

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université 8 Mai 1945 – Guelma  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Électrotechnique et Automatique

Réf:...../2020



## MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER Académique**

**Domaine** : Sciences et Technologies

**Filière** : Électrotechnique

**Spécialité** : Réseaux Électriques

**Par** : - DJOUAD Mohammed  
- BOUAOUNE Hani

**Thème**

**Analyse des Courts-Circuits dans les Réseaux Électriques.**

Soutenu publiquement, le 03/10/2020, devant le jury composé de:

M/ LEMZADMI Ahcene	Professeur	Univ. Guelma	Président
M/ BOUDEFEL Amar	MCA	Univ. Guelma	Encadreur
M/ BELOUCIF Faissel	MCB	Univ. Guelma	Examinateur

**Année Universitaire : 2019/2020**

# Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Mr : BOUDFEL AMAR, son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

## Dédicace

*Je dédie ce travail avant tout*

*A mes chers parent,*

*A tout ma famille,*

*A tous mes amis,*

*A tous les enseignants,*

*A tous ceux qui veulent savoir*

*Hani*

# Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A ma Mère et mon Père

A mon frère « Toufik » et mes sœurs.

A Toute ma famille

A mes chers amis

A tous les amis d'études

Surtout ceux d'électrotechnique

**Mohammed**

« ZAKI »

## Résumé

L'analyse des courts-circuits est la partie principale dans l'étude des réseaux électriques en générale, les courts-circuits sont divisés en deux parties : symétriques qui regroupent les courts-circuits triphasés et asymétriques qui regroupent tous les autres types de court-circuit.

Le calcul des courants de court-circuit symétriques est simple à partir du schéma équivalent directe d'une seule phase du réseau, pour les courts-circuits asymétriques, on fait recours aux composantes symétriques (directe, inverse et homopolaire) pour déterminer les courants de courts-circuits correspondants.

Le choix de la méthode de calcul dépend de la taille du réseau, ainsi pour les réseaux de faible taille, on utilise la méthode de transformation et simplification du schéma et pour les réseaux de grande taille, l'utilisation des programmes de calcul numériques est indispensable.

La connaissance de la valeur des courants de courts-circuits pour le personnel exploitant des réseaux électriques est primordiale, afin de pouvoir choisir les moyens de protections nécessaires (disjoncteurs, relais, ... etc.).

**Mots clefs :** courts-circuits symétriques, courts-circuits asymétriques, méthodes de calcul.

# Sommaire

Introduction générale	01
<b>CHAPITRE 1 – Les courants de court-circuit</b>	
I.1. Introduction	02
I.2. Nature des courants de court-circuit	02
I.3. Court-circuit aux bornes d'un générateur synchrone à pôles saillants	05
I.4. Schémas de représentation d'une machine synchrone durant le régime transitoire	07
I.4.1. A vide	07
I.4.2. En charge	10
<b>CHAPITRE II – Analyse des courts-circuits symétriques</b>	
II.1. Introduction	12
II.2. Etapes de calculs d'un court-circuit symétrique	13
II.3. Théorème de Thévenin	14
II.4. Puissance de court-circuit (Sc <sub>c</sub> )	15
II.5. Exemple de calcul d'un court-circuit symétrique	16
<b>CHAPITRE III – Analyse des courts-circuits asymétriques</b>	
III.1. Introduction	19
III.2. Méthode des composantes symétriques	19
III.2.1. Composantes symétriques	19
III.2. 2. Relations entre les vecteurs de phases et leurs composantes symétriques	20
III.2.3. Composantes symétriques des impédances et des réseaux	21
A. Composantes symétriques des impédances	21
B. Composantes symétriques des réseaux	22
C. Représentation des composantes symétriques du réseau	23
D. Expressions des impédances des systèmes directe, inverse et homopolaire	24
1). Pour les lignes et câbles	24
2). Pour les machines synchrones	24
3). Pour les transformateurs	25
4). Pour les charges	26
E. Composantes symétriques des circuits triphasés	26
III.3. Calcul des courts-circuits asymétriques dans un réseau électrique	28
III.3.1. Court-circuit monophasé	29
III.3.2. Court-circuit biphasé non à la terre	30
III.3.3. Court-circuit biphasé à la terre	33
III.3.4. Court-circuit biphasé non à la terre + court-circuit monophasé	34
III.3.5. Court-circuit triphasé	36
A. Court-circuit triphasé à la terre	36
B. Court-circuit triphasé non à la terre	37
III.4. Résumé des formules des composantes symétriques	38
III.5. Conclusion	40
<b>CHAPITRE IV – Méthodes de calcul des courants de court-circuit</b>	
IV.1. Introduction	41
IV.2. Méthode de transformation et simplification du schéma du réseau	42
IV.2.1 Combinaison des branches série	42
IV.2.2. Combinaison des branches parallèles	42
IV.2.3. Transformation étoile triangle (Y- $\Delta$ )	43
IV.2.4. Transformation triangle étoile ( $\Delta$ -Y)	44
IV.2.5. Combinaisons des tensions égaux	44
IV.3. Méthode des tensions noeudales	45
<b>CHAPITRE V – Applications sur un réseau électrique</b>	
V.1. Données du réseau à calculer	50

V.2. Calcul du réseau avec la méthode de transformation et simplification du schéma	<b>51</b>
V.2.1. Détermination des courants de court-circuit	<b>53</b>
A. Pour un court-circuit triphasé	<b>53</b>
B. Pour un court-circuit monophasé	<b>53</b>
C. Pour un court-circuit biphasé non à la terre	<b>54</b>
D. Pour un court-circuit biphasé à la terre	<b>54</b>
V.3. Calcul du réseau avec la méthode des tensions noeudales	<b>55</b>
V.3.1. Analyse du court-circuit triphasé symétrique	<b>56</b>
V.3.2. Analyse des courts-circuits asymétriques	<b>57</b>
A. Court-circuit monophasé	<b>57</b>
B. Court-circuit biphasé non à la terre	<b>58</b>
C. Court-circuit biphasé à la terre	<b>59</b>
V.4. Interprétations des résultats	<b>60</b>
Conclusion générale	<b>62</b>
Bibliographie	<b>63</b>

# *Liste des figures*

## **Chapitre I : les courants de court-circuites**

**Figure I.1:** Régime transitoire aux bornes d'une impédance  $Z$

**Figure I.2:** Court-circuit à la fin d'une impédance

**Figure I.3 :** Décroissement exponentielle de la composante aperiodique

**Figure I.4:** Représentation des différents enroulements et les axes  $d$ ,  $q$  et l'axe de référence dans une machine à pôles saillants.

**Figure I.5 :** Diagramme vectoriel d'une machine synchrone à pôles saillants.

**Figure I.6 :** Court-circuit triphasé aux bornes d'une machine synchrone et les réactances correspondantes

**Figure I.7 :** Circuit équivalent durant le régime subtransitoire.

**Figure I.8 :** Circuit équivalent durant le régime transitoire.

**Figure I.9 :** Circuit équivalent durant le régime stationnaire

**Figure I.10 :** Modèles de la machine synchrone en charge dans le cas d'un court-circuit au point F.

**Figure I.11 :** Diagramme vectoriel pour une machine synchrone en charge.

## **Chapitre II : Analyse des court-circuites symétriques**

**Figure II.1:** Illustration du théorème de Thévenin

**Figure II.2:** Réseau à trois jeux de barres

**Figure II.3** (a) schéma équivalent du réseau durant le défaut, (b) circuit équivalent de Thévenin.

**Figure II.4 :** Réduction du schéma équivalent de Thévenin

## **Chapitre III : Analyse des court-circuites asymétriques**

**Figure III.1:** Diagramme de phase des composantes symétriques.

**Figure III.2 :** Blocs des composantes symétriques d'un réseau.

**Figure III.3 :** Composantes symétriques d'un réseau lors d'un court-circuit.

**Figure III.4 :** Composante homopolaire d'un réseau mis à la terre à travers une impédance

**Figure III.5 :** Composantes symétriques du réseau vu du point de défaut

**Figure III.7 :** Court-circuit biphasé (b-c) non à la terre.

**Figure III.8 :** Court-circuit biphasé a la terre (b-c-T).

**Figure III.9 :** Court-circuit biphasé (b-c) plus court-circuit monophasé (a-T)

**Figure III.10 :** Court-circuit triphasé non à la terre

## **Chapitre IV : Méthodes de calcul des courants de court-circuit**

**Figure IV.1:** Combinaison des branches série

**Figure IV.2:** Combinaisons des branches parallèles

**Figure IV.3:** Transformation Y- $\Delta$

**Figure IV.4:** Combinaisons des tensions égales

**Figure IV.5:** Réseau électrique type.

**Figure IV.6:** Circuit d Thévenin du réseau en défaut au JB « k ».

## **Chapitre V : application sur des réseaux électriques**

**Figure V.1. :** Réseau à calculer

**Figure V.2. :** Schéma équivalent de la composante directe

**Figure V.3 :** Schéma équivalent de la composante directe(a) et inverse(b)

**Figure V.4. :** Détermination de la composante homopolaire.

**Figure V.5. :** Schéma équivalent de la composante homopolaire.

# *Liste des tableaux*

**Tableau (III.1) :** Les ordres de grandeurs de la réactance directe

**Tableau (III.2) :** les composantes symétriques des circuits

**Tableau (III.3) :** Présentent les formules des courants pour les composantes Symétriques

**Tableau (III.4) :** présentent les formules des courants de phase

**Tableau (III.5) :** Présentent les formules des tensions des composantes symétriques

**Tableau (III.6) :** Présentent les formules des tensions de phase

**Tableau V.1. :** Données du réseau à calculer

**Tableau V.2. :** Analyse du court-circuit triphasé symétrique

**Tableau V.3. :** Analyse du court-circuit asymétrique monophasé

**Tableau V.4. :** Analyse du court-circuit asymétrique biphasé non à la terre

**Tableau V.5. :** Analyse du court-circuit asymétrique biphasé à la terre

**Tableau V.6. :** Résumé des résultats de calcul des courts-circuits symétrique et asymétrique.

### **Introduction générale :**

L'étude des courants de court-circuit est la partie principale dans l'analyse des réseaux électriques, le problème consiste à déterminer les tensions des jeux de barres (JB) et les courants de ligne durant les différents types de court-circuit.

Les courts-circuits dans les réseaux électriques sont divisés en deux grandes parties : symétriques et asymétriques. Les courts-circuits symétriques sont les courts-circuits triphasés, les courts-circuits asymétriques regroupent tous les autres types de court-circuit (monophasé, biphasé non à la terre, biphasé à la terre, ...).

Le but principal du calcul des courants de court-circuit est le choix judicieux des moyens de protections (disjoncteurs, relais, ... etc.).

L'amplitude du courant de court-circuit dépend de l'impédance interne des générateurs et de l'impédance des autres éléments du circuit.

Les défauts triphasés donnent lieu en général aux valeurs les plus élevées des courants de court-circuit ; aussi leur importance permet-elle de définir le pouvoir de coupure des disjoncteurs ; elle est pratiquement indépendante du régime du neutre du réseau.

