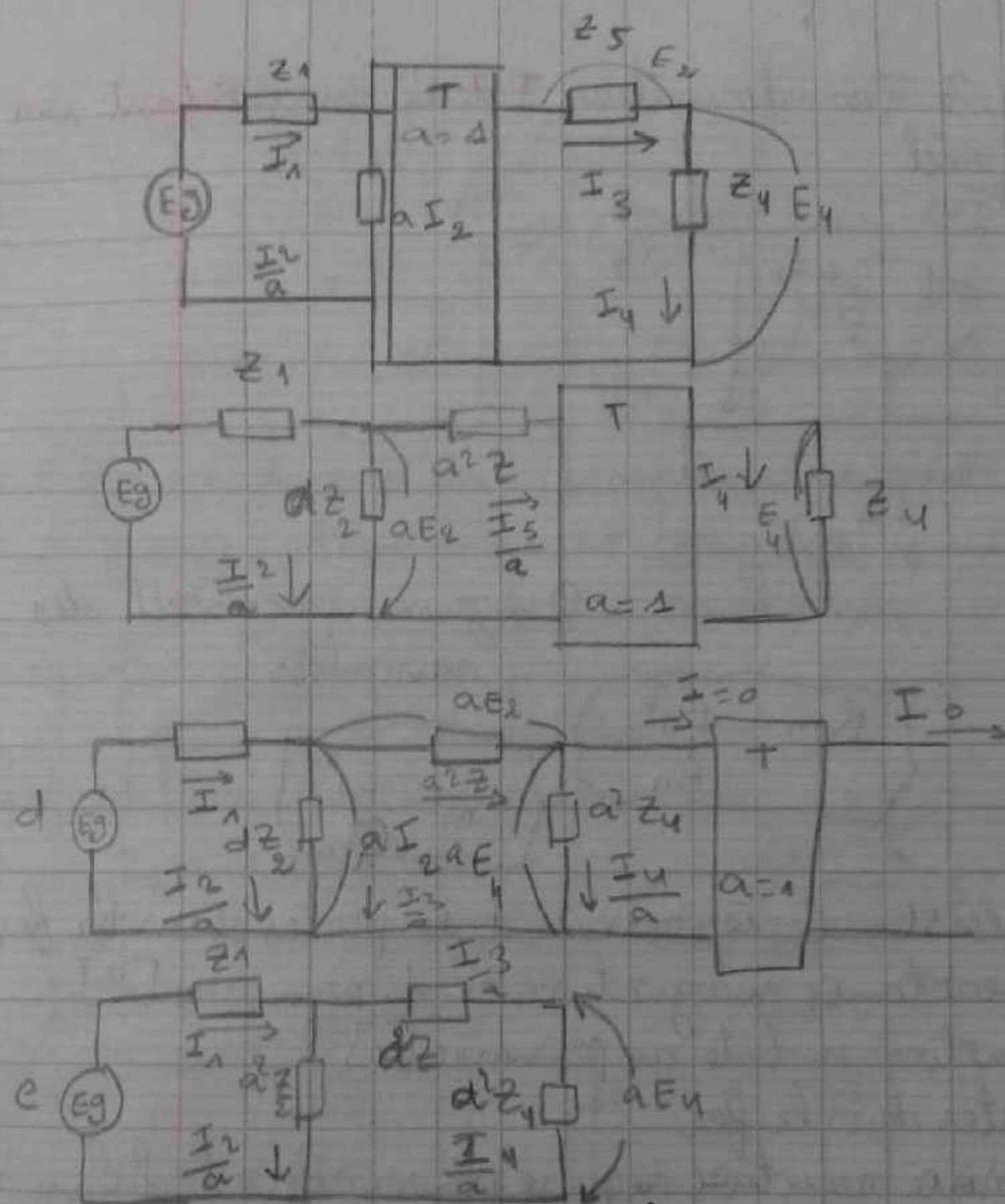
Z_p : Impédance vue entre les bornes du primaire
[R]

Z_s : réelle entre les bornes du secondaire [R]

a = rapport de transformation

Déplacement des impédances du secondaire au primaire et vice versa





Circuit équivalent après l'élimination du transformateur

- tenu

Req Impédance sont rapportée au côté secondaire

TF.2.3 Transformateur Ideal comportant un moyen réel

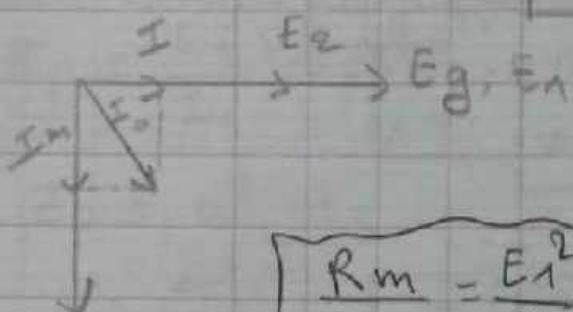
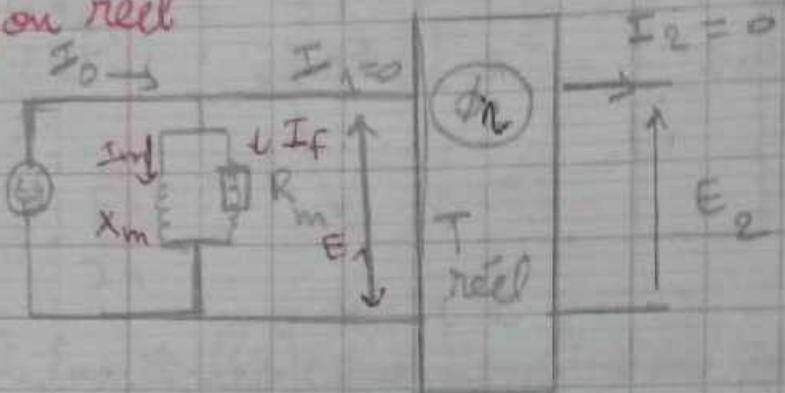


Diagramme vectoriel des variables

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

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

R_m : Resistance représentant les pertes dans le fer [Ω]

X_m : Réactance magnétisante du primaire [Ω]

