

**UNIVERSITE INTERNATIONALE
DE CASABLANCA**

Réseaux électriques

Année scolaire 2018- 2019

Table des matières

Chapitre I	-Structures et caractéristiques des réseaux électriques -----	p. 3
Chapitre II	- Élément de mathématique et d'électrotechnique _____	p. 9
Chapitre III	- Modélisation des caractéristiques d'un réseau électrique -----	p.13
Chapitre IV	- Calcul des courants de court-circuit-----	p .20
Chapitre V	- Modélisation des lignes de transport en régime permanent-----	p .25

Chapitre I : Structures et caractéristiques des réseaux électriques

L'électrotechnique ou la technologie de l'énergie concerne la génération, le transport, la distribution et l'utilisation de l'énergie électrique. Les réseaux électriques sont parmi les systèmes les plus complexes à étudier par le grand nombre et la diversité de ses composantes.

I.1 – Historique des réseaux électriques

I.1.1 - Edison et la distribution à courant continu

C'est en 1882 que commence l'histoire des réseaux de distribution d'énergie électrique avec la mise en place à New York, par Thomas Edison, d'une centrale de génération d'énergie électrique à courant continu d'environ 33 kW.

Il semble que la première station de distribution d'énergie électrique en Angleterre fut construite à Londres à peu près en même temps et qu'elle fonctionnait aussi en courant continu sous une tension de 100 volts et une capacité de 60 kW.

Bien sûr, à cette époque, on utilisait la machine à vapeur pour toutes les sources d'énergie comme les chemins de fer, les usines avec distribution de l'énergie par un arbre auquel on ajoutait des poulies pour soutirer de la puissance au moyen d'une courroie de cuir très large.

Ce mode de génération d'énergie électrique (à courant continu) ne permet pas de transmettre cette énergie très loin car on ne peut la générer et l'utiliser qu'à des tensions basses pour des raisons de sécurité et d'isolation.

Il fallait donc construire des stations de génération près des centres de consommation.

I.1.2 - Westinghouse et la distribution à courant alternatif

L'invention du transformateur en 1885 par Deri et autres, et la construction par William Stanley d'un transformateur pratique pour la distribution d'énergie démontrèrent en 1884-1886 que le futur passait par le courant alternatif.

Mieux encore, le brevet anglais numéro 6481 émis à Nicola Tesla en 1888 pour la présentation d'un article sur les moteurs d'induction et synchrones biphasés, amorça la distribution et l'usage de l'énergie électrique en systèmes polyphasés.

En 1890 une première ligne de transmission à courant alternatif (22 Km) à 3300 volts était mise en opération en Orégon (U.S.A.)

Au début de 1894, il existait aux États-Unis un poste de génération biphasé et quatre postes de générations triphasés.

I.2 - Description de la fonction d'un réseau

Les principales fonctions des réseaux électriques c'est d'assurer l'acheminement de l'énergie électrique des lieux de production aux lieux de consommation.

Ce réseau est pratiquement toujours triphasé et englobe trois types de réseaux .

I.2.1- Le réseau de transport et d'interconnexion

La finalité de ce réseau est triple :

- une fonction de "transport" dont le but est d'acheminer l'électricité des centrales de production aux grandes zones de consommation
- une fonction "d'interconnexion nationale" qui gère la répartition de l'offre en orientant la production
- une fonction "d'interconnexion internationale" pour gérer des flux d'énergie entre les pays en fonction d'échanges programmés ou à titre de secours.

La structure de ces réseaux est essentiellement de type aérien, maillée, ce qui permet d'assurer l'acheminement de l'énergie en toute sécurité.
Les tensions sont de 150kV, 225kV ou 400 kV.

I.2.2- Le réseau de répartition

La finalité de ce réseau est avant tout d'acheminer l'électricité du réseau de transport vers les grands centres de consommation.

Ces centres de consommation sont :

- soit du domaine public avec l'accès au réseau de distribution HTA
- soit du domaine privé avec l'accès aux abonnés à grande consommation (supérieure à 10 MVA) livrés directement en HT

Ce réseau est éventuellement alimenté à travers des transformateurs ou directement par des centrales de moindre importance.

Sa structure maillée est plus serrée que celle du réseau de transport.

I.2.3- Le réseau de distribution

- Le réseau de distribution HTA

La finalité de ce réseau est d'acheminer l'électricité du réseau de répartition aux points de moyenne consommation supérieure à 250 KVA

Ces points de consommation sont :

- soit du domaine public, avec accès aux postes de distribution publique HTA/BT
- soit du domaine privé, avec accès aux postes de livraison aux abonnés à moyenne consommation.

La structure est de type aérien ou souterrain et peut avoir les structures radiales, bouclées ou maillées.

Les tensions sur ces réseaux sont généralement de 20 kV. Les protections sont moins sophistiquées que dans le cas des réseaux précédents.

- Le réseau de distribution BT

La finalité de ce réseau est d'acheminer l'électricité du réseau de distribution HTA aux points de faible consommation (inférieure à 250 KVA) dans le domaine public avec l'accès aux abonnés BT.

Ce réseau permet d'alimenter un nombre très élevé de consommateurs correspondant au domaine domestique.

Sa structure, de type aérien ou souterrain et peut être radiale, bouclée ou maillée.

Les tensions sur ces réseaux sont 220V/380 V.

I.2.4 – Le réseau national –MAROC-

La mise en place des réseaux électriques (très locale au début) devient rapidement régionale et les tensions de distribution montent au fur et à mesure que les distances augmentent et que les quantités d'énergie à transporter grandissent.

Le réseau national de transport couvre la quasi-totalité du territoire avec une longueur de 18 920 Km en 2006, constitué de lignes 400 KV, 225 KV et 60 KV. Le réseau de transport est géré par L'office national d'électricité (ONE) et interconnecté au réseau Algérien et Espagnol dans l'objectif de :

- renforcer la fiabilité et la sécurité d'alimentation en énergie électrique

- bénéficier d'économie sur le prix de revient du KWh
- et intégrer le marché national dans un vaste marché Euro-maghrébin

Au MAROC, Le secteur de l'électricité a enregistré une augmentation soutenue de la demande durant la dernière décennie. Celle-ci a connu une croissance moyenne de 6,1% par an, passant de 11 770 GWh en 1998 à 26 531 GWh en 2010.

Ventes d'énergie	: 18 496,7 MDh
	: 23 751 GWh
• Nombre de clients	: 4 267 798
• Energie nette appelée	: 26 530,6 GWh
• Production d'énergie électrique	: 22 851,4 GWh

Production Thermique	: 18 409,9 GWh
Production Hydraulique	: 3 467,8 GWh
Production STEP*	: 163,03 GWh
Production Eolienne	: 658,8 GWh
Tiers Nationaux	: 151,8 GWh

- **Solde des échanges avec l'Espagne** : **3 902,5 GWh**
- **Solde des échanges avec l'Algérie** : **36,9 GWh**
- **Puissance installée** : **6 343,7 MW**
- **Réseau de transport et distribution**
- **Longueur des lignes**

THT/HT	20 877 km
MT	68 310 km
BT	162 385 km
Total	251 572

Puissance installée

	Nombre de Transo	Puissance installée (MVA)
THT/HT	125	16 000
HT/MT	394	5 917
Total	519	21 917

Nombre de villages électrifiés dans le cadre du PERG en 2010 : 1 143**

I.3 - Choix des grandeurs électriques pour le transport d'énergie

I.3.1 - Caractéristiques d'un réseau alternatif

Un réseau électrique est caractérisé par :

- le nombre de phases;
- la tension U ;
- la fréquence f ;
- la puissance de transfert.

Exemple:

Réseau triphasé, 3 x 400 V/230 V-50 Hz-10 KVA

La tolérance :

- Fréquence (50 Hz) \pm 1Hz
- Tension HTA (12 à 24 kV) \pm 7%
- Tension BT (220 ou 400V) aérien -10% / $+6\%$, souterrain \pm 5%

Choix des tensions : Le choix de la tension est déterminé par la fonction à réaliser, transport, distribution ou utilisation et selon les puissances disponibles, les distances qui séparent les sources et les récepteurs ainsi les pratiques et habitudes locales.