### **Plan de travail :**

Le travail réalisé est divisé en cinq chapitres :

Dans le premier chapitre on a présenté des notions générales sur les courts-circuits ;

Dans le deuxième chapitre on a présenté l'analyse des courts-circuits symétriques ;

Au troisième chapitre, on a présenté l'analyse des courts-circuits asymétriques ;

Dans le quatrième chapitre, on a présenté les méthodes de calcul des courants de court-circuit ;

Pour le dernier chapitre, on a fait une application sur un réseau haute tension complexe.

# *Chapitre I*

## *Les courants de court-circuit*

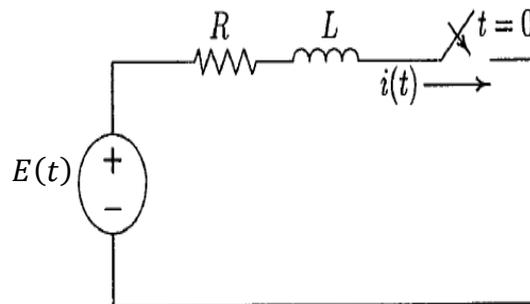
## I.1.Introduction :

Un courant de court-circuit se produit généralement lors de la fermeture d'un circuit électrique quelconque sur une impédance nulle ou de faible valeur, c'est le cas d'une mise à la terre accidentelle d'une ou plusieurs phases d'un réseau ou d'un matériel électrique, c'est le cas également d'une connexion accidentelle entre phases ayant une impédance négligeable pour la limitation du courant de court-circuit.

## I.2. Nature des courants de court-circuit :

L'analyse transitoire du court-circuit d'une impédance passive connectée à une source de tension alternatif  $E(t)$  donne un premier aperçu sur la nature des courants de court-circuit.

Considérons une source d'énergie sinusoïdale monophasée de fréquence 50 Hz,  $E(t) = E_m \cdot \sin(\omega t + \theta)$ , connectée à une ligne de distribution courte monophasée, d'impédance  $Z = R + j\omega L$ .



**Figure I.1 :** Régime transitoire aux bornes d'une impédance  $Z$

Laissez un court-circuit se produire à l'extrémité des bornes de la ligne. Ce courant n'est limité que par  $Z$ , et sa valeur en régime permanent est donnée vectoriellement par  $E_m / Z$ .

Les courants transitoires et stationnaires sont donnés par l'équation différentielle du circuit R – L avec une tension sinusoïdale appliquée :

$$L \frac{di}{dt} + Ri = E_m \cdot \sin(\omega t + \theta) \quad (\text{I.1})$$

Avec  $\theta$  est l'angle de la tension de source auquel le défaut se produit. La solution de cette équation différentielle est donnée par :

$$i(t) = I_m \cdot \sin(\omega t + \theta - \varphi) - I_m \cdot \sin(\theta - \varphi) \cdot e^{-Rt/L} \quad (\text{I.2})$$

Où  $I_m$  est la valeur maximale du courant stationnaire donnée par :

$$I_m = \frac{E_m}{Z} \quad (\text{I.3})$$

Avec

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (\text{I.4})$$

Et l'angle

$$\varphi = \frac{\tan^{-1}(\omega L)}{R}. \quad (\text{I.5})$$

Donc on peut voir que l'expression du courant  $i(t)$  a deux composantes :

- Périodique où la composante sinusoïdale de l'état stationnaire ;
- Apériodique où la composante continue qui décroît exponentiellement.

Pour les réseaux de transport on a  $\omega L \gg R$ , ce qui donne :

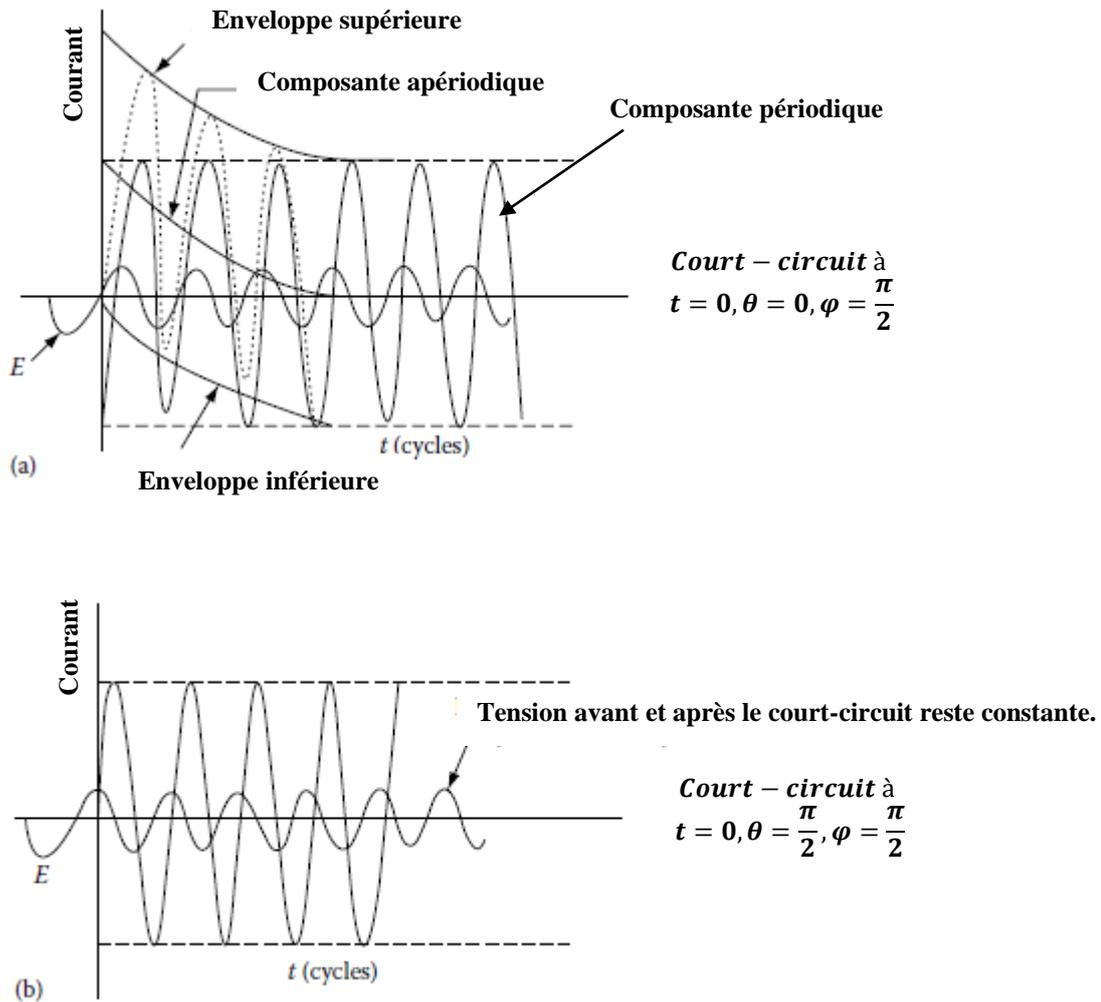
$$\varphi \approx 90^\circ$$

- Si le court-circuit se produit à  $t = 0$ , les deux composantes de l'équation (I.2) sont égales et opposées.
- Si le court-circuit se produit quand l'onde de tension passe par la valeur maximale à  $t = 0$  et  $\theta = \frac{\pi}{2}$ , le second membre (composante apériodique) de l'équation (I.2) est nul et donc il n'y a pas de la composante transitoire.
- Ces deux situations sont représentées par les figures (I.2. a et b), la tension au point de court-circuit front égale zéro, dans les figures a et b la tension avant et après élimination du court-circuit reste constante.
- Pour  $\theta = 0$  et  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ , l'équation (I.2) devient :

$$i(t) = -I_m \cdot \cos(\omega t) + I_m \cdot e^{-Rt/L} \quad (\text{I.6})$$

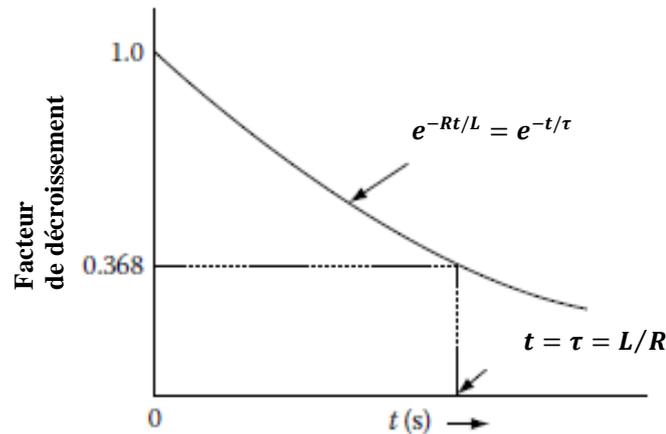
De ces discussions on peut tirer les conclusions suivantes :

- Il y a deux différents types de courant de court-circuit : (1) une composante périodique, appelé aussi composante de l'état stationnaire et (2) une composante apériodique qui décroît exponentiellement.



**Figure I.2 :** Court-circuit à la fin d'une impédance, (a) forme d'onde du courant en présence de la composante aperiodique, (b) forme d'onde du courant en absence de la composante aperiodique. [1]

- La composante aperiodique décroît exponentiellement selon l'expression  $I_m \cdot e^{-Rt/L}$ , le facteur  $\frac{L}{R} = \tau$  est appelé la constante de temps. Pour  $t = \tau$ , cela entraînera une diminution d'environ 63,2% par rapport à sa valeur initiale, c'est-à-dire que le courant transitoire est réduit à une valeur de 0,368 p.u après un temps écoulé égal à la constante de temps  $\tau$ , comme le montre la figure I.3.



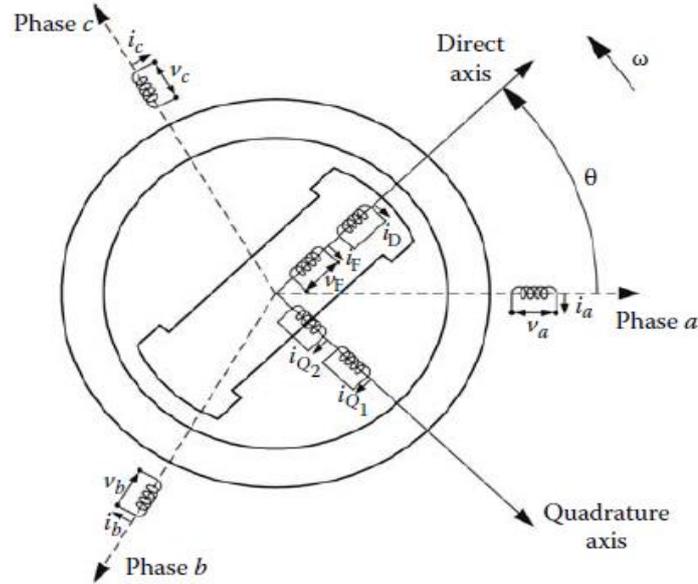
**Figure I.3 :** Décroissement exponentielle de la composante apériodique [1].

- La présence d'une composante apériodique rend l'enveloppe de forme d'onde du courant de court-circuit asymétrique par rapport à l'axe horizontale. La figure I.2.(a) montre clairement le profil d'une forme d'onde asymétrique. La composante apériodique décroît toujours à zéro dans un temps très court.
- Plus le rapport  $X / R$  est élevé, plus la décroissance est lente et plus la durée pendant laquelle l'asymétrie dans le courant total sera maintenue est longue.