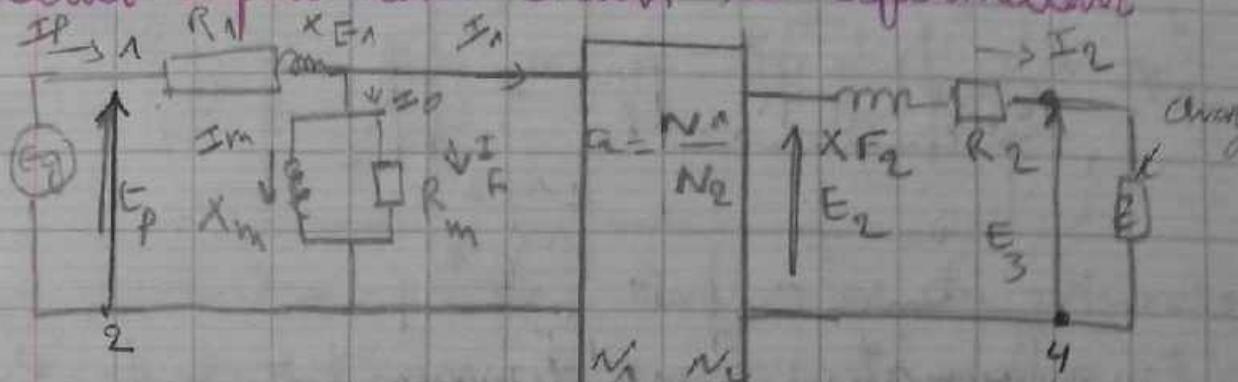
E_1 : tension induite au primaire [V]

P_m : pertes dans le fer

Φ_m : Puissance réactive requise pour créer le flux mutuel
φm [VAR]

$$\Phi_m = \frac{E_1}{4.44 f N_1} = \frac{E_g}{4.44 f N_1}$$

I.2.4 Circuit équivalent d'un transformateur



Circuit équivalent d'un Transformateur réel

R_p : Résistance d'enroulement primaire

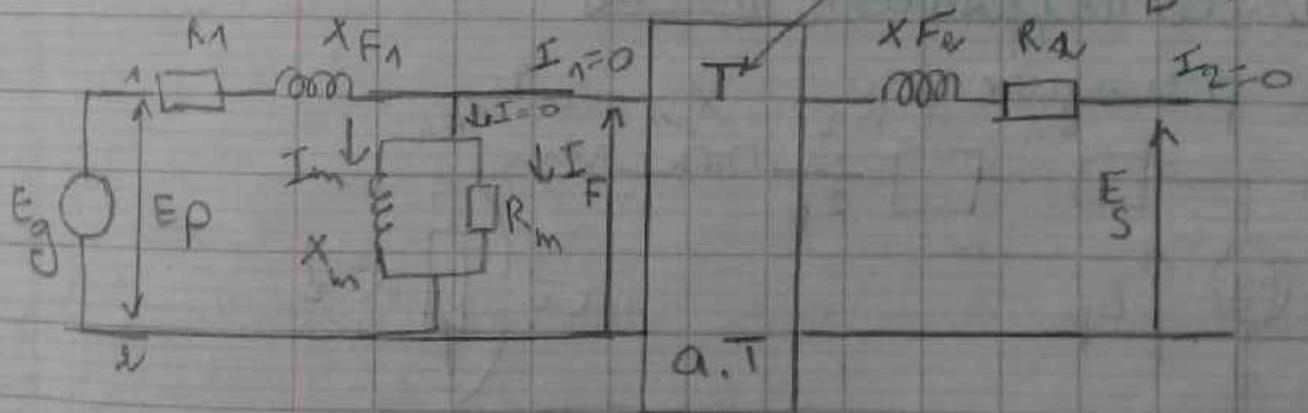
R_s : " " " secondaire

X_{F1} : Réactance brute au primaire

X_{F2} : " " " au secondaire

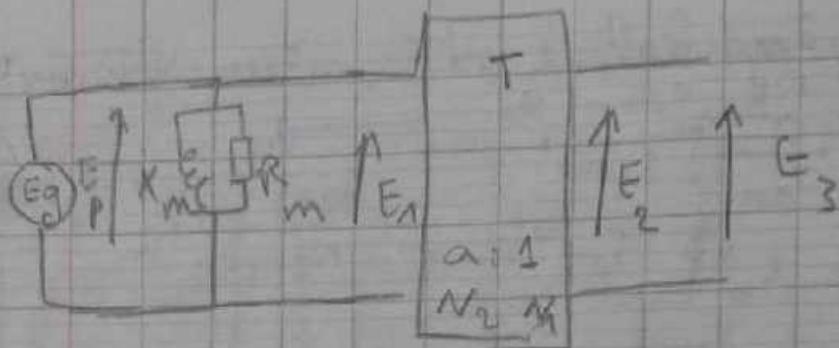
transformateur fonctionnant à vide

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



Circuit équivalent d'un transformateur à vide

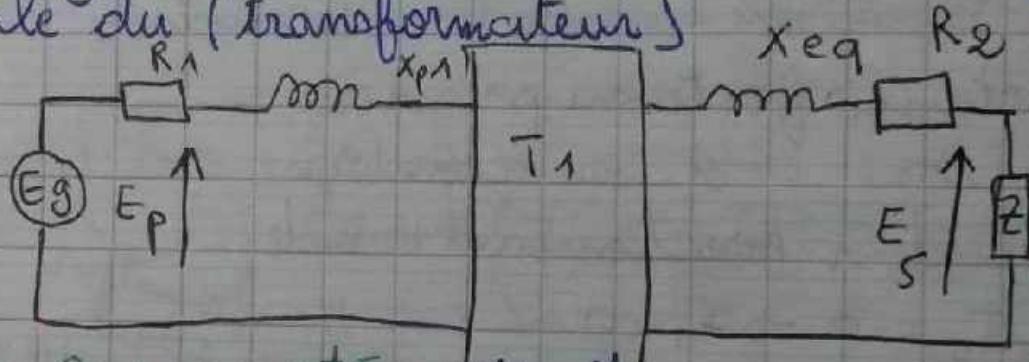
$$I_1 \text{ très faible} \Rightarrow \Delta U R_1 \simeq \Delta U R_2 \simeq 0$$