Niveau de tension

Classification selon nouvelle norme UTE C 18 – 510 :

HTB : $U_{com} > 50 \text{ kV}$

HTA : $1 \text{ kV} < U_{com} \leq 50 \text{ kV}$

BTB : $500 \text{ V} < U_{com} \leq 1 \text{ kV}$

BTA : $50 \text{ V} < U_{com} < 500 \text{ V}$

TBT : $U_{com} \leq 50 \text{ V}$

Classification selon norme CEI 38

Valeurs normalisées de U_{com}

HT : 45kV - 66kV - 110kV - 132kV - 150 kV - 220 kV

MT : 1000 V $< U_{com} < 35 \text{ kV}$
: 3,3 kV - 6,6 kV - 22 kV - 33 kV

BT : 100 V $< U_{com} < 1000 \text{ V}$
: 400 V - 690 V - 1000 V

I.3.2 – Notions de base

Un déplacement d'électrons dans un conducteur crée un courant électrique. L'énergie qui en résulte peut être convertie par des utilisateurs (chaleur, mouvement mécanique, informations...).

Les trois parties d'un circuit électrique sont : la source, le conducteur, la charge.

Les électrons dans un conducteur ne peuvent se déplacer que s'il y a une différence de potentiel. Cette différence de potentiel est appelée **tension** et se mesure en volts [V].

S'il y a une tension entre deux points d'un circuit électrique, un mouvement de charges (électrons) va se créer pour compenser cette différence. Ce mouvement, appelé **courant**, il se mesure en ampères [A].

Lorsque le mouvement de charges est toujours dans le même sens, le courant s'appelle **courant continu**. De même, la tension s'appelle tension continue.

Si ce mouvement alterne d'un sens à un autre, on parle de **courant alternatif** et de tension alternative

En régime alternatif, la valeur moyenne est nulle

On définit:

– la valeur de crête \hat{U} et \hat{I} ;

- la valeur efficace: $U_{eff} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}}$ et $I_{eff} = \frac{\hat{I}}{\sqrt{2}}$

Fréquence

Le nombre de cycles complets en 1 seconde est appelé fréquence. Elle se mesure en hertz [Hz]

La fréquence 50 Hz correspond à 50 cycles par seconde. Le cycle (ou la période) T correspond à une durée de 20 ms.

Facteur de puissance $\cos \varphi$

Certains utilisateurs électriques peuvent créer un retard entre la tension et le courant.

L'instant où le courant est maximum ne correspond pas nécessairement au maximum de tension

Puissance active

La puissance active est la puissance qui participe à la transformation effective. Cette puissance intéresse l'utilisateur; elle sera convertie en puissance utile, soit thermique (chaleur), mécanique (rotation), chimique (électrolyse). Elle est donnée par

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \text{ (alternatif) [W]}$$

$$P = U \cdot I \text{ (continu) [W]}$$

Puissance réactive

La puissance réactive est une puissance nécessaire à la création du champ magnétique dans des inductances ou du champ électrique dans des capacités.

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi \text{ (alternatif) [var]}$$

$$Q = 0 \text{ (continu) [var]}$$

Puissance apparente

La puissance apparente est une puissance qui transite dans la ligne.

$$S = U \cdot I \text{ (alternatif) [VA]}$$

$$S = U \cdot I \text{ (continu) [VA]}$$

$$S = (P^2 + Q^2)^{1/2}$$

Energie

L'énergie active est le produit d'une puissance active et d'une durée (temps). Elle s'exprime par : $E = P \cdot t$ [J]

L'unité de l'énergie est le joule qui correspond à une puissance de 1 W pendant 1 s.

$$1 \text{ J} = 1 \text{ W} \cdot 1 \text{ s}$$

L'unité utilisée pour l'énergie électrique est le [kWh]

$$1 \text{ kWh} = 1000 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 3600 \text{ kJ}$$

Avantages du courant alternatif

Le courant alternatif présente certains avantages par rapport au courant continu:

- faible coût de transport ;
- transformation facile;
- moteurs et générateurs alternatifs plus faciles à construire;
- éléments d'enclenchement et de coupure plus simples.

I.4 - Rendement en transport et pertes en ligne

La distribution de l'énergie électrique par un réseau couvrant toute la surface par laquelle les fournisseurs autant que les consommateurs sont répartis, ne passe pas sans pertes.

Le rendement du transport vaut :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P - K \times P}{P} = 1 - K$$

P1: La puissance à l'entrée de la ligne

P2 : La puissance à la sortie de la ligne

K : la fraction de la puissance à l'entrée que l'on admet perdre

Les valeurs admissibles pour K, dépendront du rendement que l'on estime devoir réaliser pour le transport et les pertes que peuvent s'y manifester.

Pertes par effet Joule

- *Ligne monophasée* :

$$P_J = 2 R I^2 = 2R \frac{P^2}{E^2 \cos^2 \varphi} = \frac{2 \rho L}{S} \frac{P^2}{E^2 \cos^2 \varphi}$$

$$K = \frac{P_J}{P} = \frac{2 \rho L}{S} \frac{P}{E^2 \cos^2 \varphi}$$

- *Ligne triphasée*

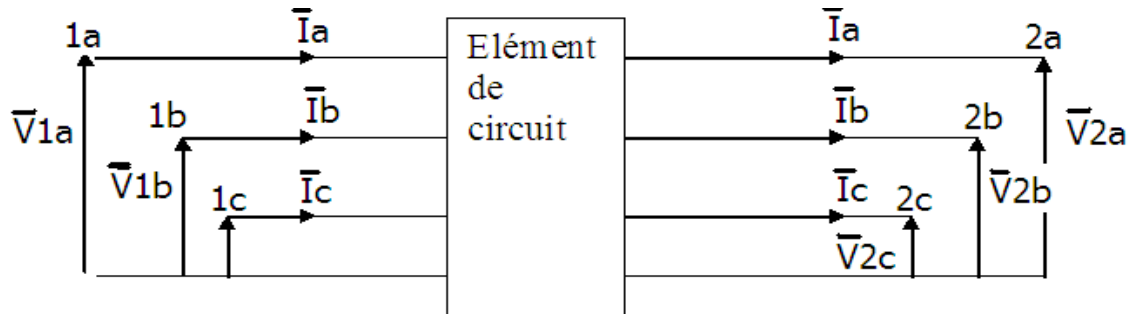
$$P_J = 3 R I^2 = R \frac{P^2}{E^2 \cos^2 \varphi} = \frac{\rho L}{S} \frac{P^2}{E^2 \cos^2 \varphi}$$

$$K = \frac{P_J}{P} = \frac{\rho L}{S} \frac{P}{E^2 \cos^2 \varphi}$$

Chapitre II - Élément de mathématique et d'électrotechnique

II.1 - Réseau à symétrie triphasé

Considérons un élément de circuit d'un réseau triphasé représenté comme suit:



$$\begin{pmatrix} \bar{V}_{1a} - \bar{V}_{2a} \\ \bar{V}_{1b} - \bar{V}_{2b} \\ \bar{V}_{1c} - \bar{V}_{2c} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta \bar{V}_a \\ \Delta \bar{V}_b \\ \Delta \bar{V}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{Z}_{aa} \bar{Z}_{ab} \bar{Z}_{ac} \\ \bar{Z}_{ba} \bar{Z}_{bb} \bar{Z}_{bc} \\ \bar{Z}_{ca} \bar{Z}_{cb} \bar{Z}_{cc} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{pmatrix}$$

Cet élément du réseau est à symétrie triphasé si sa matrice des impédances Est circulante de type:

$$[\bar{Z}] = \begin{bmatrix} \bar{Z}_A & \bar{Z}_B & \bar{Z}_C \\ \bar{Z}_C & \bar{Z}_A & \bar{Z}_B \\ \bar{Z}_B & \bar{Z}_C & \bar{Z}_A \end{bmatrix}$$

Réseau à symétrie triphasé équilibré.

Un système triphasé :

$$v_1(t) = V_1 \text{eff} \sqrt{2} \cos \omega t$$

$$v_2(t) = V_2 \text{eff} \sqrt{2} \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$v_3(t) = V_3 \text{eff} \sqrt{2} \cos \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right)$$

Ce système est dit équilibré lorsque : $V_1 = V_2 = V_3 = V$

Un récepteur est dit équilibré lorsque : $Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z$

II.2 - Composantes symétriques

Le calcul à l'aide des composantes symétriques est particulièrement utile lorsqu'un réseau triphasé est déséquilibré.

$$\bar{V}_1 = V_{eff} \times e^{-j\varphi_0} = V$$

$$\bar{V}_2 = V_{eff} \times e^{-j(\varphi_0 + \frac{2\pi}{3})} = V \times e^{-j\frac{2\pi}{3}}$$

$$\bar{V}_3 = V_{eff} \times e^{-j(\varphi_0 + \frac{4\pi}{3})} = V \times e^{-j\frac{4\pi}{3}}$$

L'opérateur complexe (**a**) correspond à une rotation de $2\pi/3$ dans le plan de Fresnel tel que :

$$\mathbf{a} = e^{j2\pi/3} = e^{-j4\pi/3}$$

$$\mathbf{a}^2 = e^{j4\pi/3} = e^{-j2\pi/3}$$

II.2.1 - Réseau en régime équilibré

Un système triphasé sinusoïdal équilibré est formé par trois grandeurs sinusoïdales ayant même amplitude, même pulsation, mais présentant deux à deux un déphasage de 120° .