### **I.3. Court-circuit aux bornes d'un générateur synchrone à pôles saillants :**

Dans une machine à pôles saillants l'entrefer stator-rotor n'est pas uniforme, La réluctance magnétique de l'entrefer le long de l'axe longitudinale appelé axe direct « d » est considérablement inférieure à celle suivant l'axe en quadrature « q ».

Dans une machine à pôles saillants, on trouve les enroulements suivants :



**Figure I.4 :** Représentation des différents enroulements et les axes d, q et l'axe de référence dans une machine à pôles saillants. [2]

Enroulements statorique (des phases a, b et c)

Enroulements rotorique  $\left\{ \begin{array}{l} \text{d'excitation } (i_F) \\ \text{d'amortissement } (i_D, i_{Q1} \text{ et } i_{Q2}) \end{array} \right.$

En tenant compte de la réaction d'induit, il existe deux types de réactances  $X_{ad}$  suivant l'axe d et  $X_{aq}$  suivant l'axe q, tel que  $X_{ad} > X_{aq}$ .

La réactance du générateur suivant les axes d et q sera :  $X_d = X_\delta + X_{ad}$  et  $X_q = X_\delta + X_{aq}$

Avec  $X_\delta$  : est la réactance de fuite.

La fém du générateur E (Eq suivant l'axe q) sera :

$$E = V + jI_d X_d + jI_q X_q$$

Avec V est la tension simple à la sortie du générateur.

Le diagramme vectoriel est représenté par la figure II.5

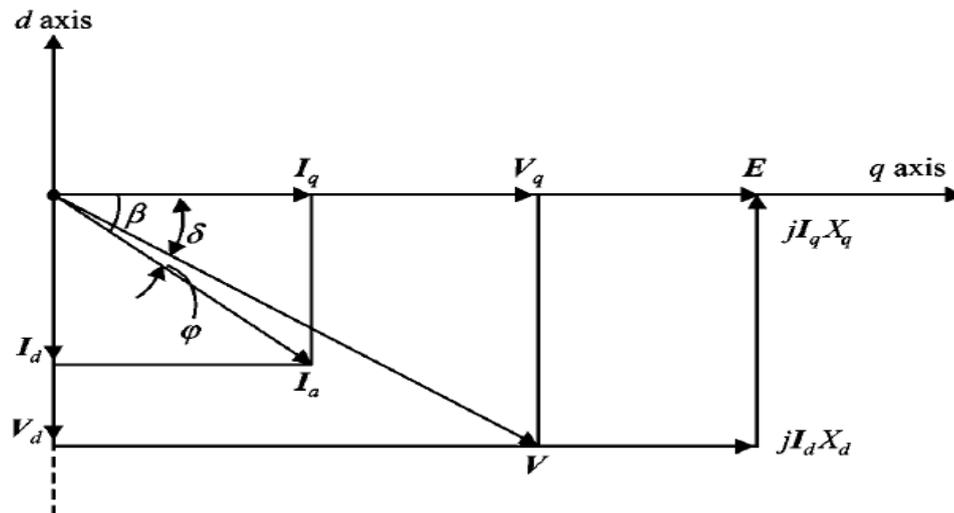


Figure I.5 : Diagramme vectoriel d'une machine synchrone à pôles saillants. [4]

## I.4. Schémas de représentation d'une machine synchrone durant le régime transitoire :

### I.4.1. A vide :

Si un court-circuit triphasé se produit aux bornes d'un générateur synchrone, le phénomène transitoire est presque similaire à celui du paragraphe I.2, seulement pour le du générateur l'impédance  $Z$  est variable avec le temps.

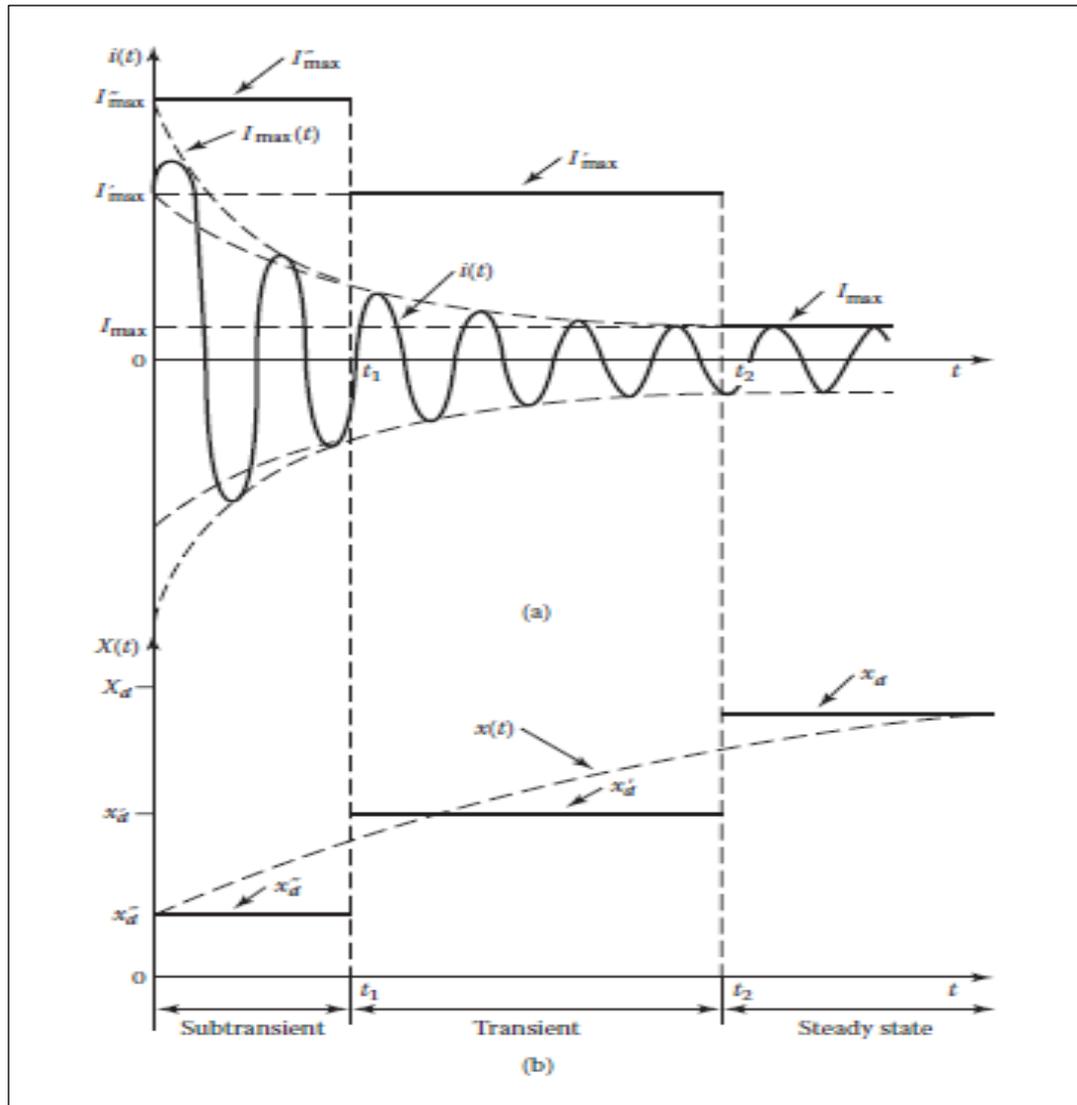
Pour les générateurs de grande puissance, on adopte, en général, que  $x_g \gg r_g$ , donc :

$$Z_g = r_g + jx_g \approx +jx_g$$

Au moment de l'apparition du court-circuit le flux (la réactance du générateur  $x_g$ ) varie rapidement avec le temps.

Ainsi, il est habituel de représenter un générateur synchrone par une f.é.m. en série avec une réactance variable avec le temps.

Pour les calculs de courant de défaut, les réactances variables d'une machine synchrone peuvent être représentées, comme le montre la figure I.6.b, par les trois valeurs de réactance suivantes :



**Figure I.6 :** Court-circuit triphasé aux bornes d’une machine synchrone et les réactances correspondantes. (a) composante périodique du courant de court-circuit et (b) variation de la réactance du générateur en fonction du temps.

$X_d''$  : réactance subtransitoire détermine le courant de défaut pendant le premier cycle après l’apparition du défaut. En environ 0,05–0,1s, et ce détermine comme suit

$$X_d'' = X_\delta + \frac{1}{1/X_{ad} + 1/X_{\delta,ex} + 1/X_{\delta,am}}$$

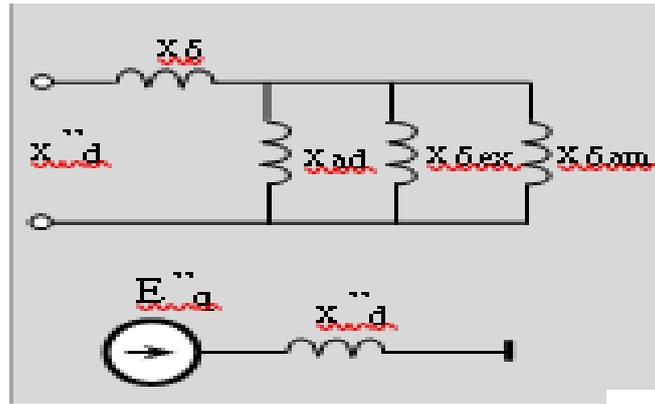


Figure I.7 : Circuit équivalent durant le régime subtransitoire. [5]

Avec :

$X_\delta$  est la réactance de fuite ;

$X_{ad}$  est la réactance due à la réaction d'induit suivant l'axe d ;

$X_{\delta,ex}$  est la réactance de fuite du circuit d'excitation ;

$X_{\delta,am}$  est la réactance de fuite du circuit d'amortissement ;

Si on tient compte de la résistance du circuit d'amortissement  $R_{am}$ , alors on peut déterminer la constante de temps pour le régime subtransitoire  $T_d''$  par

$$T_d'' = \frac{X_{am} \left( \frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{\delta,ex}} + \frac{1}{X_\delta} \right)^{-1}}{R_{am}}$$

La réactance subtransitoire  $X_d''$ ; n'est utilisé dans les calculs que si l'effet du courant initial est important, par exemple, lors de la détermination des paramètres du système de protection (disjoncteurs). Cette réactance augmente jusqu'à  $X_d'$

La réactance transitoire  $X_d'$  qui correspond au régime transitoire se détermine comme suit :

$$X_d' = X_\delta + \frac{1}{1/X_{ad} + 1/X_{\delta,ex}}$$

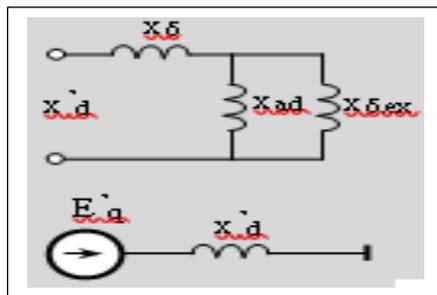


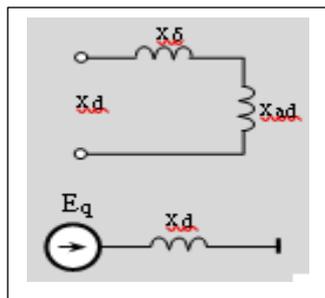
Figure I.8 : Circuit équivalent durant le régime transitoire. [5]

Si on tient compte de la résistance du circuit d'excitation  $R_{ex}$ , alors on peut déterminer le temps de la constante du temps pour le régime transitoire  $T'_d$  par

$$T'_d = \frac{X_{\delta,ex} \left( \frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{\delta}} \right)^{-1}}{R_{ex}}$$

La valeur de la réactance transitoire  $X'_d$  est comprise entre 0,10 et 0,25 pu. La constante de temps  $T'_d$  est généralement de l'ordre de 1 à 2 secondes.