transformateur fonctionnant ~~à vide~~ en charge

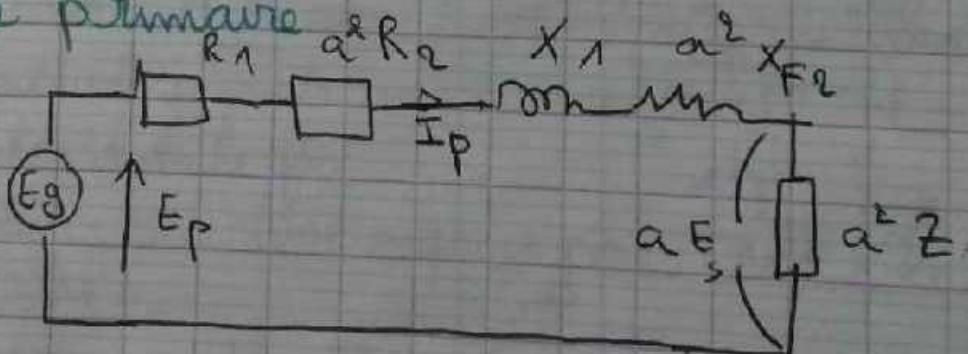
$$I_2 = 0 \Rightarrow I_1 = 0$$

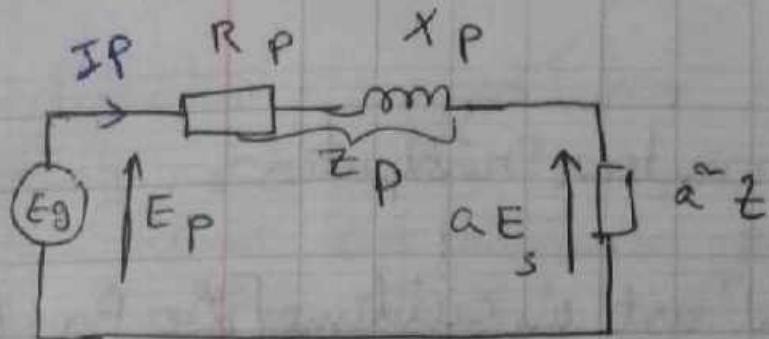
le chargé est supérieur à 20% de la puissance nominale du (transformateur)



Impédance rapportées N_1/N_2

on côté primaire





$$R_p = R_1 + a^2 R_2$$

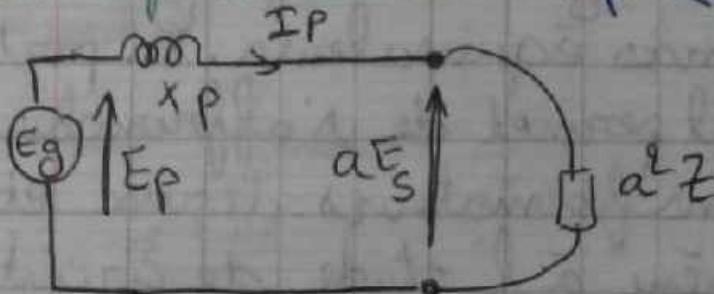
$$X_p = X_{F1} + a^2 X_{F2}$$

avec : R_p : résistance total rapportée au primaire du T

X_p : Réactance total rapportée au primaire du T)

$$Z_p = \sqrt{R_p^2 + X_p^2}$$

Un gros transformateur $R_p \ll X_p$



Chapitre I

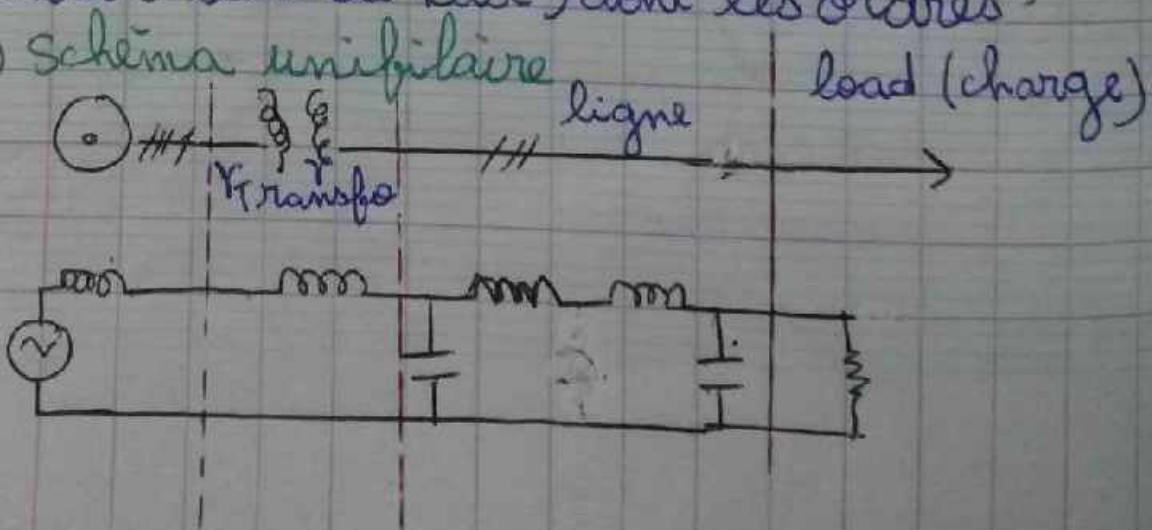
Les systèmes des grandeurs réduites :

I. 1) Introduction :

Le système "Per-unit" est un système [Le Per-unit] des grandeurs réduites qui permet d'avoir court amment à l'esprit des ordres de grandeurs relatives, certains paramètres vide permanemment des niveaux de tension et de puissance. De plus l'utilisateur de ce système simplifie certaines formules et schémas équivalents. En particulier un bon choix initial permet de s'affranchir de la présence des transformateurs de base et la formation se ramène à l'étude de circuit 1.

*) Système associé, une variable quelconque (α) une valeur de base α_{base} et la compare à sa valeur vraie (α_{vraie}) de manière à l'exprimer dans un système adimensionnel " Pu " ou (en % de sa valeur de grandeur sont de base) dont les ordres.