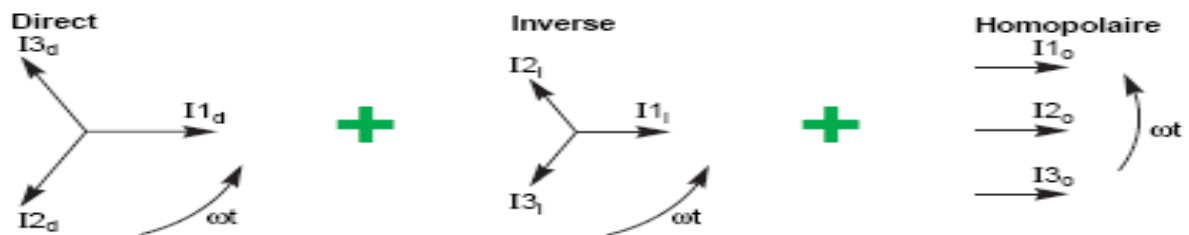
Un système triphasé dont toutes les sources sont équilibrées et de même nature (h,d,i), toutes les grandeurs électriques homologues sont équilibrées de même nature (h,d,i).

Ce qui implique que la connaissance d'une grandeur électrique dans une phase entraîne sa connaissance dans les autres phases.

II.2.2 - Réseau en régime déséquilibré

Théorème de Fortescue:

Toutes grandeurs sinusoïdales de même nature se succèdent dans un ordre direct, sont égales à la somme des trois systèmes, Homopolaires, Directs et Inverses.



Le calcul à l'aide des composantes symétriques est particulièrement utile lorsqu'un réseau triphasé est déséquilibré.

$$\begin{cases} \bar{V}_a = \bar{V}_h + \bar{V}_d + \bar{V}_i \\ \bar{V}_b = \bar{V}_h + \mathbf{a}^2 \bar{V}_d + \mathbf{a} \bar{V}_i \\ \bar{V}_c = \bar{V}_h + \mathbf{a} \bar{V}_d + \mathbf{a}^2 \bar{V}_i \end{cases}$$

On peut encore écrire le système comme suit:

$$[\bar{V}]_{h,d,i} = [F]^{-1} \cdot [\bar{V}]_{a,b,c}$$

$$\begin{cases} \bar{V}_h = \frac{1}{3} \cdot (\bar{V}_a + \bar{V}_b + \bar{V}_c) \\ \bar{V}_d = \frac{1}{3} \cdot (\bar{V}_a + a\bar{V}_b + a^2\bar{V}_c) \\ \bar{V}_i = \frac{1}{3} \cdot (\bar{V}_a + a^2\bar{V}_b + a\bar{V}_c) \end{cases}$$

II.3 - Grandeurs réduites

Le système « Per Unit » est un système de grandeurs réduites. Son application à la modélisation des réseaux électriques est appréciable, afin de simplifier les schémas équivalents et par la suite faciliter les calculs et la modélisation des lignes.

$$Gr_{réduite} = \frac{Gr_{réelle}}{Gr_{base}} \quad (\text{sans dimensions})$$

En électrotechnique on choisit :

S_b : Puissance de base **commune à tout le circuit**

U_b : Tension de base **selon le niveau de tension de la zone**

Pour garder les mêmes expressions des équations en grandeurs réduites que celles en grandeurs réelles, il faut que les grandeurs de bases soient dépendantes.

Système monophasé :

$$\text{puissance de base : } \bar{S}_b = \bar{V}_b \cdot \bar{I}_b^*$$

$$\Rightarrow \mathbf{s} = \mathbf{v} \cdot \mathbf{i}^*$$

$$\text{Impédance de base : } \bar{Z}_b = \frac{\bar{V}_b}{\bar{I}_b} = \frac{|\bar{V}_b|^2}{\bar{S}_b}$$

$$\Rightarrow \mathbf{z} = \frac{\mathbf{v}}{\mathbf{i}}$$

$$\text{Admittance de base } \bar{Y}_b = \frac{1}{\bar{Z}_b} = \frac{\bar{S}_b}{\bar{V}_b^2}$$

$$\Rightarrow \mathbf{y} = \frac{\mathbf{i}}{\mathbf{v}}$$

Temps de base, en pratique on choisit : $T_b = 1s$

Inductance de base : $L_b = \bar{Z}_b$

Capacité de base : $C_b = \bar{Y}_b$

Changement de base

ancienne base (1): $\bar{Z}_{b1}; z_1; \bar{Z} = z_1 \cdot \bar{Z}_{b1}$

nouvelle base (2): $\bar{Z}_{b2}; z_2; \bar{Z} = z_2 \cdot \bar{Z}_{b2}$

avec : $\bar{Z}_{b1} = \frac{|\bar{V}_{b1}|^2}{\bar{S}_{b1}}; \bar{Z}_{b2} = \frac{|\bar{V}_{b2}|^2}{\bar{S}_{b2}}$

D'où : $z_2 = z_1 \cdot \frac{|\bar{V}_{b1}|^2}{\bar{S}_{b1}} \cdot \frac{\bar{S}_{b2}}{|\bar{V}_{b2}|^2}$

Extension aux systèmes triphasés:

S_b : Puissance triphasée de base **commune à tout le circuit**

U_b : Tension composée de base **selon le niveau de tension de la zone**

Chapitre III – Modélisation des caractéristiques d'un réseau électrique

Pour étudier l'ensemble du réseau il est nécessaire de modéliser les différents éléments du réseau(en régime permanent).

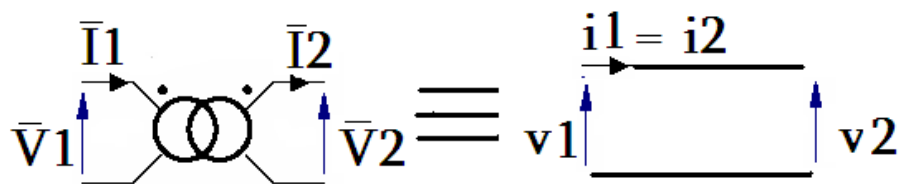
III.1- Transformateur

III.1.1- Transformateur monophasé

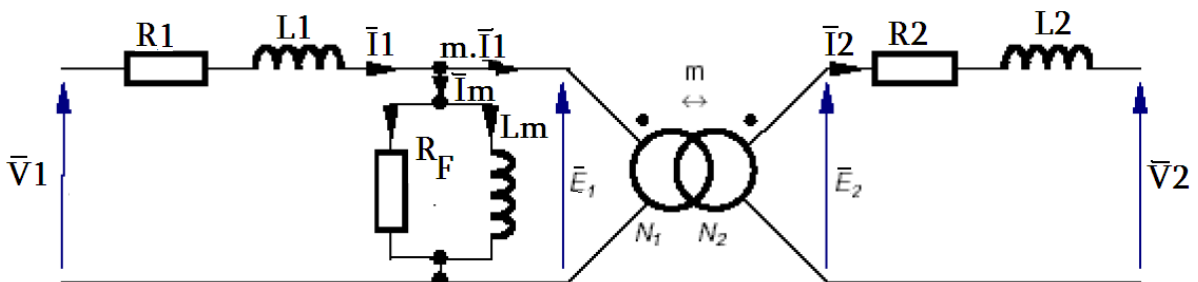
a- Transformateur monophasé parfait

Un transformateur parfait n'est qu'un modèle simple non réalisable d'un transformateur réel tout en négligeant les pertes et les courants de fuites.