Pour le régime stationnaire, la machine est représentée par la figure suivante :



**Figure I.9 :** Circuit équivalent durant le régime stationnaire. [5]

Avec

$$X_d = X_{\delta} + X_{ad}$$

Il est intéressant d'observer sur la figure I.6.a que la composante alternative totale du courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) se compose de la valeur en régime permanent ( $I$ ) et des deux composantes qui décroissent avec les constantes de temps  $T'_d$  et  $T''_d$ .

Il peut être exprimé comme suit :

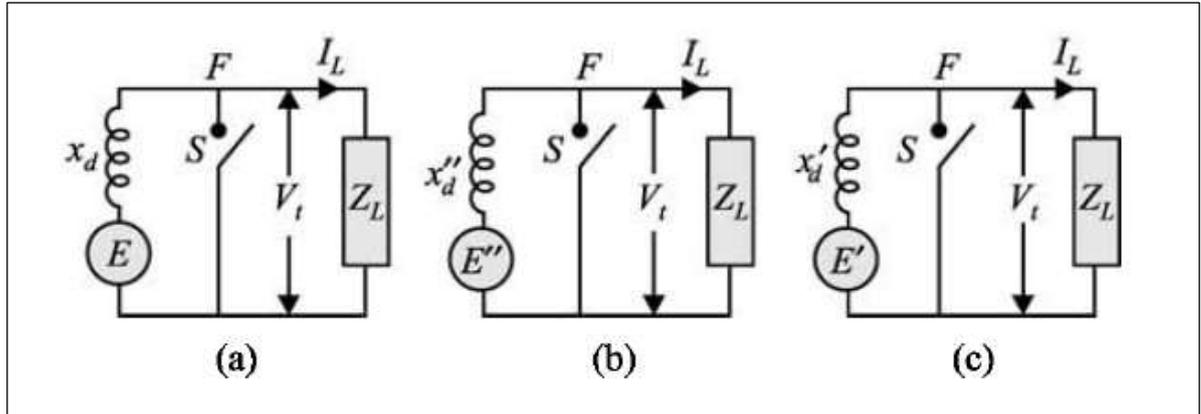
$$I_{cc} = (I'' - I) \exp\left(-\frac{t}{T''_d}\right) + (I' - I) \exp\left(-\frac{t}{T'_d}\right) + I$$

#### I.4.2. En charge

En fonctionnement à vide la f.é.m. de la machine  $E$  reste constante, par contre en charge, on doit tenir compte du courant de la charge ( $I_L$ ) juste avant le court-circuit. Les trois modèles de la machine qui correspondent aux trois régimes (subtransitoire, transitoire et stationnaire) sont représentés par la figure ci-dessous

Avec pour le régime stationnaire

$$E = V_t + jI_L X_d$$



**Figure I.10 :** Modèles de la machine synchrone en charge dans le cas d'un court-circuit au point F. (a) pour le régime stationnaire, (b) pour le régime subtransitoire et (c) pour le régime transitoire.

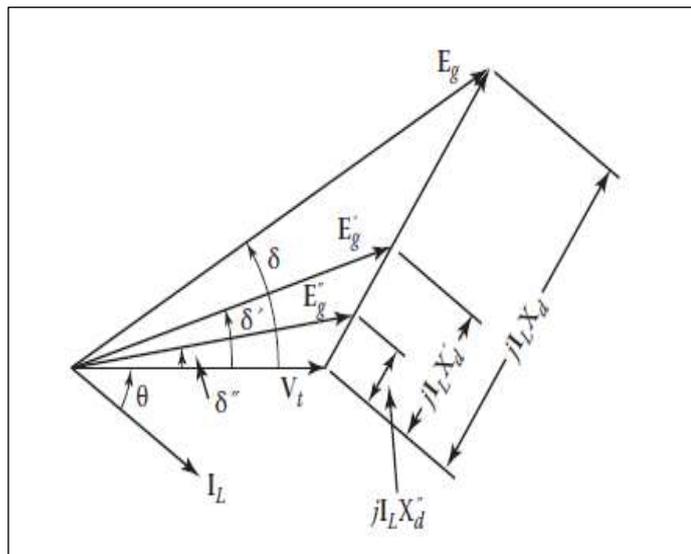
Pour le régime subtransitoire

$$E'' = V_t + jI_L X_d''$$

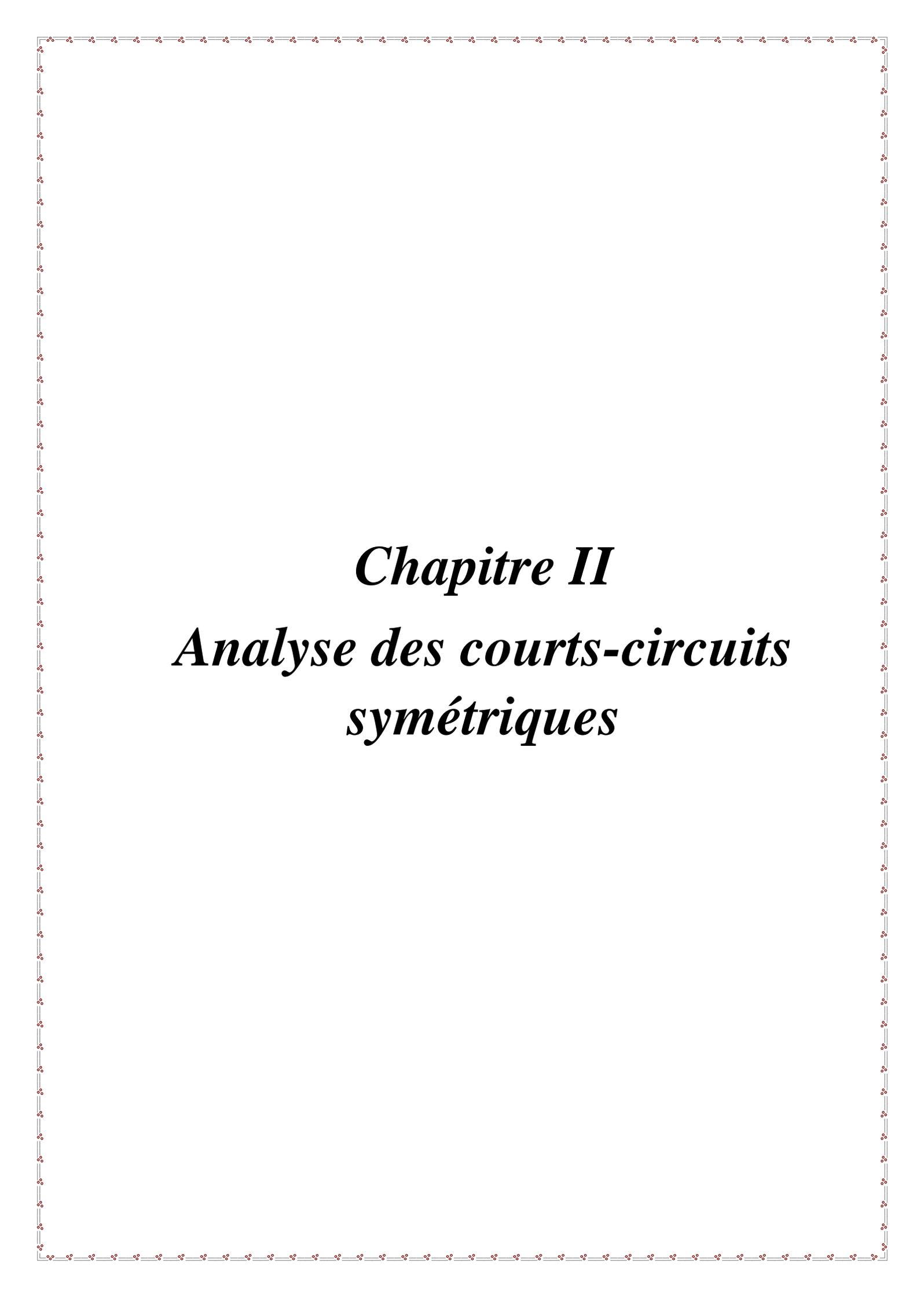
Pour le régime transitoire

$$E' = V_t + jI_L X_d'$$

Le diagramme vectoriel sera :



**Figure I.11 :** Diagramme vectoriel pour une machine synchrone en charge.



*Chapitre II*  
*Analyse des courts-circuits*  
*symétriques*

## II.1. Introduction

Le défaut symétrique est défini comme le court-circuit entre les trois phases en même temps. Ce type de défaut peut être (ou ne pas) à la terre. Bien que ce défaut est très rare en occurrence, mais c'est le type de défaut le plus grave, qui donne lieu au courant de défaut maximal.

Sous les conditions symétriques de défaut, le système triphasé se comporte comme un circuit équilibré et peut être analysé sur la base d'un circuit monophasé. Comme le réseau reste électriquement équilibré pendant le défaut, il est également appelé défaut équilibré.

Le niveau de la puissance de court-circuit à n'importe quel point du réseau est généralement considéré comme référence du défaut triphasé symétrique. Le défaut symétrique triphasé étant généralement le défaut le plus grave, le pouvoir de coupure nominal des disjoncteurs est déterminé à partir de cette valeur de puissance de court-circuit (qui doit être égal ou supérieur à cette valeur). Sachant que la valeur de la puissance des disjoncteurs est standard, par exemple 250, 500, 750, 1000 MVA, donc une haute précision n'est pas nécessaire lors du calcul de la puissance de court-circuit en un point d'un système électrique.

Le défaut triphasé symétrique (équilibré) sur une ligne provoque un effondrement de la tension du système accompagnée d'une réduction immédiate de la capacité de transport de puissance, qui peut s'annuler. En revanche, les défauts asymétriques (déséquilibrés) paralysent partiellement la ligne.

Pendant le court-circuit, le flux par pôle dans le générateur synchrone subit un changement dynamique avec aussi le changement transitoire du champ dans les enroulements rotorique et d'amortissement, la réactance du générateur synchrone dans les conditions de court-circuit varie avec le temps et pour l'analyse du réseau, trois réactances sont définies :

La réactance subtransitoire  $x_d''$ , pour les premiers cycles du courant de court-circuit, la réactance transitoire  $x_d'$ , pour les prochains cycles relativement plus longs, et la réactance synchrone  $x_d$ , par la suite. Comme la durée du courant de court-circuit dépend du temps de fonctionnement du système de protection, il n'est pas toujours facile de décider quelle réactance utiliser.