I. 2) Schéma unifilaire



La définition des quantités

(voltage, courant, Puissance, Impédance) en système

'Per - Unit' est donné par = Quantité (unité normal)

$$\text{Quantité (Per - Unit)} = \frac{\text{Quantité (unité normal)}}{\text{valeur de base de la quantité}}$$

(unité normale)

soit : V_{base}

$$P_{\text{base}} = Q_{\text{base}} = S_{\text{base}} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} \text{c'est à dire}$$

$$I = \frac{S_{\text{base}}}{V_{\text{base}}} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} \text{c'est à dire}$$

$$* Z_{\text{base}} = R_{\text{base}} = X_{\text{base}} = \frac{V_{\text{base}}}{I_{\text{base}}} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} \frac{V_{\text{base}}^2}{S_{\text{base}}}$$

$$S_{\text{base}} \quad Y_{\text{base}} = G_{\text{base}} = B_{\text{base}} = \frac{1}{Z_{\text{base}}}$$

Les quantités en 'PU' sont données par

$$V_{\text{pu}} = \frac{V}{V_{\text{base}}} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} P_{\text{pu}} = \frac{Z}{Z_{\text{base}}} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\}$$

$$I_{\text{pu}} = \frac{I}{I_{\text{base}}} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} S_{\text{pu}} = \frac{S}{S_{\text{base}}}$$

I.3) Puissance, Tension et Courant de Base

* Les grandeurs réduites "Pu"

$$S_{\text{pu}} = \frac{S}{S_{\text{base}}}$$

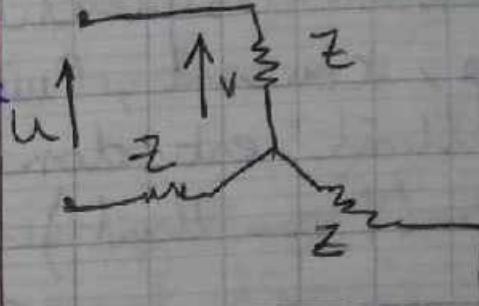
$$\bar{U}_{pu} = \frac{\bar{U}}{U_{base}} : \bar{Z}_{pu} = \frac{\bar{z}}{z_{base}}$$

$$\bar{I}_{pu} = \frac{\bar{I}}{I_{base}}$$

$$U_B = \sqrt{3} V_B [V]$$

$$S_B = \sqrt{3} U_B I_B [VA] (6)$$

$$V_B = Z_B \cdot I_B \dots (7)$$



charge (équilibre 3n)

$$\bar{S} = 3\sqrt{3} \cdot \bar{I}^* = 3\sqrt{3} \frac{\bar{V}^*}{\bar{Z}^*}$$

$$\frac{3V^2}{Z^*} = \frac{U^2}{\bar{Z}^*} [VA]$$

Les grandeurs de base :

$$S_B = \frac{U_B^2}{Z_B} \quad \text{--- (1.1)}$$

$$Z_B = \frac{U_B^2}{S_B} \quad \text{--- (1.2)}$$

$$\bar{S}_{pu} = \frac{U_{pu}^2}{\bar{Z}_{pu}^*} \quad \text{--- (1.3)}$$

de la même à l'impédance

$$\frac{U_{pu}}{U_B} = \frac{V}{V_B}$$

$$\boxed{U_{pu} = V_{pu}} \quad \text{--- (8)}$$

divisons ces équations (1) et (6)

$$\bar{S}_{pu} = \frac{\bar{S}}{S_B} = \frac{\bar{U}}{U_B} \cdot \frac{\bar{I}}{I_B} = \frac{\bar{U}}{U_{pu}} \cdot \frac{\bar{I}}{I_{pu}}$$

$$\bar{S}_{pu} = \bar{U}_{pu} \cdot \bar{I}_{pu} \quad \text{--- (9)}$$

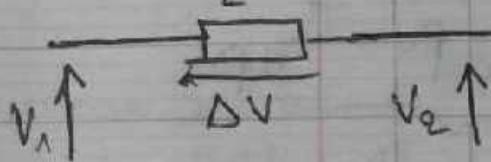
X-4) Impédance et admittance de base

$$Y_B = \frac{S_B}{U_B^2} \quad (1.4)$$

$$\bar{Y}_{pu} = \frac{\bar{Y}}{Y_B} \quad (1.5)$$

$$S_{pu} = \bar{Y}_{pu} \cdot U_{pu}^2 \quad (1.6)$$

I.5) Chute de tension



variation de la tension du
de passage de courant à
travers une ligne

Impédance

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_2 + \bar{Z} \cdot \bar{I} \quad (1.7)$$

$$V_B = Z_B \cdot I_B \quad (1.8)$$

$$\bar{V}_{pu} = V_{pu} + \bar{Z}_{pu} \cdot \bar{I}_{pu} \quad (1.9)$$

I.6) Chargement de base
Nous pouvons écrire pour
deux systèmes de base

differents

$$\bar{Z} = \bar{Z}_{pu} \cdot Z_{B1} = \bar{Z}_{pu} \cdot Z'_{B2}$$

$$\bar{Z}_{pu2} = \bar{Z}_{pu} \cdot \frac{Z_{B1}}{Z_{B2}} = \bar{Z}_{pu1}$$

$$\frac{U_{B1}^2}{U_{B2}^2} \cdot \frac{S_{B2}}{S_{B1}}$$

$\downarrow p_1$

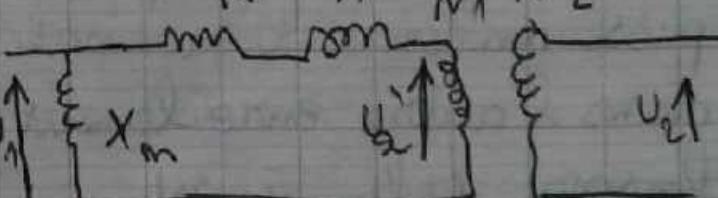
Pour les admittances.

$$\bar{Y}_{pu2} = \bar{Y}_{pu} \cdot \frac{Y_{B1}}{Y_{B2}}$$

$$\bar{Y}_{pu1} = \frac{U_{B2}^2}{U_{B1}^2} \cdot \frac{S_{B1}}{S_{B2}}$$

I.7) Transformateur en

PuR x N1 N2



Modèle d'un transfor-
ateur

$$R = R_1 + n^2 R_2 [\Omega]$$

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

$$X = X_{F1} + n^2 X_2 [\Omega]$$

* L'impédance

caractrisant le transformateur s'exprime à

travers la tension de

court-circuit (U_{cc}) de ce avec $I_{npu} = 1$

U_{cc} : représente le pourcentage de la tension nominale à pour appliquer à un des

enroulements pour qui il passe un courant nominale

dans l'autre enroulement lorsque celui-ci est

court-circuit cette tension

est données dans le système perte-unité lié aux grandeurs nominales de l'appareil