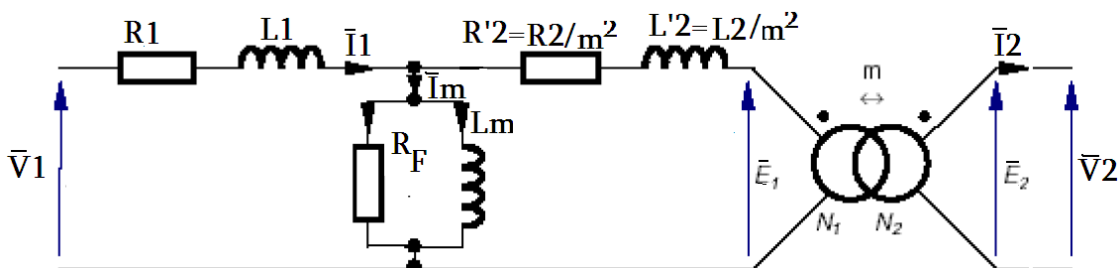
Un transformateur parfait en grandeur réduite disparaît.



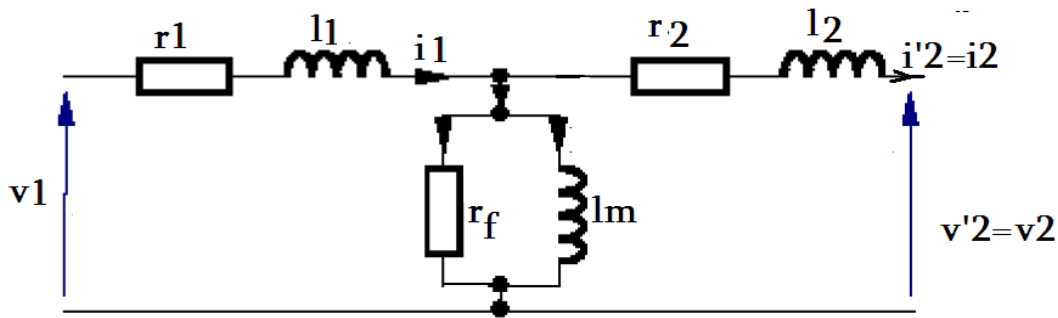
b - Transformateur monophasé réel



c-Schéma ramené au primaire



d - Transformateur en grandeurs réduites



Les paramètres du schéma en grandeurs réduites peuvent être déterminés à partir de **la plaque signalétique**, de l'essai à vide et de l'essai en court-circuit.

- **Données du plaque signalétique:** S_n ; V_{1nom}/V_{2nom} ; $v_{cc}(\%)$

$$v_{cc} = \frac{\bar{V}_{1cc}}{V_{1nom}} = x_T = x_1 + x_2$$

- **L'essai à vide:**

$$p_{10} = \frac{P_{10}}{S_b} = \frac{V_{10}^2}{R_F} \times \frac{1}{S_b} = \frac{\bar{Z}_{b1}}{R_F} = \frac{1}{r_f}$$

➔ $r_f = \frac{1}{p_{10}}$ et $x_m = \frac{1}{q_{10}} = \frac{1}{i_m}$

- **L'essai en court-circuit:**

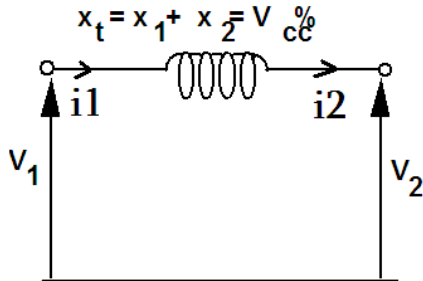
$$p_{1cc} = r_1 + r_2 = r_T$$

$$q_{1cc} = x_1 + x_2 = x_T \approx v_{cc}$$

e - Schéma simplifié du transformateur en grandeurs réduites

Les réseaux électriques utilisent des transformateurs dont la puissance est supérieure généralement à 100KVA, d'où :

- le courant magnétique peut être négligé vis à vis des courants de charges.
- Ainsi les résistances (r_T) peuvent être négligeables devant les réactances (x_T).



III.1.2 - Transformateur triphasé à deux enroulements

Un transformateur triphasé à deux enroulements de point de vue impédance directe ou inverse est équivalent à trois enroulements monophasés, dont les primaires et les secondaires sont couplés en étoile.

Les éléments de réseaux, autres que les machines tournantes présentent au passage des courants équilibrés une impédance dont la valeur est indépendante de l'ordre de succession des phases. En conséquence : $Z_d = Z_i$

L'impédance se calcule à partir de la tension de court-circuit U_{cc} exprimée en % :

$$Z_T = \frac{U_{cc}}{100} \cdot \frac{U^2}{S_n} \text{ avec}$$

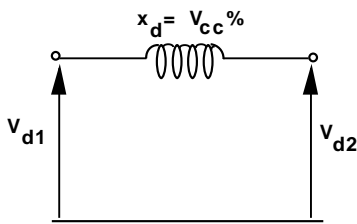
U = tension composée à vide du transformateur,

S_n = puissance apparente du transformateur.

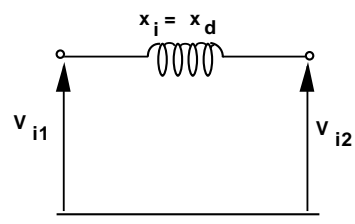
Limite supérieure de surintensité traversant les enroulements des transformateurs		
(valeur efficace symétrique exprimée en multiples du courant nominal)		
Puissance nominale (kVA)	Limite supérieure de la surintensité	Impédance équivalente (%)
Jusqu'à 630	25	4
De 631 à 1 250	20	5
De 1 251 à 3 150	16	6,25
De 3 151 à 6 300	14	7,15
De 6 301 à 12 500	12	8,35
De 12 501 à 25 000	10	10
De 25 001 à 100 000	8	12,5

Les schémas monophasés équivalents :

SMED :



SMEI :



La construction du schéma homopolaire nécessite une attention particulière toute en dépendant du circuit magnétique (flux libre ou forcé) et du couplage des enroulements primaires et secondaires.

Pour construire les SMEH, on supposera la réactance vue du secondaire.

Couplages	SMEH	Z_h
$D_y ; Y_y ; D_d ; Y_d$		$Z_h = \infty$
Dy_n		$Z_h = Z_d$
Yy_n	FL	$Z_h = \infty$
	FF	$Z_h = 10 \cdot Z_d$
$Y_n Y_n$	FL	$Z_h = \infty$
	FF	$Z_h = 10 \cdot Z_d$
	Si le réseau amont est relié à la terre	$Z_h = Z_d$
$DZ_n ; YZ_n$		$Z_h = 2 \text{ à } 5 \%$

III.1.3 - Transformateur triphasé à trois enroulements

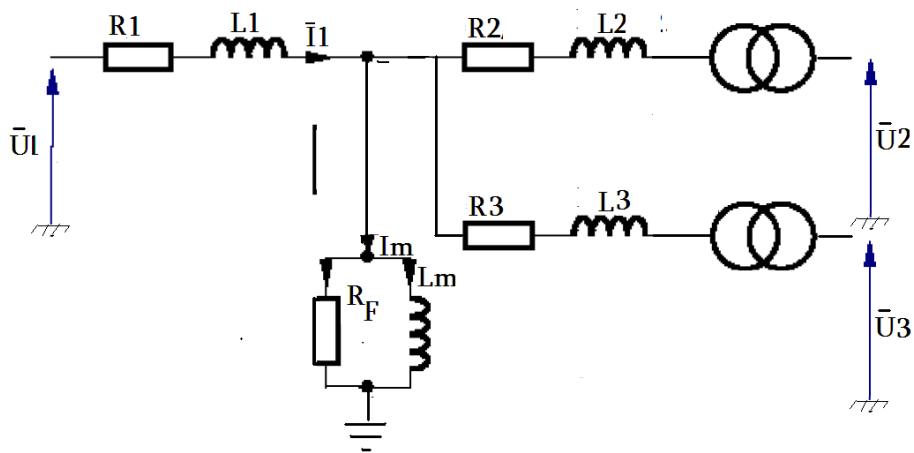
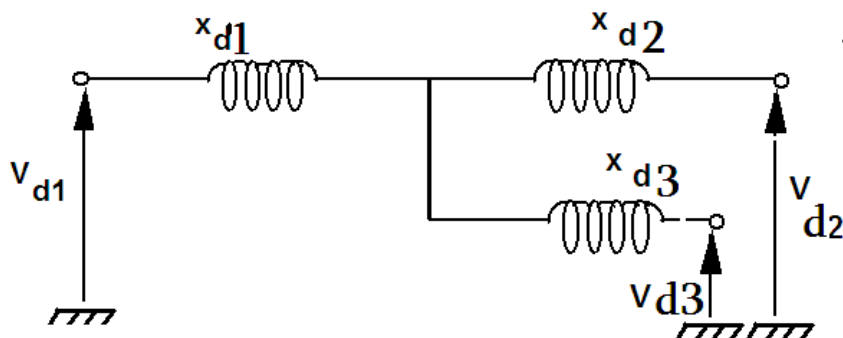