Généralement, la réactance subtransitoire ( $x_d''$ ) est utilisée pour déterminer la capacité d'interruption des disjoncteurs. Dans les études de défaut requises pour le réglage du relais et coordination, une réactance transitoire ( $x_d'$ ) est utilisée. Les valeurs de  $x_d''$ ,  $x_d'$  et  $x_d$  sont telles que  $x_d'' < x_d' < x_d$ .

Un défaut à tout moment représente un changement dans la structure du réseau qui est l'équivalent à celui provoqué par l'ajout d'une impédance au niveau du point de défaut. Si l'impédance de défaut est nulle, le défaut est appelé court-circuit front. Le réseau en défaut peut être facilement résolu en utilisant le Théorème de Thévenin.

Afin de simplifier les calculs des courants de courts-circuits, on adopte les hypothèses suivantes :

- 1- Immédiatement avant l'apparition du défaut, le système fonctionne à vide à la fréquence nominale et la tension du nominale.
- 2- Les fem's de tous les générateurs sont en phase. Cela signifie que tous les générateurs sont en synchronisme avant l'apparition du défaut.
- 3- La résistance du système est négligée et seule la réactance inductive du système est prise en compte.
- 4- On néglige les admittances shunt des transformateurs.
- 5- On néglige les capacités de dérivation des lignes de transmission.

## II.2 Etapes de calculs d'un court-circuit symétrique :

L'analyse des court-circuits symétriques est simple car le circuit reste complètement équilibré et les calculs ne peuvent être effectués que pour une seule phase. Les étapes de calculs d'un court-circuit symétrique sont les suivantes :

- 1- On trace un schéma unifilaire du système (réseau).
- 2- On choisit les valeurs de base et on calcul les réactances (en p.u) de tous les composants du système par rapport aux valeurs de base choisit.
- 3- En appliquant le théorème de Thévenin à l'emplacement du défaut. On détermine la réactance équivalente (réactance de Thévenin) du système vu du point de défaut. Pour la tension de Thévenin  $V_{cc}$ , elle est prise égale à la tension avant-défaut  $1,0\angle 0^\circ$  pu, car le système est supposé à vide et donc la tension de tous les points du système est la tension nominale.
- 4- On détermine la valeur du courant de court-circuit (en p.u) par le rapport de la tension de Thévenin  $V_{cc,pu}$  à la réactance équivalente de Thévenin  $x_{\acute{e}q,pu}$ , c'est-à-dire  $\frac{V_{cc,pu}}{x_{\acute{e}q,pu}}$ . Le courant de défaut est purement réactif car la résistance est négligée.

Alors :

$$I_{cc,pu} = \frac{V_{cc,pu}}{x_{\acute{e}q,pu}} \quad (\text{II.1})$$

Si on a :

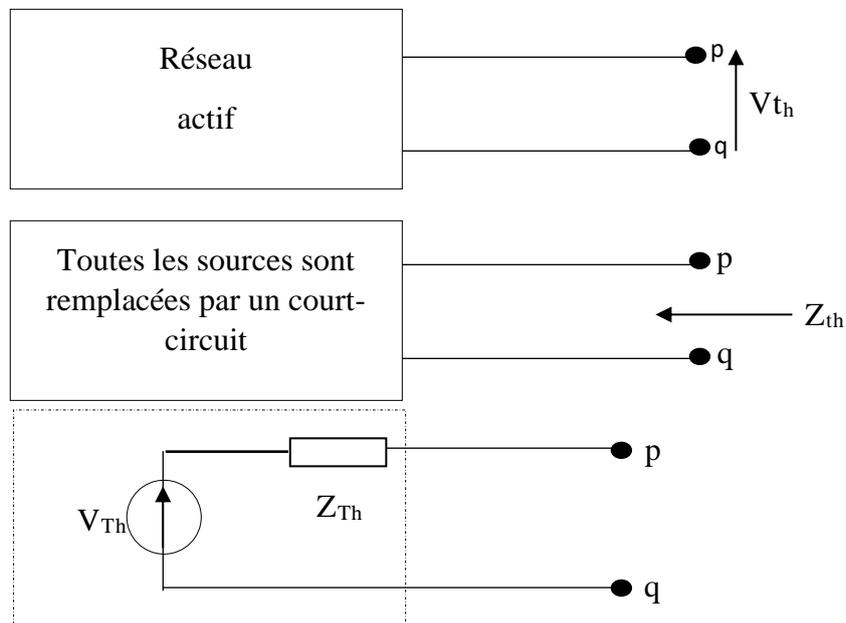
$$V_{cc,pu} = 1$$

Alors :

$$I_{cc,pu} = \frac{V_{cc,pu}}{x_{\acute{e}q,pu}} = \frac{1}{x_{\acute{e}q,pu}} \quad (\text{II.2})$$

### II.3 Théorème de Thévenin

Le théorème de Thévenin s'énonce ainsi : « tout réseau linéaire actif présentant des connexions de sortie p, q peut être remplacé par une source de tension unique  $V_{th}$  en série avec une impédance unique  $Z_{th}$  », comme le montre la figure (II.1).



**Figure II.1:** Illustration du théorème de Thévenin

La tension équivalente de Thévenin  $V_{th}$  correspond à la tension mesurée entre les bornes p et q du circuit non chargé.

L'impédance équivalente  $Z_{th}$  correspond à l'impédance d'entrée du réseau mesurée entre les bornes p et q, toutes les sources internes délivrant des tensions nulles.

## II.4 Puissance de court-circuit (Scc)

Le défaut symétrique triphasé est très rare en occurrence, mais c'est le type de défaut le plus sévère qui donne lieu au courant de défaut maximal. Lorsqu'un défaut (court-circuit) se produit à un point d'un réseau électrique, la puissance de court-circuit correspondante (en MVA) est appelée niveau de défaut ou puissance de court-circuit ( $S_{cc}$ ). Une puissance de court-circuit élevée en un point signifie une résistance élevée du système d'alimentation en ce point et une faible réactance équivalente jusqu'à ce point. Par conséquent, de grandes charges peuvent être connectées à ce point. Un niveau de défaut faible signifie un système faible. La puissance de court-circuit en tout point indique la force du système d'alimentation à ce point et est utilisé pour déterminer la dimension d'un jeu de barre et la capacité d'interruption d'un disjoncteur.

La puissance de court-circuit ( $S_{cc}$ ) est définie comme suit:

$$(S_{cc} \text{ en MVA}) = \sqrt{3} (\text{tension juste avant défaut en KV}) \times (\text{courant de court-circuit } I_{cc} \text{ en A}) \times 10^{-3}$$

Étant donné que le système est supposé fonctionner à vide immédiatement avant l'apparition du défaut, la tension du système pré-défaut à tous les points est la tension nominale du système.

Donc :

$$(S_{cc} \text{ en MVA}) = \sqrt{3} (U_{cc}) \times (I_{cc}) \times 10^{-3} = \sqrt{3} (U_N) \times (I_{cc}) \times 10^{-3} \quad (\text{II.3})$$

Sachant que :

$$(S_b \text{ en MVA}) = \sqrt{3} (U_b \text{ en KV}) \times (I_b \text{ en A}) \times 10^{-3} \quad (\text{II.4})$$

Ce qui donne ( $S_{cc}$  en pu) :

$$(S_{cc} \text{ en pu}) = (U_{cc} \text{ en pu}) \times (I_{cc} \text{ en pu}). \quad (\text{II.5})$$

Si  $U_b = U_N$ , alors :  $U_{cc} \text{ en pu} = 1$ , ce qui donne :

$$(S_{cc} \text{ en pu}) = (I_{cc} \text{ en pu}) = \frac{U_{cc} \text{ en pu}}{x_{\acute{e}q} \text{ en pu}} = \frac{1}{x_{\acute{e}q} \text{ en pu}} \quad (\text{II.6})$$

Où ( $x_{\acute{e}q}$  en pu) est la réactance équivalente de Thévenin en pu.

À la tension nominale du système, le circuit équivalent de Thévenin vu du point de défaut est une source de tension ( $E$ ) de  $1,0 \angle 0^\circ$  en pu en série avec une réactance équivalente  $x_{\acute{e}q}$  en pu.

Par conséquent, dans les conditions de défaut (court-circuit),

$$(x_{\acute{e}q} \text{ en pu}) = \frac{1}{(S_{cc} \text{ en pu})} \text{ pu} \quad (\text{II.7})$$

## II.5 Exemple de calcul d'un court-circuit symétrique

Soit le réseau électrique de trois jeux de barres de la figure II.2, tous les impédances sont exprimés en unités relatives (p.u) par rapport à  $S_b = 100$  MVA.

Pour simplifier les calculs, on néglige tous les résistances devant les réactances, aussi on néglige l'effet de la charge.

Un court-circuit triphasé à travers une impédance de défaut  $Z_f = j0.16$  au jeu de barre N° : 3, on veut déterminer le courant de court-circuit correspondant :

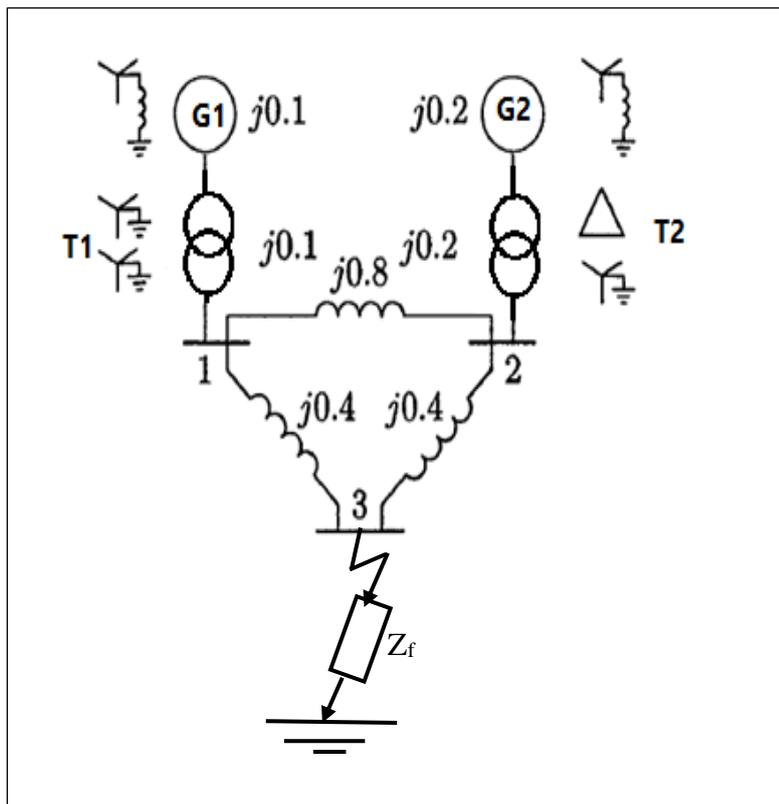


Figure II.2: Réseau à trois jeux de barres [3].

Le schéma équivalent du réseau durant le défaut, ainsi que le circuit équivalent de Thévenin sont représentés par la figure II.3.

Dans le circuit équivalent de Thévenin, la tension de Thévenin  $V_{th} = V_3(0)$ .