* Dans le système P.u à partir du modèle donne la tension de court-circuit se déduit par :

$$U_{ccpu} = Z_{cc} pu \cdot I_{npu}$$

naturalement de transfert

en ateur ($R_{pu} + jX_{pu}$) au cours de cette étude

* permis les grandeurs de base comme étant les grandeurs nominales du système

* le système perturbé choisissant

S_B , et U_B , puissance et tension de base du réseau lorsque sa valeur "1"

$$\bar{U}_{1 \text{ pu}} = \frac{\bar{U}_1}{U_{B1}}$$

$$\bar{I}_{1 \text{ pu}} = \frac{\bar{I}_1}{I_{B1}}$$

La tension de base du réseau "2" et donnée comme

$$U_{B2} = n U_{B1}$$

nous avoir

$$S_{B1} = 3 V_{B1} \cdot I_{B1}$$

$$S_{B2} = 3 V_{B2} \cdot I_{B2}$$

En choisissant

$$S_{B1} = S_{B2} = S_B$$

$$I_{B2} = \frac{I_B}{n}$$

$$\bar{U}_{2 \text{ pu}} = \bar{U}_{2 \text{ pu}}$$

$$I'_{2 \text{ pu}} = \bar{I}_{2 \text{ pu}}$$

application

Un générateur de 100 MVA

$X_s = 100\%$ de tension nominale 18 KV et

rélie par un transformateur élévateur

(18/70) de 50 MVA et de tension de C. C de 10% une ligne triphasé

70 KV de 25 Km

(R = 0,2 Ω / Km)

X = 0,4 Ω / Km

y = 3 μ s / Km

au bout de la ligne une charge est branchée derrière un transformateur abaisseur (70/116,5) de 40 MVA

Vcc = 15%

Nous avons relevé une tension de 15 KV au bornes de la charge qui est

inducteur avec soutien
une puissance de 15 MVA
avec un facteur de

puissance de 0,8

Nous demandons

- Tracez le schéma
en filaire correspondant
à ce circuit

- Pour $S_B = 100 \text{ MVA}$
choisissez les autres
grandeur de base et
- calculez le schéma en
utilisant le système
per unit

chapitre IV Composants symétriques

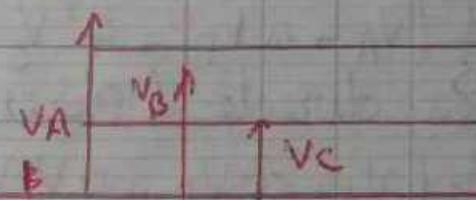
IV introduction

La méthode des composantes symétriques est utilisée pour transformer un système homopolaire

triphasé déséquilibré en un système triphasé équilibré

- Soit trois composantes de tension des trois phases V_A, V_B, V_C . Il est possible d'exprimer ces trois tensions par la somme des tensions

comme suit



$$V_A = V_{A+} + V_{A0}$$

$$V_B = V_{B+} + V_{B0}$$

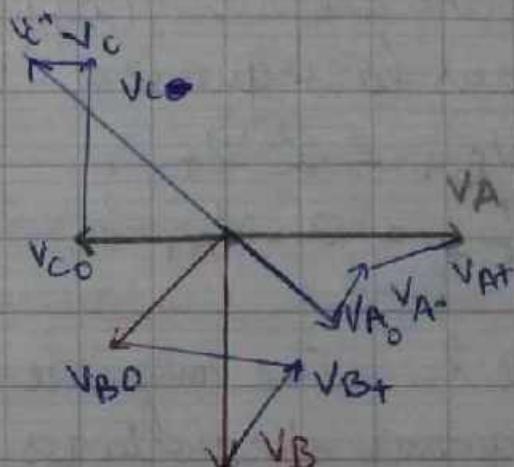
$$V_C = V_{C+} + V_{C0}$$

Note : $V_{A+} = V_d$

(composant positive Composante directe)

$$V_A = V_d \text{ (composant négative)}$$

$$V_{A0} = V_g \text{ (composante indirecte)}$$



Système asymétrique des trois tensions et la décomposition de ces dernières

Il existe plusieurs méthodes pour décomposer ces trois tensions (V_A, V_B, V_C) des trois phases pour la simplification, on introduit un opérateur

complexe à définir par

$$a = e^{j\frac{\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

- La séquence des voltages - La séquence des voltage V_{A+}, V_{B+}, V_{C+} des systèmes V_{AO}, V_{BO}, V_{CO} sont égales en équilibre positif (directe) en phases et en Amplitudes les Amplitudes des phases $V_{BO} = V_{AO}$ $\xleftarrow{V_{AO}}$
 $V_{CO} = V_{AO}$ $\xleftarrow{V_{BO}}$
 $\xleftarrow{V_{AO}}$
 sont deux égales et décalé de 120° (apparue dans la séquence A - B - C)

$$V_{B+} = \alpha^2 V_+$$

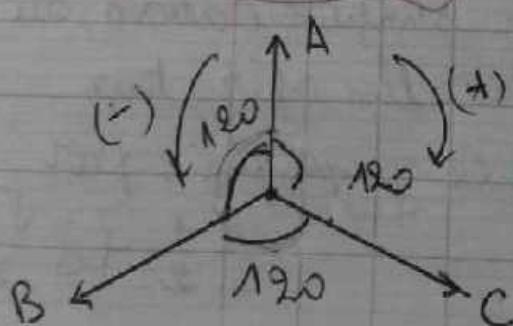
$$V_{C+} = \alpha \cdot V_{A+}$$

de la même manière la séquence des voltages

V_{A-}, V_{B-}, V_{C-} (individuel) des systèmes équilibré négatif (indirecte) la séquence est C - B - A

$$V_{B-} = \alpha V_{A-}$$

$$V_{C-} = \alpha^2 V_{A-}$$



les tension l'origines V_A, V_B, V_C sont exprimées par

$$V_A = V_{A+} + V_{A-} + V_{AO}$$

$$V_B = \alpha \cdot \alpha^2 V_{A+} + \alpha V_{A-} + V_{AO}$$

$$V_C = \alpha V_{A+} + \alpha^2 V_{A-} + V_{AO}$$

la résolution de ce système d'équations

$$V_{A+} = \frac{1}{3} (V_A + \alpha V_B + \alpha^2 V_C) \rightarrow \text{tension directe (Positive)}$$

$$V_{A-} = \frac{1}{3} (V_A + \alpha^2 V_B + \alpha V_C) \rightarrow \text{tension indirecte négative}$$

$$V_{AO} = \frac{1}{3} (V_A + V_B + V_C) \rightarrow \text{tension homopolaire (séquence zéro)}$$