Schéma simplifié du transformateur à trois enroulements en grandeurs réduites



On pratique, les réactances directes se déterminent à partir des essais de court-circuit pratiqués sur les enroulements prises deux à deux.

$$\bar{Z}_{d1} = \frac{\bar{Z}_{d12} + \bar{Z}_{d31} - \bar{Z}_{d23}}{2}$$

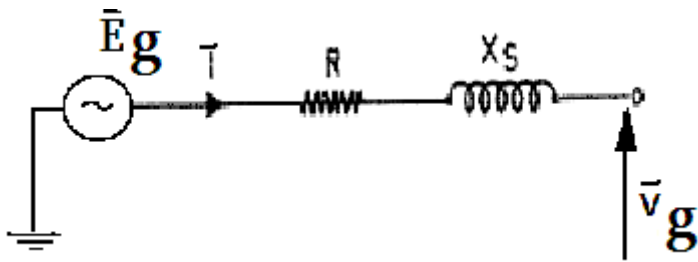
$$\bar{Z}_{d2} = \frac{\bar{Z}_{d23} + \bar{Z}_{d12} - \bar{Z}_{d31}}{2}$$

$$\bar{Z}_{d3} = \frac{\bar{Z}_{d31} + \bar{Z}_{d23} - \bar{Z}_{d12}}{2}$$

Pour Le SMEH, cela dépend du couplage de chaque enroulement.

III.2 -Modélisation des machines synchrones

Le schéma équivalent d'une phase de la machine synchrone est :



Les valeurs de R et X_s dépendent du régime considéré :

X_s (pu) possède une valeur : - nominale, transitoire, subtransitoire.

Pour un calcul de répartition de charge, on considère la valeur nominale.

Pour un calcul simplifié de court-circuit, on considère la valeur transitoire ou subtransitoire.

X _{cc}	Subtransitoire	Transitoire	Permanent
Turbo	10 à 20%	15 à 25%	200 à 350%
Pôles saillants	15 à 25%	25 à 35%	70 à 120%

-L'impédance inverse est faible que la réactance directe. Elle correspond aux fuites magnétiques entre le stator et la périphérie du rotor. Elle est estimée voisine de 20%.

-L'impédance homopolaire plus faible par rapport à l'impédance directe, voisine de 10%

Valeurs approximatives subtransitoires :

$$x_d \approx 30\% > x_i \approx 20\% > x_h \approx 10\%$$

III.3 - Modélisation des machines asynchrones

Les impédances des machines sont généralement exprimées sous la forme d'un pourcentage telle que:

$$\frac{x}{100} = \frac{I_n}{I_{cc}}$$

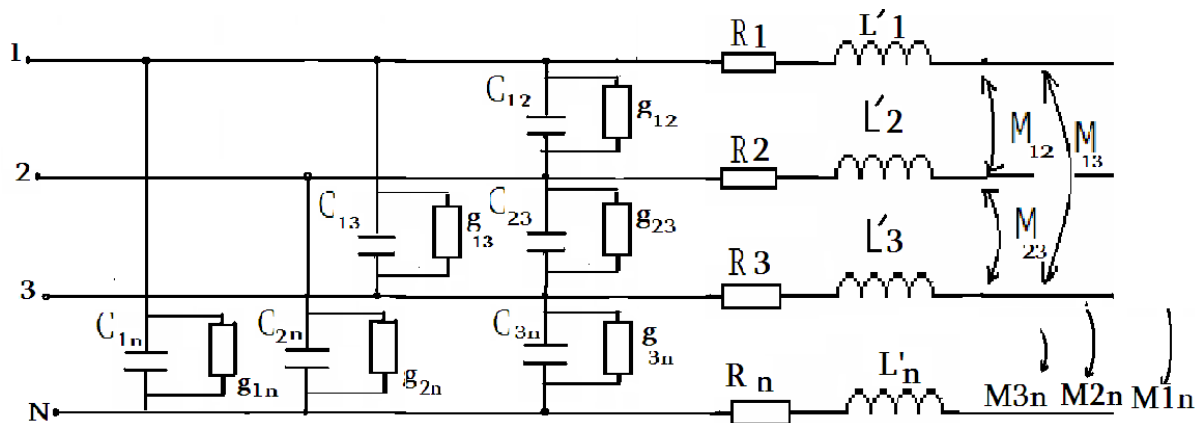
X _{cc}	Subtransitoire	Transitoire	Permanent
Moteurs à G vitesse	15%	25%	80%
Moteurs à P vitesse	35%	50%	100%
Compensateurs	25%	40%	160%

Valeurs approximatives subtransitoires :

$$x_d \approx x_i \approx 30\% > x_h \approx 10\%$$

III.4 - Modélisation des Lignes électriques

Lorsque cette ligne sera mise sous tension, elle sera le siège d'une chute de tension longitudinale et d'une dérivation de courant transversale



L matérialise l'énergie magnétique emmagasinée par unité de longueur ;
 R matérialise les pertes longitudinales par effet Joule ;
 C matérialise l'énergie électrostatique ;
 G matérialise les pertes transversales par effet Joule.

L'impédance :

$$\bar{Z}_L = \frac{R}{a} + jX$$

Avec : a : la section du câble en mm².

R: la résistance kilométrique par phase d'un conducteur (Ω.mm²/km)

X : la réactance linéique par phase d'un conducteur (Ω)

Les valeurs estimées des réactances :

- Lignes aériennes

HT : X = 0,4 Ω/Km

MT/BT : X = 0,3 Ω/Km

- Câble triphasé ou unipolaire : X = 0,1 Ω/Km
- Jeu de barres : X = 0,15 Ω/Km

Chapitre IV- Calcul des courants de court-circuit

IV.1 - Types de défaut de court-circuit et ses effets sur la ligne

Les réseaux électriques peuvent être le siège d'un certain nombre d'incidents dus en général à l'apparition de défauts de court-circuit causés par :

- Une origine externe (contact de branches ou d'oiseaux ; choc mécanique ; coup de foudre ; etc ;;;)
- Une origine interne (cas de surtensions)

Les défauts qui se manifestent sur les réseaux peuvent être momentanés (défauts fugitifs) ou permanents, ces défauts peuvent avoir plusieurs sortes de conséquences :

- Explosion de disjoncteurs
- Efforts électrodynamiques
- Perturbation dans les lignes de télécommunications
- Chutes de tension

La valeur de l'intensité de courant de court-circuit en un point donné est fonction de :

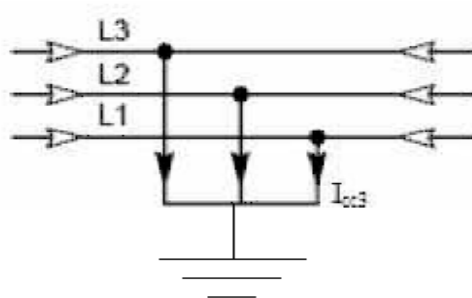
- La nature des éléments qui constituent le réseau
- La structure du réseau
- La mode de l'exploitation du réseau
- La résistance de défaut

Le court-circuit peut affecter une ou plusieurs phases ainsi que la terre, les cas les plus typiques sont :

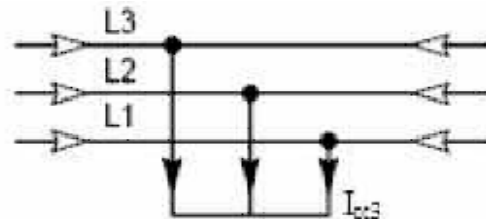
- Le courant de court-circuit triphasé qui est symétrique et généralement le plus élevé qui peut circuler dans le réseau
- Le courant de court-circuit biphasé qui est déséquilibré est toujours plus faible que le courant de court-circuit triphasé.

Le courant de court-circuit monophasé qui est déséquilibré et qui peut être le plus élevé dans le cas du défaut proche du générateur.