Avec  $V_3(0)$  est la tension au JB 3 juste avant le court-circuit.

Sachant que  $V_1(0) = V_2(0) = V_3(0) = 1$  p.u (tension nominale)

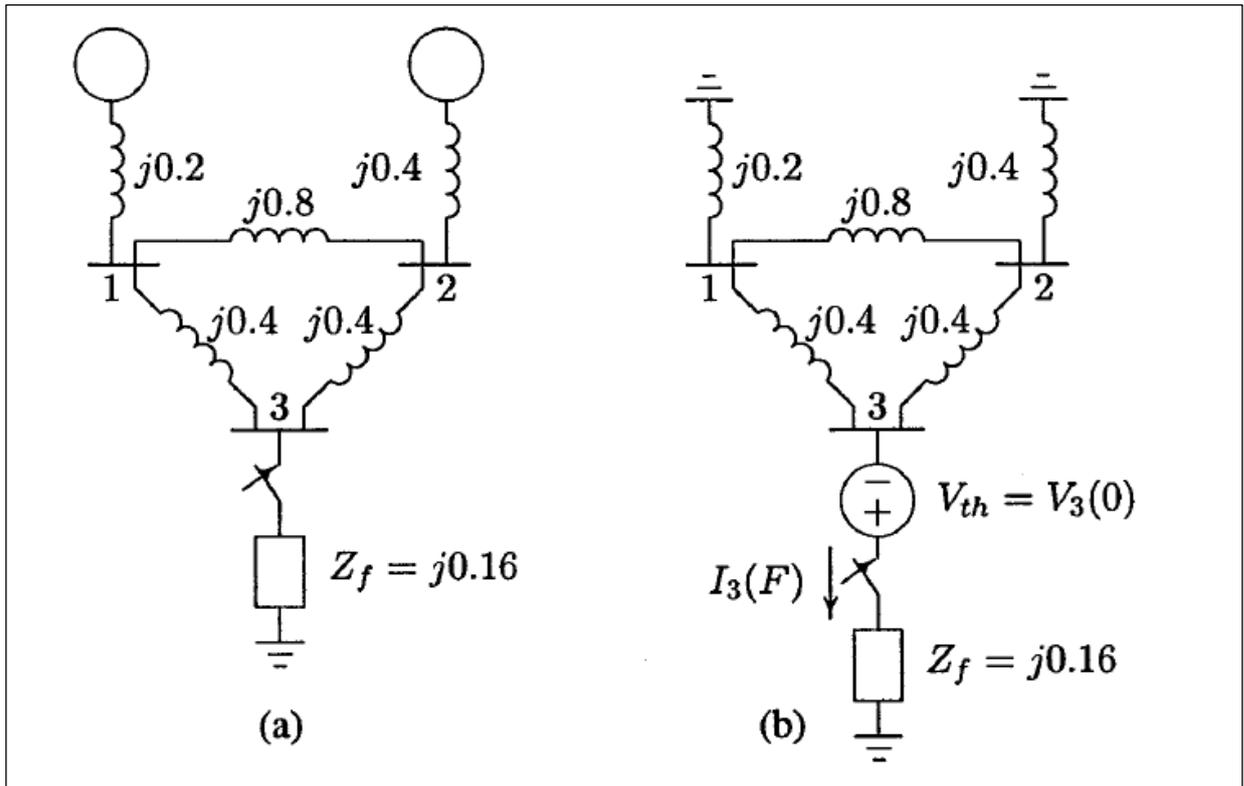


Figure II.3 (a) schéma équivalent du réseau durant le défaut, (b) circuit équivalent de Thévenin.

Dans le circuit équivalent de Thévenin, tous les sources sont court-circuitées.

Pour calculer le courant de court-circuit triphasé au JB 3 ( $I_3(F)$ ), on simplifier le schéma équivalent de Thévenin par transformation  $\Delta \rightarrow Y$  et réduction (figure II.4)

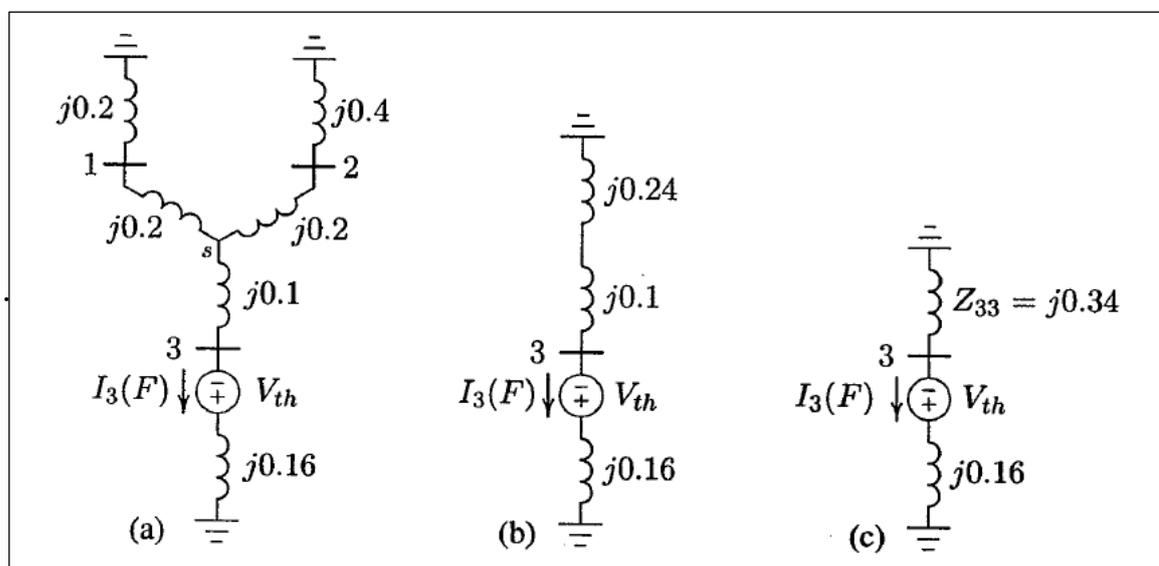


Figure II.4 : Réduction du schéma équivalent de Thévenin

Avec  $Z_{1s} = Z_{2s} = \frac{(j0.4)(j0.8)}{j1.6} = j0.2$  et  $Z_{3s} = \frac{(j0.4)(j0.4)}{j1.6} = j0.1$

On regroupe les impédances parallèles :

$$Z = \frac{(Z_{g1} + Z_{s1})(Z_{g2} + Z_{s2})}{(Z_{g1} + Z_{s1} + Z_{g2} + Z_{s2})} = \frac{(j0.2 + j0.2)(j0.4 + j0.2)}{(j0.2 + j0.2 + j0.4 + j0.2)} = j0.24$$

L'impédance de Thévenin sera

$$Z_{th} = Z_{33} = Z + Z_{3s} = j0.24 + j0.1 = j0.34$$

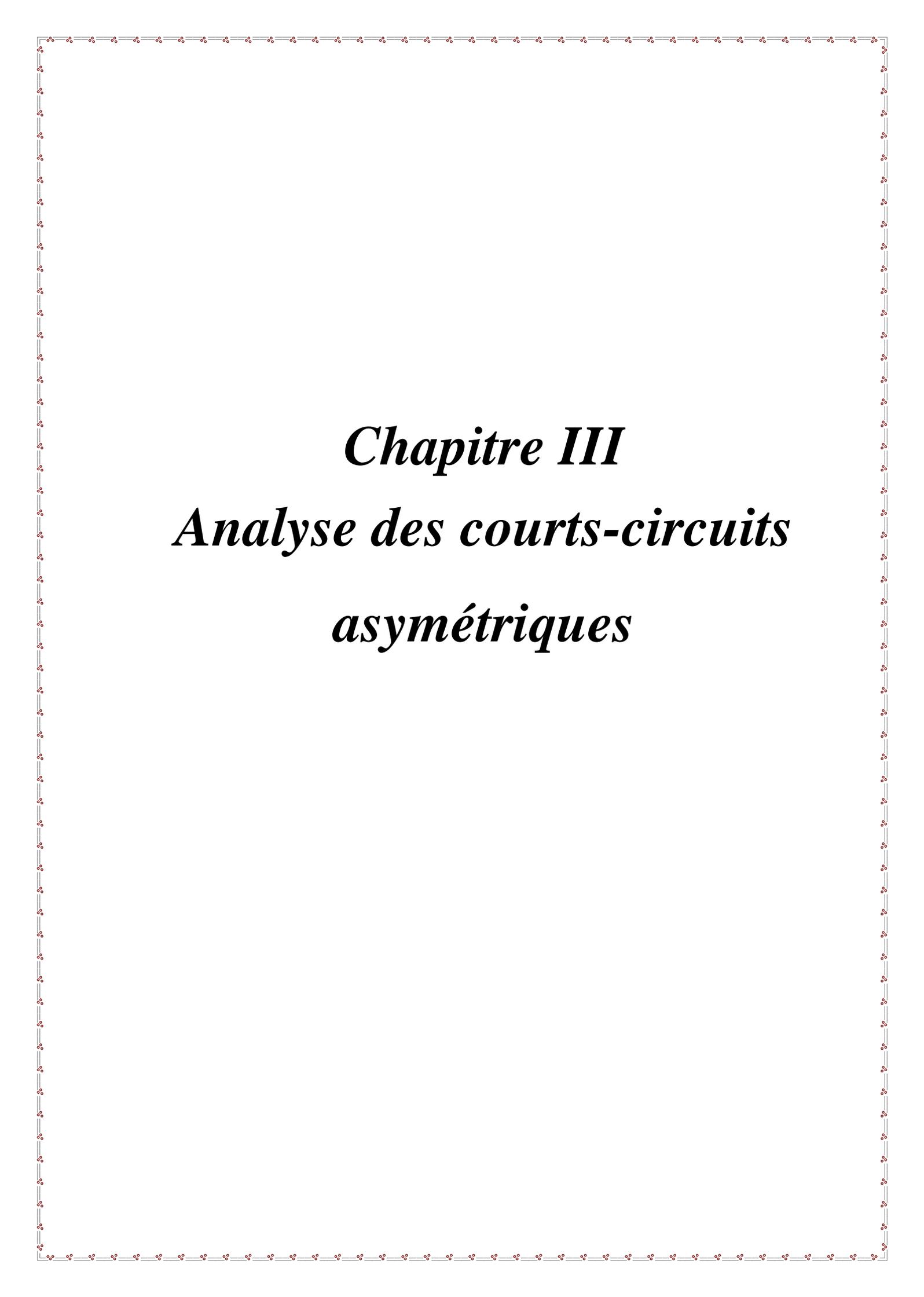
Le courant de court-circuit triphasé  $I_3(F)$  sera

$$I_3(F) = \frac{V_{th}}{Z_{th} + Z_f} = \frac{1}{j0.34 + j0.16} = -j2.0$$

### Remarque

Si le court-circuit est front (c-à-d  $Z_f = 0$ ), alors :

$$I_3(F) = \frac{V_{th}}{Z_{th}} = \frac{1}{j0.34} = -j2.94$$



*Chapitre III*  
*Analyse des courts-circuits*  
*asymétriques*

### III.1. Introduction

Le calcul des courants de court-circuit se divise en deux parties, le calcul des courants de court-circuit symétrique et le calcul des courants de court-circuits asymétrique, pour les premiers, il n'y a pas de problème, le courant de court-circuit est déterminé à partir du schéma équivalent de la composante directe du réseau.