Propriétés d'opérateurs α

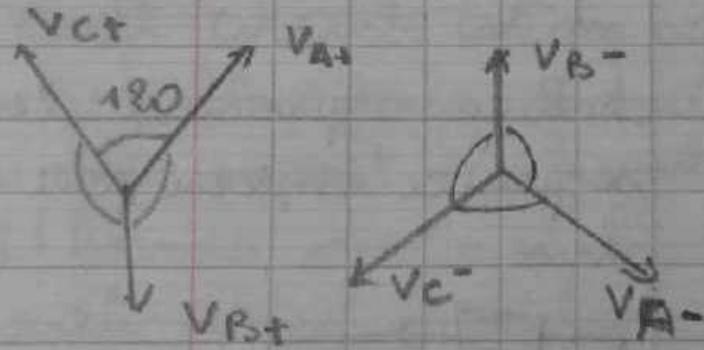
$$\alpha^2 = \alpha^{-1}$$

$$\alpha^3 = 1$$

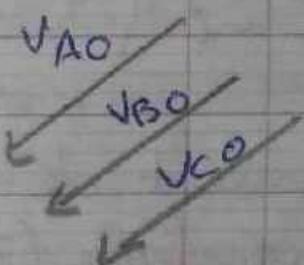
$$1 + \alpha + \alpha^2 = 0$$

Ecriture simplifiée

$$\begin{cases} V_A = V_+ + V_- + V_0 \\ V_B = \alpha V_+ + \alpha^2 V_- + V_0 \\ V_C = \alpha^2 V_+ + \alpha V_- + V_0 \end{cases}$$



a) séquence positive
(directe)



b) séquence négative
(indirecte)
compresants zéro
(indirecte) (homopolaire)

① compresants directs
indirecte homopolaire
du courants I_A, I_B

c) séquence (Zero) (homopolaire) I_c

$$\text{et } \begin{cases} V_+ = \frac{1}{3} (V_A + \alpha V_B + \alpha^2 V_C) & I_+ = \frac{1}{3} (I_A + \alpha I_B + \alpha^2 I_C) \\ V_- = \frac{1}{3} (V_A + \alpha^2 V_B + \alpha V_C) & I_- = \frac{1}{3} (I_A + \alpha^2 I_B + \alpha I_C) \\ V_0 = \frac{1}{3} (V_A + V_B + V_C) & I_0 = \frac{1}{3} (I_A + I_B + I_C) \end{cases}$$

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

Exemple :

La méthode de composante symétriques est appliquée aussi pour les courants de la même Application

$$I_A = 150 \text{ A}$$

$$I_B = 250 \text{ A}$$

$$I_C = 100 \text{ A}$$

Calculez les composantes positives (directe) et composantes négatives

composants zéro

(indirecte) (homopolaire)

$$\begin{aligned} & \frac{1}{3} (150 \angle 45^\circ + 250 \angle 150^\circ + \\ & 100 \angle 300^\circ) \\ & = 52,2 \angle 112,7^\circ [A] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_+ &= \frac{1}{3} [I_A + a^2 I_B + a I_C] \\ &+ \frac{1}{3} [150 \angle 45^\circ + e^{j120^\circ} + \\ & 250 \angle 150^\circ + e^{j30^\circ}] \end{aligned}$$

$$100 \angle 300^\circ$$

$$= 48,02 \angle -87,6^\circ A$$

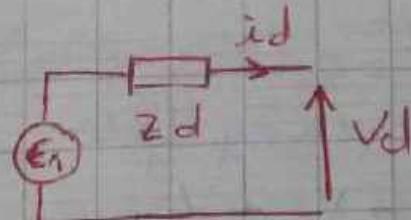
$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{3} [I_A + a^2 I_B + a I_C] \\ &= 163,23 \angle 40,48^\circ A \end{aligned}$$

Schéma équivalent

on peut de ce qui a précédé dire que les schémas équivalents monophasés pour les trois séquences est

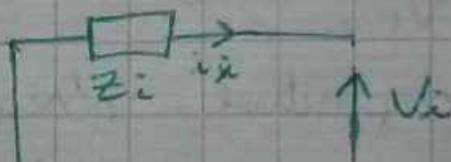
comme suit

* Schéma équivalent de séquence directe pour une seule phase



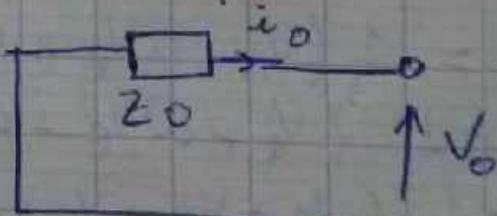
$$E_d - Z_d = i_d + V_d$$

Schéma équivalent de séquence inverse pour une phase



$$V_i = Z_i \cdot i_i$$

Schéma équivalent de séquence homopolaire (Zero) pour une phase



$$V_0 = Z_0 \cdot i_0$$

Vd, Vj, Vg tension directe, inverse et. Z, Z_o impédances des composants directe, inverse et. Rompolair

Chapitre VII

Défauts de court-circuit

VII.1. Introduction

Un court-circuit est un **bouclage** acciidental de deux ou plusieurs conducteurs entre le récepteur et la source on peut distinguer

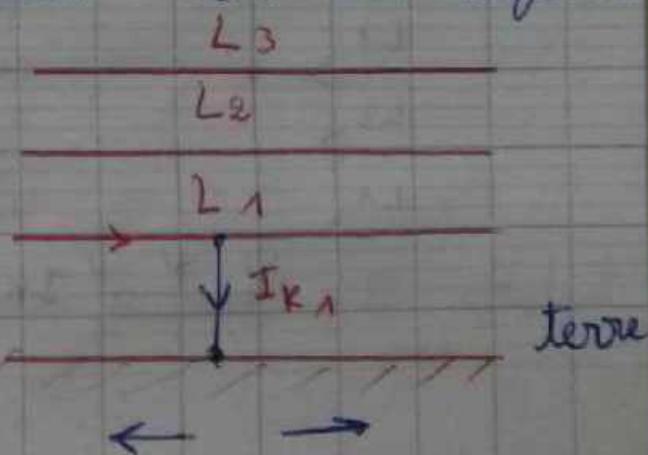
VII.2. formes de court-circuit

- .) courte-circuit monophasé, isolé à la terre, soit fréquent notamment dans les réseaux à basse tension
- .) court-circuit biphasé, isolé à la terre
- .) court-circuit triphasé isolé à la terre, ils sont rares, ne représentant que 5% des défauts qui peuvent affecter le réseau