Défaut triphasé : les trois phases sont réunies ensemble (5% des cas)



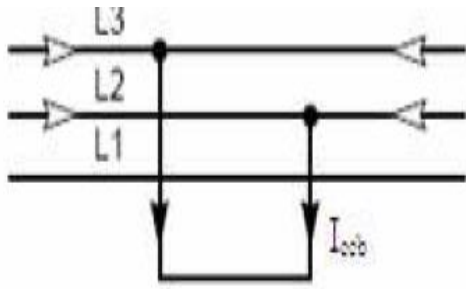
Défaut triphasé + terre



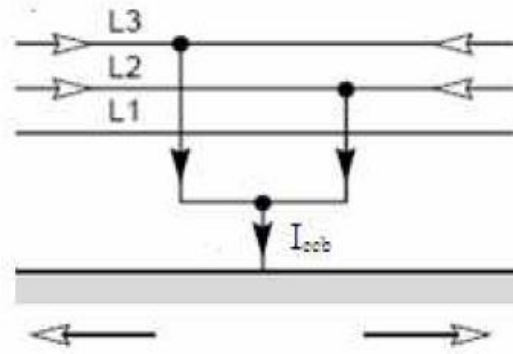
Défaut triphasé symétrique

Défaut biphasé : deux phases sont raccordées ensemble (15% des cas). On distingue les défauts biphasé/terre et biphasé isolé.

Les défauts biphasés isolés sont fréquemment causés par un vent violent qui provoque un contact entre deux conducteurs de 2 phases.



Court-circuit biphasé isolé

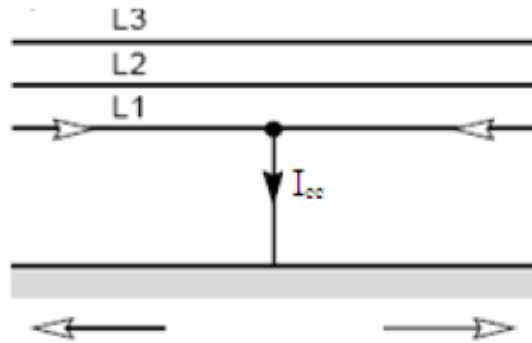


Court-circuit biphasé à la terre

Défaut monophasé :

Une phase est reliée au neutre ou à la terre (80% des cas).

Sur une ligne à haute tension, ce type de défaut est fréquemment causé par la foudre qui initie un court-circuit entre une phase et la terre.



Court circuit monophasé

IV-2 – Expression générale des courants de défaut triphasé

Le défaut étant symétrique seule l'impédance directe équivalente intervient, soit

$$Z_d = R_d + jX_d \text{ (} X_d = L_d \omega \text{)}.$$

D'après le schéma relatif à ce défaut, pour $e(t) = E\sqrt{2}\cos(\omega t + \varphi_0)$, le courant de défaut s'écrit :

$$i(t) = \frac{E\sqrt{2}}{\sqrt{R_d^2 + X_d^2}} (\cos(\omega t - \varphi_0 - \varphi) - e^{-\frac{t}{T_a}} \cos(\varphi_0 - \varphi))$$

$T_a = L_d / R_d$: Constante de temps aperiodique

$$\tan \varphi = \frac{X_d}{R_d}$$

Pour $\varphi_0 = \varphi + \frac{\pi}{2}$ le défaut est parfaitement symétrique.

Pour $\varphi_0 = \varphi$ la composante symétrique est maximale.

L'impédance du réseau d'alimentation ne peut être considérée comme constante que si les machines tournantes sont loin du point de défaut. Sinon il faut tenir compte de la variation en fonction du temps des impédances de ces machines :

- Le courant de défaut en provenance d'une machine synchrone lors d'un défaut triphasé franc à ses bornes est donné par l'expression approchée :

$$i(t) = V\sqrt{2}\left(\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'}\right)e^{\frac{-t}{T_d''}} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d}\right)e^{\frac{-t}{T_d'}} + \frac{1}{X_d}\right)\cos\omega t - \frac{V\sqrt{2}}{X_d''}e^{\frac{-t}{T_a}}$$

V : tension simple aux bornes de la machine

X_d'' , X_d' et X_d Réactances Subtransitoire, transitoire et synchrone de la machine

T_d'' et T_d' Constantes de temps subtransitoire et transitoire de la machine

T_a Constante de temps aperiodique de la machine.

- Le courant de court-circuit en provenance d'une machine asynchrone est donné par l'expression approchée :

$$i(t) = \frac{V\sqrt{2}}{X_m} \left(e^{\frac{-t}{T'}} \cos\omega t - e^{\frac{-t}{T_a}} \right)$$

V : tension simple aux bornes de la machine

X_m : impédance du moteur à rotor bloqué

T' : constante de temps périodique.

T_a : constante de temps aperiodique

Ces expressions supposent que la vitesse du moteur ne varie pas pendant les défauts, hypothèse vraie en première approximation car les constantes de temps électriques sont très petites par rapport à la constante de temps mécanique imposée par les inerties mises en jeu.

En généralisant ces expressions à tous les cas de défaut, une forme générale de tout courant de défaut peut se mettre sous la forme :

$$i(t) = \sum_{j=1}^n i_{apj}(t) + \sum_{j=1}^n i_{perj}(t)$$

$i_{perj}(t)$ désigne la composante périodique en provenance de la source j ; elle a pour expression

$$\text{générale : } i_{perj}(t) = \sqrt{2}\left(\left(I_j'' - I_j'\right)e^{\frac{-t}{T_j''}} + \left(I_j' - I_j\right)e^{\frac{-t}{T_j'}} + I_j\right)\cos\omega t$$

I_j'' : Valeur efficace symétrique subtransitoire en provenance de la source j.

I_j' : Valeur efficace symétrique transitoire en provenance la source j

I_j : Valeur efficace symétrique permanente en provenance de la source j

T_j'' : Constante de temps subtransitoire due à la source j

T_j' : Constante de temps transitoire due à la source j

$i_{apj}(t)$ Désigne la composante aperiodique en provenance de la source j ; son expression générale s'écrit :

$$i_{apj}(t) = -\sqrt{2}I_j''e^{\frac{-t}{T_{aj}}}$$

I_j'' : Valeur efficace subtransitoire en provenance de la source j

T_{aj} : Constante de temps aperiodique de la source j

IV.3- Méthode de calcul des courants de court-circuit maximaux

IV.3.1- Calcul de défaut de court-circuit dans un réseau radial

La méthode de calcul des courts circuits est la méthode des impédances :

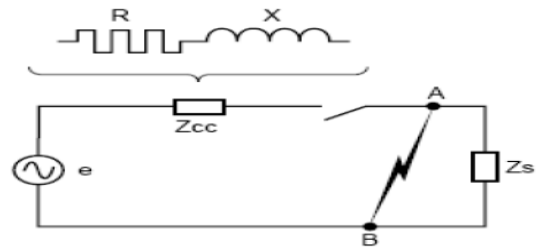
- Faire la somme des résistances et des réactances en amont de ce point
- Calcul de courant de court-circuit en point de défaut selon le type de défaut, en prenant la tension en ce point du régime sain juste avant le défaut.

Le calcul de l'intensité de court-circuit se résume alors au calcul de l'impédance de court-circuit Z_{cc} , impédance équivalente à toutes les impédances parcourues par I_{cc} du générateur jusqu'au point de défaut.

Schéma simplifié d'un réseau :

L'impédance équivalente est : $Z_{cc} = \sqrt{\sum R^2 + \sum X^2}$

Avec : ΣR = somme des résistances en série ;
 ΣX = somme des réactances en série.



I_{cc} (triphasé, symétrique) :

$$I_{cc_{3\phi}} = \frac{U_{nom}}{\sqrt{3}|\overline{Z_d}|}$$

I_{cc} biphasé:

$$I_{cc_{2\phi}} = \frac{U_{nom}}{|\overline{Z_d} + \overline{Z_i}|}$$

I_{cc} monophasé :

$$I_{cc_{1\phi}} = \frac{\sqrt{3}.U_{nom}}{|\overline{Z_d} + \overline{Z_i} + \overline{Z_h}|}$$

I_{cc} biphasé+terre:

$$I_{cc_{2\phi+T}} = \frac{\sqrt{3}.U_{nom}.|\overline{Z_i}|}{|\overline{Z_d}.\overline{Z_i} + \overline{Z_i}.\overline{Z_h} + \overline{Z_d}.\overline{Z_h}|}$$

Le facteur de tension (c) dont l'introduction dans les calculs est nécessaire pour tenir compte :

- des variations de tension dans l'espace et dans le temps;
- des changements éventuels de prise des transformateurs ;
- du comportement subtransitoire des alternateurs et des moteurs.