Pour les deuxièmes (court-circuit asymétrique), il est difficile de calculer directement le courant de court-circuit parce que les paramètres (tension, courant) du réseau dans ces conditions sont asymétrique, la solution est d'utiliser les composantes symétriques c.-à-d. de décomposer notre système asymétrique en se basant sur le théorème de superposition qui dit : « que tout système asymétrique peut être remplacé par trois systèmes symétriques (direct, inverse et homopolaire) ».

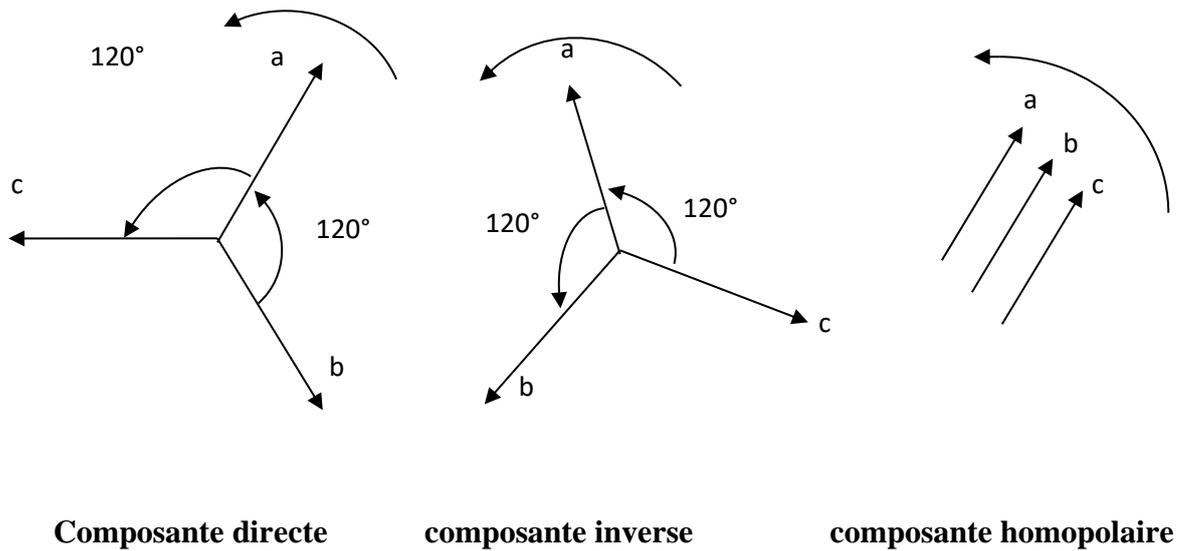
### III.2. Méthode des composantes symétriques

#### III.2.1. Composantes symétriques

Le calcul des courts-circuits asymétriques dans les réseaux triphasés, n'est possible que par l'utilisation des composantes symétriques qui sont définies comme : en n'importe quel système de vecteur triphasé asymétrique de tension ou de courant peut être remplacé par la somme de trois systèmes de vecteurs symétriques qui sont :

- La composante directe composée de trois vecteurs de même modules et décalés de  $120^\circ$  l'une par rapport à l'autre, l'ordre de phase est le même que celui des générateurs.
- La composante inverse composée de trois vecteurs de même module et l'ordre des phases est l'inverse que celui de la composante directe.
- La composante homopolaire composée de trois vecteurs de mêmes modules et phases.

Ces trois systèmes des vecteurs sont représentés par la figure (III.1), le sens de rotation de ces trois systèmes de vecteurs est le sens antihoraire ce qui donne pour la composante directe l'ordre de phase (a, b, c) et pour la composante inverse (a, c, b).



**Figure III.1:** Diagramme de phase des composantes symétriques.

### III.2.2. Relations entre les vecteurs de phases et leurs composantes symétriques

Soit  $I_a$ ,  $I_b$  et  $I_c$  trois vecteurs des phases asymétriques ou a, b et c sont les trois phases et on désigne par 1, 2 et 0 les composantes : directe, inverse et homopolaire respectivement.

Donc les vecteurs des trois systèmes symétriques seront :

- pour la composante directe :

$$I_{a1}, I_{b1} = a^2 I_{a1} \text{ et } I_{c1} = a I_{a1} \quad (\text{III.1})$$

- pour la composante inverse :

$$I_{a2}, I_{b2} = a I_{a2} \text{ et } I_{c2} = a^2 I_{a2} \quad (\text{III.2})$$

- pour la composante homopolaire :

$$I_{a0}, I_{b0} = I_{a0} \text{ et } I_{c0} = I_{a0} \quad (\text{III.3})$$

Avec a est un opérateur de phase  $a = \angle 120^\circ = e^{j120^\circ} = -0.5 + j\frac{\sqrt{3}}{2}$

Ce qui donne  $a^2 = \angle 240^\circ = e^{j240^\circ} = -0.5 - j\frac{\sqrt{3}}{2}$

Donc on peut écrire

$$\begin{pmatrix} I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \\ I_b = I_{b1} + I_{b2} + I_{b0} \\ I_c = I_{c1} + I_{c2} + I_{c0} \end{pmatrix} \quad (\text{III.4})$$

Ces équations peuvent être écrites par rapport à une phase de référence (Phase a) comme suit:

$$\begin{cases} I_a = I_1 + I_2 + I_0 \\ I_b = a^2 I_1 + a I_2 + I_0 \\ I_c = a I_1 + a^2 I_2 + I_0 \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

Ce qui donne :

$$\begin{cases} I_1 = 1/3(I_a + a I_b + a^2 I_c) \\ I_2 = 1/3(a I_a + a^2 I_b + I_c) \\ I_0 = 1/3(I_a + I_b + I_c) \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

De la même manière que les courants, On peut appliquer les mêmes formules sur les tensions et on aura par rapport à la phase de référence (a) :

$$\begin{cases} V_a = V_1 + V_2 + V_0 \\ V_b = a^2 V_1 + a V_2 + V_0 \\ V_c = a V_1 + a^2 V_2 + V_0 \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Ce qui donne pour les composantes symétriques :

$$\begin{cases} V_1 = 1/3(V_a + a V_b + a^2 V_c) \\ V_2 = 1/3(V_a + a^2 V_b + a V_c) \\ V_0 = 1/3(V_a + V_b + V_c) \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

### III.2.3. Composantes symétriques des impédances et des réseaux

#### A. Composantes symétriques des impédances

En générale on a trois composantes symétriques pour n'importe quel circuit triphasé asymétrique :

L'impédance de la composante directe  $Z_1$ , l'impédance de la composante inverse  $Z_2$  et l'impédance de la composante homopolaire  $Z_0$ .

Ces impédances sont associées avec les tensions et les courants d'après la loi d'HOM par :

$$\begin{cases} V_{a0} = Z_0 I_{a0} & V_{a2} = Z_2 I_{a2} & V_{a1} = Z_1 I_{a1} \\ V_{b0} = Z_0 I_{b0} & V_{b2} = Z_2 I_{b2} & V_{b1} = Z_1 I_{b1} \\ V_{c0} = Z_0 I_{c0} & V_{c2} = Z_2 I_{c2} & V_{c1} = Z_1 I_{c1} \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

Par rapport à la phase (a) on peut écrire :

$$\begin{pmatrix} V_1 = Z_1 I_1 \\ V_2 = Z_2 I_2 \\ V_0 = Z_0 I_0 \end{pmatrix} \quad (\text{III.10})$$

Considérons maintenant trois impédances symétriques parcourues par trois courants asymétriques  $I_a$ ,  $I_b$  et  $I_c$  donc les tensions des phases seront :

$$\begin{cases} V_a = I_1 Z_1 + I_2 Z_2 + I_0 Z_0 \\ V_b = a^2 I_1 Z_1 + a I_2 Z_2 + I_0 Z_0 \\ V_c = a I_1 Z_1 + a^2 I_2 Z_2 + I_0 Z_0 \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

Ces équations sont obtenues en remplaçant les équations (III.10) dans (III.8).

### B. Composantes symétriques des réseaux :

Dans l'étude des circuits à impédances symétrique, les courants dans chaque composante symétrique produit une chute de tension dans la même composante symétrique.

La valeur de cette chute de tension dépend seulement de l'impédance considérée de cette composante.

Cette impédance entre les différentes composantes d'un réseau électrique composé de circuit symétrique :

- 1) Les courants de la composante directe sont déterminés par la composante directe des tensions de source, de tension au point de défaut et des impédances.
- 2) Les courants de la composante inverse sont déterminés seulement, par la composante inverse de la tension au point de défaut et des impédances correspondantes.
- 3) Les courants de la composante homopolaire sont déterminés à partir de la tension homopolaire au point de défaut et des impédances correspondantes.

Il est important de noter que les forces électromotrices f.é.m. générées par les générateurs et les autres machines synchrones, ont seulement la composante directe, donc les composantes inverses et homopolaires au point de défaut sont nulles.

Donc il est nécessaire durant l'analyse des courts-circuits asymétriques d'utiliser trois schémas équivalents (pour chaque composante) d'une même phase (phase de référence).

Ces schémas sont :

Composante directe du réseau :

C'est la représentation du schéma équivalent d'une simple phase (Phase de référence a), avec tous les éléments du réseau sont représentés par leurs composantes directe.

Composante inverse du réseau :

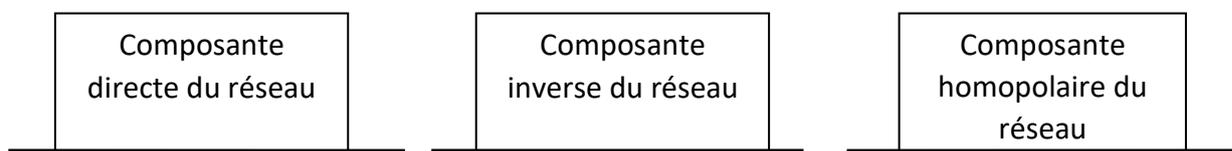
C'est la représentation du schéma équivalent d'une simple phase (phase de référence a), avec tous les éléments du réseau sont représentés par leurs composantes inverses.

Composante homopolaire du réseau :

C'est la représentation du schéma équivalent de la phase de référence (a), avec tous les éléments du réseau sont représentés par leurs composantes homopolaires.

**C. Représentation des composantes symétriques du réseau :**

En général on représente les trois schémas équivalents du réseau par trois blocks figure (III.2) chaque block contient les éléments de la composante correspondante.



**Figure III.2 :** Blocks des composantes symétriques d'un réseau. [1]

Considérons maintenant un court-circuit se produit dans un point F d'un réseau électrique, donc on doit représenter ce réseau par les composantes symétriques comme le montre la figure (III.3) dans laquelle chaque composante est représenté par le courant et la tension de défaut.