VII.3. Différents court-circuit et leurs courants

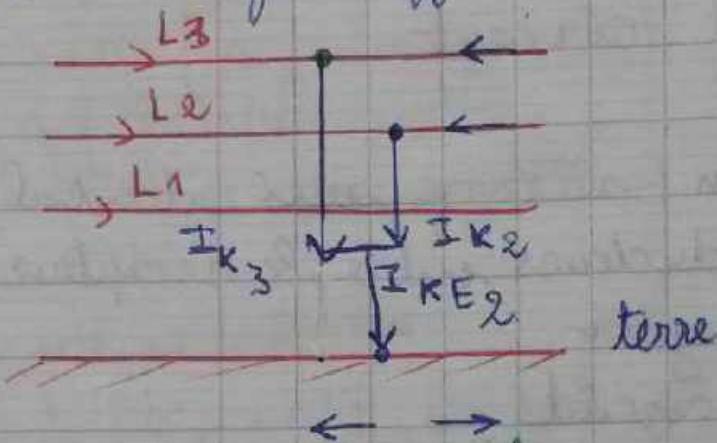
A) Court-circuit phase - terre

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



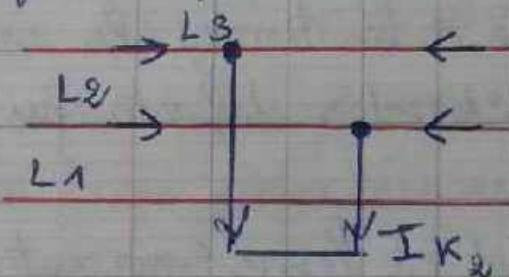
B) court circuit biphasé - terre

c'est la liaison entre deux phases et la terre avec 15% de défaut affecter le réseau

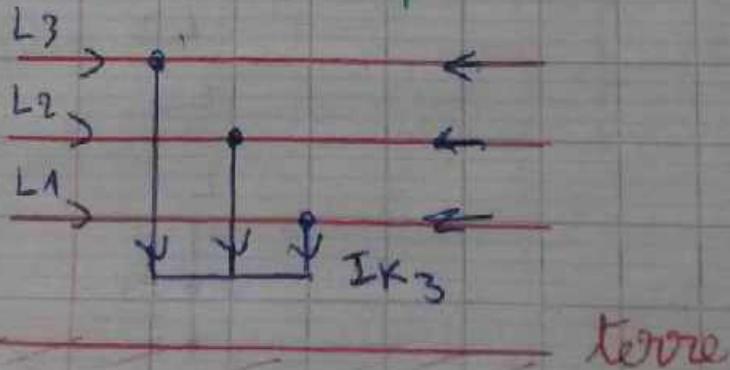


C) court circuit biphasé - isolé

C'est la liaison de deux phases pourcentage 10% de défaut affecter le réseau

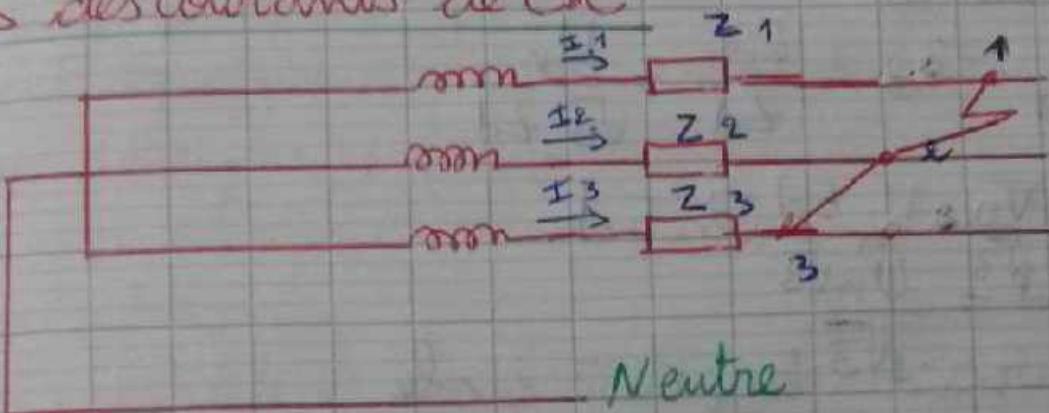


D) court circuit triphasé



calculs des courants de C.C

court
circuit
triphasé



Pour un circuit triphasé

$$\text{on a : } V_1 = V_2 = V_3 = 0$$

$$\begin{cases} V_d + V_i + V_o = 0 \\ a^2 V_d + a V_i + V_o = 0 \quad (\text{I}) \\ a V_d + a^2 V_i + V_o \end{cases}$$

Principe de superposition on a le système

$$\begin{cases} Z_d \cdot I_d + V_d = E_d \\ Z_i \cdot I_i + V_i = 0 \quad (\text{II}) \\ Z_o \cdot I_o + V_o = 0 \end{cases}$$

La solution du système (I) nous donne

$$V_o = 0 \Rightarrow V_i = 0 \Rightarrow V_d = 0$$

remplissant ces valeurs dans le système II on aura

$$E_d = Z_d \cdot i_d$$

$$\begin{cases} I_d = 0 \\ I_i = 0 \quad (\text{III}) \\ I_o = 0 \end{cases}$$

D'où le courant de court-circuit triphasé défini

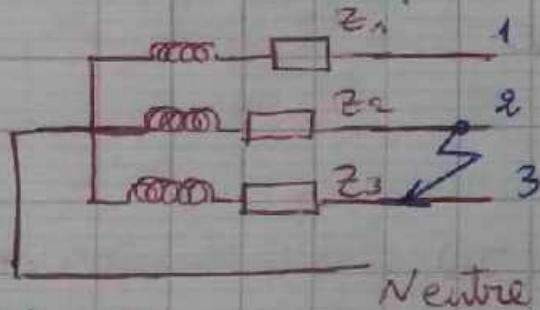
du système III

$$I_{CC_3} = I_d = \frac{E_d}{Z_d} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_d}$$