Tension nominale U_n	Facteur de tension c pour le calcul de	
	$I'_{cc} \text{ max}$	$I'_{cc} \text{ mini}$
BT (100 à 1000 V)		
Si tolérance + 6 %	1,05	0,95
Si tolérance + 10 %	1,1	0,95
HT		
1 à 550 kV	1,1	1

IV.3.2- La puissance de court-circuit

La puissance de court-circuit d'une portion de réseau est le triple produit de la tension simple en régime sain nominal par le courant de défaut I_{cc} (généralement c'est le courant de court-circuit triphasé)

$$P_{cc} = \sqrt{3} \cdot \bar{U}_{nom} \cdot \bar{I}_{cc} = S_{cc} (VA)$$

$$P_{cc} = 3 \cdot \bar{V}_{1nom} \cdot \bar{I}_{cc}$$

IV.3.3- L'impédance de court-circuit

L'impédance de court-circuit est définie comme l'impédance directe transitoire associée à un accès donné.

$$\bar{Z}_{cc} = \bar{Z}_d = \frac{\bar{V}_{1nom}}{\bar{I}_{1nom}} = \frac{\bar{U}_{1nom}}{\sqrt{3} \bar{I}_{cc}}$$

$$\bar{Z}_{cc} = \bar{Z}_d = \frac{3(\bar{V}_{1nom})^2}{3 \cdot \bar{V}_{1nom} \cdot \bar{I}_{1cc}} = \frac{|\bar{U}_{nom}|^2}{S_{cc}}$$

En général l'impédance de court-circuit est considérée comme réactance :

$$\bar{Z}_{cc} = j \cdot \frac{|\bar{U}_{nom}|^2}{S_{cc}}$$

IV.3.4 - L'impédance amont

L'impédance amont en un point donné du réseau est prise égale à l'impédance de court-circuit en ce point, et elle est en général assimilée à une réactance:

$$\bar{Z}_a = \bar{Z}_{cc} = j \cdot \frac{|\bar{U}_{nom}|^2}{S_{cc}}$$

Une carte publiée par l'ONE donne en chaque point du réseau d'interconnexion la valeur de la puissance de court-circuit jusqu'au MT (60KV) .

Le rapport R/X est égale à:

0,3 en 6 kV

0,2 en 20 kV

0,1 en 150 kV

IV.4 – Calcul de défaut de court-circuit dans un réseau maillé

Le problème se résout en appliquant la loi de superposition ;

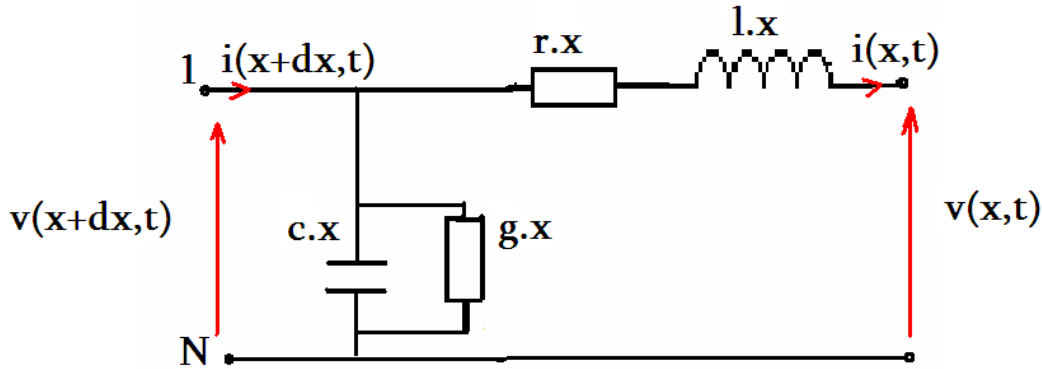
On établit Le schéma monophasé équivalent :

- On appliquant les forces électromotrices d'une façon à en avoir seulement qu'une Seule.
- En appliquant les transformations des impédances de l'étoile en triangle ou l'inverse et en les associant en séries et en parallèles d'une façon à en avoir qu'une impédance équivalente vue du point de défaut.

Chapitre V - Modélisation des lignes de transport en régime permanent

V.1 – Modèle d'une ligne de transport

Considérons une cellule élémentaire localisée entre (x) et (x+dx) de la figure suivante:



Les équations qui en découlent :

$$(1) \begin{cases} \frac{\partial v}{\partial x} = Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} \\ \frac{\partial i}{\partial x} = Gv + C \frac{\partial v}{\partial t} \end{cases}$$

On peut récrire le système(1) en notation complexe :

$$(2) \begin{cases} \frac{d\bar{V}(x)}{dx} = R\bar{I}(x) + j\omega L\bar{I}(x) = \bar{Z}\bar{I}(x) \\ \frac{d\bar{I}(x)}{dx} = G\bar{V}(x) + j\omega C\bar{V}(x) = \bar{Y}\bar{V}(x) \end{cases}$$

Par dérivation par rapport à (x) du système (2) :

$$(3) \begin{cases} \frac{d^2\bar{V}(x)}{dx^2} = \bar{Z}\bar{Y}\bar{V}(x) \\ \frac{d^2\bar{I}(x)}{dx^2} = \bar{Y}\bar{Z}\bar{I}(x) \end{cases}$$

On pose :

$$\bar{\gamma}^2 = \bar{Z}\bar{Y} \quad \text{Constante de propagation en (m}^{-2}\text{)}$$

$$(4) \begin{cases} \frac{d^2 \bar{V}(x)}{dx^2} = \bar{\gamma}^2 \bar{V}(x) \\ \frac{d^2 \bar{I}(x)}{dx^2} = \bar{\gamma}^2 \bar{I}(x) \end{cases}$$

L'équation caractéristique est :

$$p^2 - \gamma^2 = 0 \quad \text{avec } p = d/dx$$

Ce qui implique :

$$(5) \begin{cases} \bar{V}(x) = C_1 \cdot e^{+\bar{\gamma} \cdot x} + C_2 \cdot e^{-\bar{\gamma} \cdot x} \\ \bar{I}(x) = \frac{\bar{\gamma}}{\bar{Z}} (C_1 \cdot e^{+\bar{\gamma} \cdot x} - C_2 \cdot e^{-\bar{\gamma} \cdot x}) \end{cases}$$

Et on pose:

$$\frac{\bar{Z}}{\bar{\gamma}} = \sqrt{\frac{\bar{Z}}{\bar{Y}}} = \bar{Z}_c$$

Z_c : appelée **impédance caractéristique** de la ligne en Ω

$$(5') \begin{cases} \bar{V}(x) = C_1 \cdot e^{+\bar{\gamma} \cdot x} + C_2 \cdot e^{-\bar{\gamma} \cdot x} \\ \bar{I}(x) = \frac{1}{\bar{Z}_c} (C_1 \cdot e^{+\bar{\gamma} \cdot x} - C_2 \cdot e^{-\bar{\gamma} \cdot x}) \end{cases}$$

On remplaçant C_1 et C_2 par leurs valeurs dans le système (5'), on obtient:

$$\bar{V}(x) = \left[\frac{e^{+\bar{\gamma}x} + e^{-\bar{\gamma}x}}{2} \right] \bar{V}_r + \left[\frac{e^{+\bar{\gamma}x} - e^{-\bar{\gamma}x}}{2} \right] \bar{Z}_c \cdot \bar{I}_r$$

$$\frac{\bar{Z}_c}{\bar{c}} \bar{I}(x) = \left[\frac{e^{+\bar{\gamma}x} - e^{-\bar{\gamma}x}}{2} \right] \bar{V}_r + \left[\frac{e^{+\bar{\gamma}x} + e^{-\bar{\gamma}x}}{2} \right] \bar{Z}_c \cdot \bar{I}_r$$

Ou bien:

$$\bar{V}(x) = \bar{V}_r \cdot \text{Ch}(\bar{\gamma}x) + \bar{Z}_c \cdot \bar{I}_r \cdot \text{Sh}(\bar{\gamma}x)$$

$$\bar{I}(x) = \frac{\bar{V}_r}{\bar{Z}_c} \cdot \text{Sh}(\bar{\gamma}x) + \bar{I}_r \cdot \text{Ch}(\bar{\gamma}x)$$

D'où:

$$\bar{A} = \bar{D} = \text{Ch}(\bar{\gamma}d) \text{ (sans dimensions)}$$

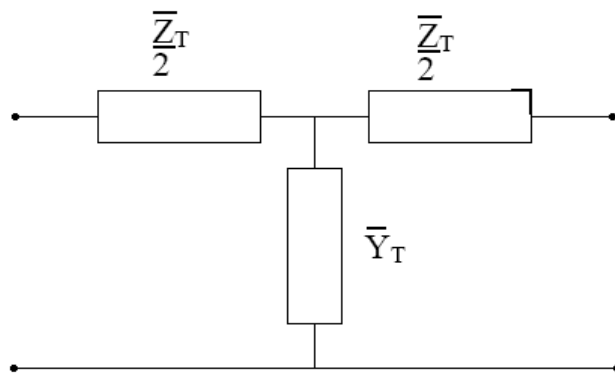
$$\bar{B} = \bar{Z}_c \cdot \text{Sh}(\bar{\gamma}d) \text{ } (\Omega)$$

$$C = \frac{1}{\bar{Z}_c} \cdot \text{Sh}(\bar{\gamma}d) \text{ } (\Omega^{-1})$$

Modèle d'une ligne en T et en π :

Comme pour tout quadripôle symétrique, on pourra établir à partir de la matrice de chaîne, les schémas en T et en π équivalents à la ligne vue de ses extrémités :

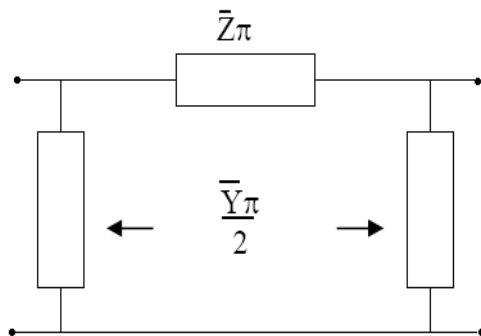
Modèle d'une ligne en T



$$\frac{\bar{Z}_T}{2} = \frac{\bar{A}-1}{\bar{C}} = \frac{\bar{Z}_c \cdot \text{Ch}(\bar{\gamma}d) - 1}{\text{Sh}(\bar{\gamma}d)}$$

$$\bar{Y}_T = \bar{C} = \frac{\text{Sh}(\bar{\gamma}d)}{\bar{Z}_c}$$

Modèle d'une ligne en π



$$\bar{Z}_\pi = \bar{B} = \bar{Z}_c \text{Sh}(\bar{\gamma}d)$$

$$\frac{\bar{Y}_\pi}{2} = \frac{\bar{A}-1}{\bar{B}} = \frac{\text{Ch}(\bar{\gamma}d) - 1}{\bar{Z}_c \cdot \text{Sh}(\bar{\gamma}d)}$$

V.2 – Cas particuliers de la ligne

- Ligne fermée sur son impédance caractéristique

$$\frac{\bar{V}_r}{\bar{I}_r} = \bar{Z}_L = \bar{Z}_c$$

$$\bar{Z}_{in} = \frac{\bar{V}_s}{\bar{I}_s} = \frac{\bar{A} \bar{Z}_L + \bar{B}}{\bar{C} \bar{Z}_L + \bar{D}} = \bar{Z}_c \cdot \frac{\bar{Z}_L \operatorname{Ch}(\bar{\gamma}d) + \bar{Z}_c \operatorname{Sh}(\bar{\gamma}d)}{\bar{Z}_L \operatorname{Sh}(\bar{\gamma}d) + \bar{Z}_c \operatorname{Ch}(\bar{\gamma}d)}$$

En remplaçant Z_L par Z_c dans la formule(1), on obtient : $\bar{Z}_{in} = \bar{Z}_c$

D'où quelle que soit la longueur de la ligne, si elle est fermée sur son impédance caractéristique, la source voit une charge dont l'impédance est égale à l'impédance caractéristique de la ligne.

- **Ligne infinie**

Si la ligne est infinie ($d \longrightarrow \infty$), d'où : $Z_{in} = Z_c$

Quelle que soit la charge, si la ligne est infinie, l'impédance d'entrée est égale à l'impédance caractéristique de la ligne.

- **Ligne sans pertes**

L'étude des caractéristiques de la ligne de transport peut être simplifiée en supposant que la ligne est sans pertes : $R=G=0$

$$\bar{Z}_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$\bar{\gamma} = j\omega\sqrt{LC}$$

Ou d'une autre manière :

$$\bar{\gamma} \cdot d = j \frac{2\pi \cdot d}{\lambda_0}$$

Avec :

La vitesse de propagation est:

$$V_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$

Et la longueur d'onde :

$$\lambda_0 = V_0 T = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C} \cdot f}$$

Ligne sans pertes à vide:

$$\bar{I}_r = 0$$

$$\bar{V}(s) = \bar{V}_0 = \cos \frac{2\pi \cdot d}{\lambda_0} \bar{V}_r$$

$$\bar{I}(s) = \bar{I}_0 = j \frac{1}{\bar{Z}_c} \sin \frac{2\pi \cdot d}{\lambda_0} \bar{V}_r$$

Pour $d = \frac{\lambda_0}{4}$ $\bar{Z}_{in} = 0$

Le générateur voit donc un court-circuit.

Le facteur de surtension est infini:

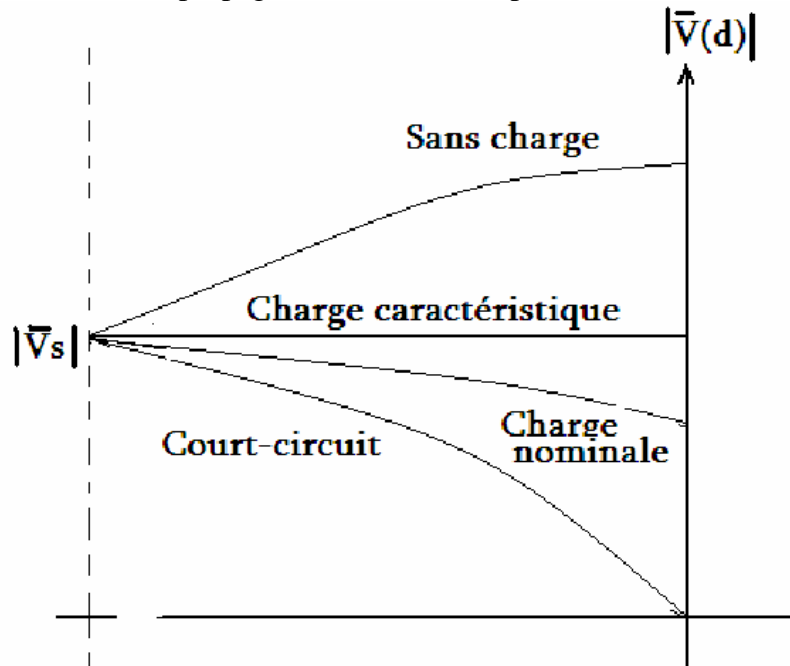
$$k = \frac{\bar{V}_r - \bar{V}_o}{\bar{V}_o}$$

Ce phénomène a reçu le nom de l'effet de Ferranti.

Ligne en court-circuit: $\bar{V}_r = 0$ et $\bar{V}_s = \bar{V}_{cc}$

$$\bar{V}_s = \bar{V}_{cc} = j \bar{Z}_c \sin \frac{2\pi \cdot d}{\lambda_0} \bar{I}_r = j \bar{Z}_c \sin(\bar{\gamma} \cdot d) \cdot \bar{I}_r$$

Au cours de la propagation : I_{cc} reste en phase avec I_r et V_{cc} est déphasée en avant de I_r



Profils de tension sur une ligne sans pertes (plus courte que $\lambda/4$)

V.3. La charge caractéristique (SIL=Surge Impedance Loading)

La puissance complexe à un point X sur la ligne:

$$\begin{aligned} \bar{S}(x) &= P(x) + jQ(x) = \bar{v}(x) \cdot \bar{I}^*(x) \\ &= V_r \cdot e^{(\bar{\gamma} \cdot d)} \cdot \frac{V_r}{\bar{Z}_c} \cdot e^{-j(\bar{\gamma} \cdot d)} = | \frac{V_r}{\bar{Z}_c} |^2 \end{aligned}$$

La puissance active est constante d'un bout à l'autre de la ligne tandis que la puissance réactive est nulle.

La charge caractéristique à tension nominale est:

$$SIL = \left| \frac{V_{\text{nom}}}{\bar{Z}_c} \right|^2$$

Pour: une ligne triphasée :

$$SIL = \left| \frac{U_{\text{nom}}}{\bar{Z}_c} \right|^2$$