$$U_n = \sqrt{3} \cdot V_n = \sqrt{3} \cdot E_d$$

$$\Rightarrow E_d = \frac{U_n}{\sqrt{3}}$$

court circuit biphasé isolé



$$V_2 = V_3 = 0$$

$$\begin{cases} I_1 = I_d + I_i + I_o = 0 \\ I_2 = a^2 I_d + a I_i + I_o \\ I_3 = a I_d + a^2 I_i + I_o \end{cases}$$

la résolution du système nous donne:

$$\begin{cases} I_o = 0 \\ I_i = -I_d \end{cases} \quad (1)$$

$$\boxed{I_2 = -I_3} = -j\sqrt{3} \cdot I_d \quad (2)$$

$$V_d = V_i \quad (3)$$

$$\begin{cases} V_1 = V_d + V_i + V_o \\ 0 = a^2 \cdot V_d + a V_i + V_o \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0 = a V_d + a^2 V_1 + V_o \\ 0 = a V_d + a^2 V_1 + V_o \end{cases}$$

remplaçons les expressions (1), (2) et (3) dans (II) on aura

$$E_d = V_d + Z_d \cdot I_d \quad (4)$$

$$0 = V_i + Z_i \cdot I_i \quad (5)$$

$0 = V_0 + Z_0 I_0 \Rightarrow V_0 = 0 / I_0 = 0$
 A partir de l'équation ou (4) et (5) on déduit (4)-(5)

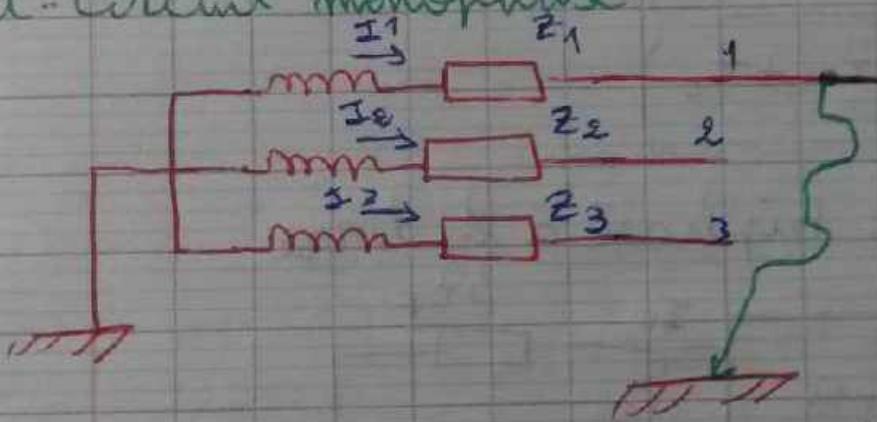
$$E_d = (V_d - V_i) + (Z_d - Z_i) \cdot I_d$$

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

$$I_{3CC} = \sqrt{3} \cdot I_d$$

$$I_{3SC} = \frac{\sqrt{3} \cdot E_d}{(Z_d + Z_i)}$$

Court-circuit monophasé



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

$$V_N = 0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_2 = I_3 = 0 \\ V_1 = V_d + V_1 + V_0 = 0 \end{array} \right.$$

$$V_1 = V_d + V_1 + V_0 = 0$$

La résolution de ce système nous donne

$$I_1 = 3 \cdot I_d$$

$$(I_d = I_2 = I_3 = \frac{I_3}{3})$$

$$I_d = I_i = I_o$$

$$E_d = V_d + Z_d \cdot I_d \quad (1)$$

$$0 = V_i + Z_i \cdot I_i \quad (2)$$

$$0 = V_o + Z_o \cdot I_o \quad (3)$$

$$(1+2+3) \rightarrow \checkmark \neq 0$$

$$E_d = (V_d + V_i + V_o) + (Z_d + Z_i + Z_o) \cdot I_d$$

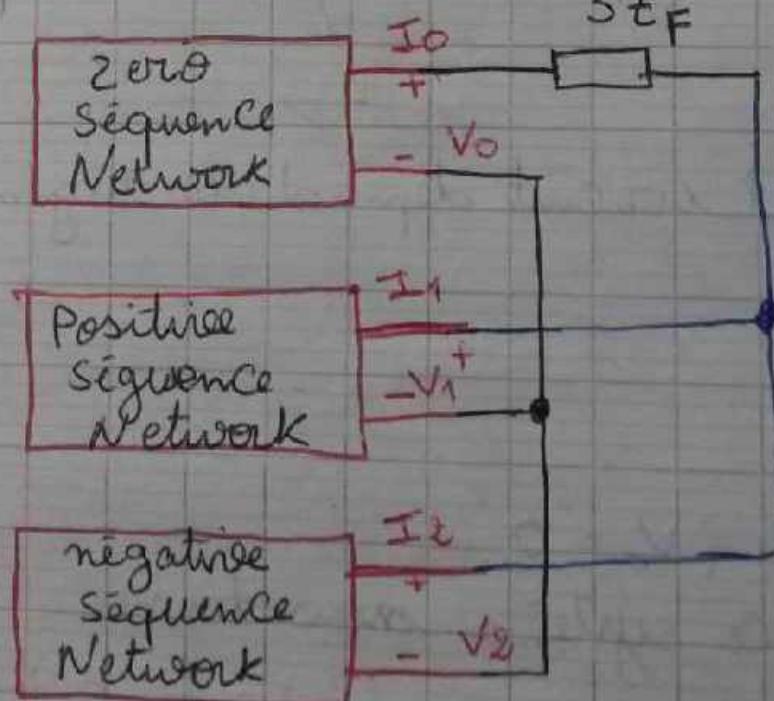
$$I_d = \frac{E_d}{Z_d + Z_i + Z_o}$$

$$I_{ACC} = 3 \cdot I_d =$$

$$= 3 \cdot \frac{E_d}{(Z_d + Z_i + Z_o)}$$

Court Circuit biphasé à la terre

(قطة)



ce type de défaut fait intervenir l'impédance Z_0
 En cas de défaut entre la phase (1) et (2)

$$|I_1| = |I_2| = \frac{\sqrt{Z_1^2 + Z_0 Z_i + Z_0^2}}{(Z_d Z_i + Z_1 Z_0 + Z_d Z_0)} \cdot \sqrt{3} V_n$$

en cas $Z_d = Z_i$

$$|I_1| = |I_2| = \frac{\sqrt{Z^2 + Z_0 Z_d + Z_0^2}}{(Z_1^2 + 2 Z_0 \cdot Z_d)} \sqrt{3} \cdot V_n$$