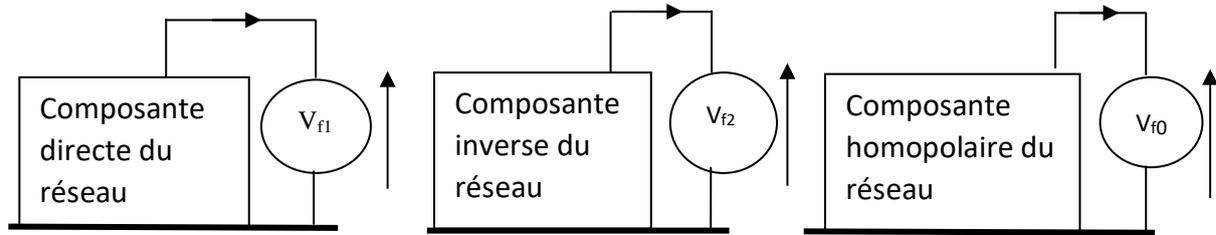


Figure III.3 : Composantes symétriques d'un réseau lors d'un court-circuit. [1]

#### D. Expressions des impédances des systèmes directe, inverse et homopolaire :

##### 1) Pour les lignes et câbles :

On adopte généralement les formules suivantes :

- Lignes de transport et de répartition :

$$Z_1 = j0.42 \Omega/\text{km}$$

- Lignes de distribution (section  $S$  en  $\text{mm}^2$ , supposée en Almélec) :

$$Z_1 = \left( \frac{33}{S} + j0.36 \right) \Omega/\text{km}$$

- Et pour les deux cas :

$$Z_2 = Z_1 \quad , \quad Z_0 = 3 Z_1;$$

- Câbles de moyenne tension (en aluminium, unipolaires ou tripolaire).

$$Z_1 = \left[ \frac{30}{S} + j(0.2 \text{ à } 0.3) \right] \Omega/\text{km};$$

$$Z_2 = Z_1 ; Z_0 \text{ de l'ordre de } 3 Z_1$$

Ces valeurs ne sont données qu'à titre d'ordre de grandeur, les formules exactes étant compliquées du fait de l'action des enveloppes des câbles, et des modes de fabrication et de pose.

##### 2) Pour les machines synchrones : (génératrices, compensateurs synchrones et moteurs synchrones) :

La réactance directe sera prise égale à :

- Les réactances subtransitoire pendent le premier dixième de seconde suivant l'apparition du défaut.
  - la réactance transitoire dans les dixièmes de seconde suivant.
  - la réactance synchrone après une ou plusieurs secondes suivant les machines, si le défaut n'était pas éliminé.
  - la réactance inverse est prise égale à la réaction transitoire sauf si l'on connaît sa valeur exacte (qui peut être un peu inférieur).
  - La réactance homopolaire est évidemment infinie si les enroulements statoriques sont couplés en triangle ou en étoile avec neutre isolé.

S'ils sont couplés en étoile avec neutre réuni à la terre, on constate que la réactance homopolaire devient faible : de l'ordre de la moitié de la réactance subtransitoire.

Les ordres de grandeur de cette réactance sont rappelés dans le tableau ci-dessous.

**Tableau (III.1) :** Les ordres de grandeurs de la réactance directe [1].

Réactance en pour-cent de ( $U_n^2/P_n$ )	Machine à pôles lisses	Machine à pôles saillants
Subtransitoire	10 à 20 %	15 à 25 %
Transitoire	15 à 25 %	25 à 35 %
Synchrone	150 à 230 %	70 à 100 %

### 3) Pour les transformateurs :

Les impédances directe et inverse sont égales et peuvent être considérées comme des « réactances de fuites » dont les valeurs relatives sont généralement comprises entre :

- 4 % (transformateur MT/HT) ;
- et (de 07 à 13) % (transformateur MT/HT) Ou même 17% exceptionnellement.

Sachant que la valeur relative est rapportée à une impédance égale à  $U_n^2/P_n$ ,  $P_n$  étant la puissance nominale du transformateur, et qui on la désigne aussi sous le nom de « puissance de court-circuit », puisque c'est en valeur relative, la tension primaire qui fait circuler le courant nominal secondaire en court-circuit.

L'impédance homopolaire dépend de la position du neutre par rapport à la terre et du type d'enroulement, l'impédance homopolaire vue d'un des jeux de barres (primaires, secondaires, tertiaires) est évidemment infinie si le neutre de l'enroulement correspondant est isolé.

#### 4) Pour les charges :

Il est nécessaire de distinguer charge active et charge passive pour les charges actives, dans les moteurs synchrones on prend :

- Pour l'impédance directe la valeur  $U_n^2/P_n$ , ou comme précédemment  $U_n$  est la tension nominale et  $P_n$  la puissance nominale.
- Pour l'impédance inverse le tiers environ de l'inductance directe,
- Pour l'impédance homopolaire une valeur infinie car le neutre du moteur synchrone est toujours isolé.

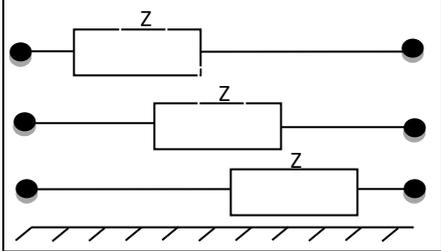
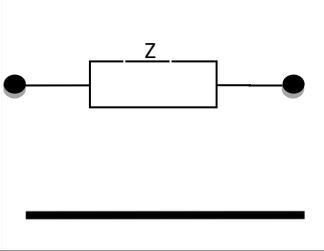
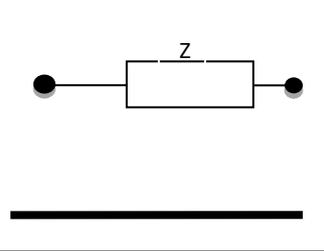
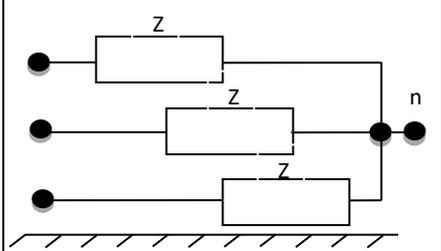
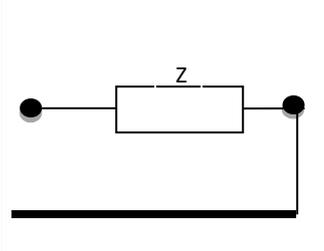
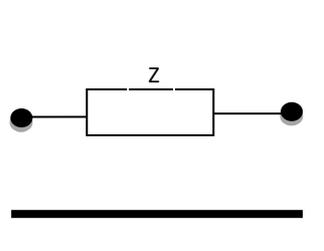
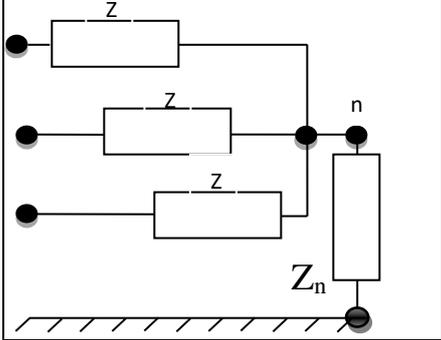
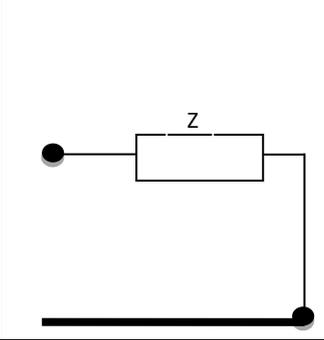
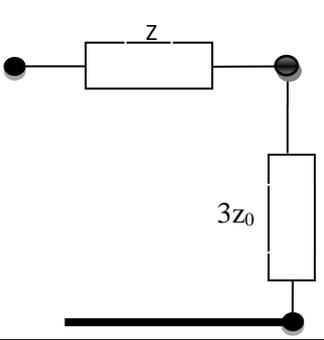
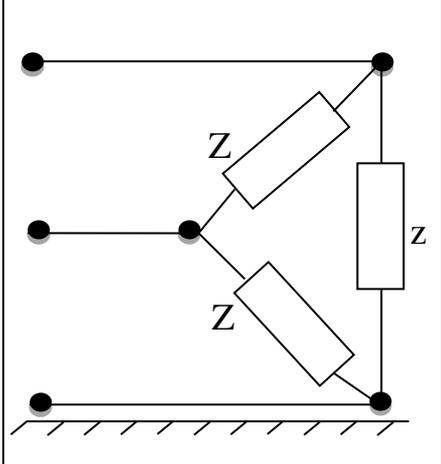
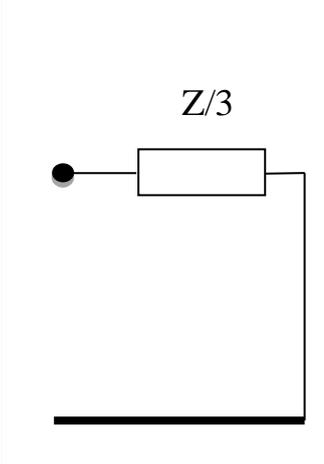
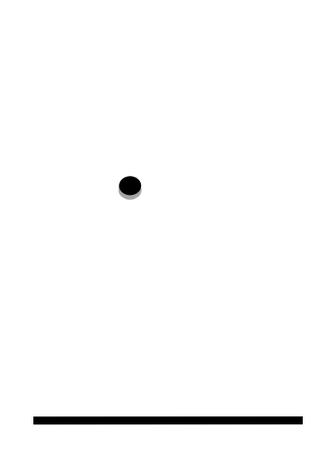
Les charges passives peuvent être représentées par des impédances directe et inverse égales entre elles et purement résistives  $r = U_n^2/P_n$ .

En générale l'influence des charges sur les courants de court-circuit est toujours faible, et même dans beaucoup de cas on la néglige totalement.

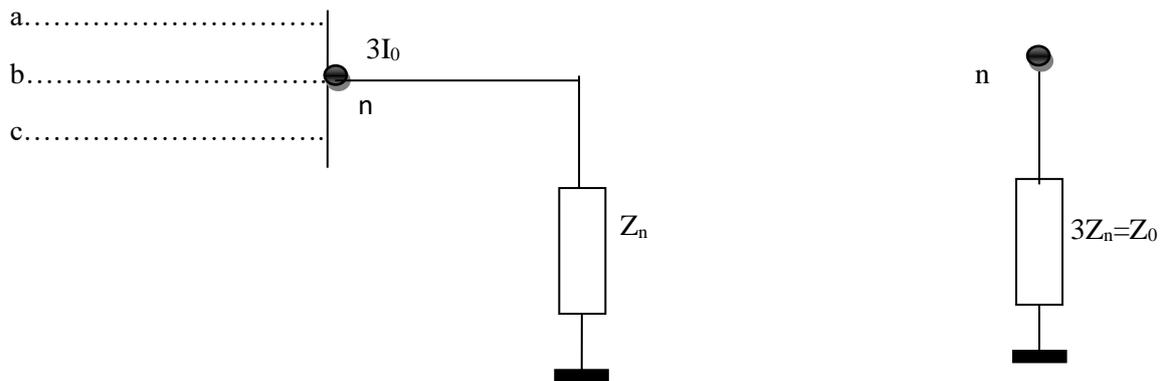
#### E - Composantes symétriques des circuits triphasés :

Le tableau (III.2) donne les composantes symétriques pour un certain nombre de circuits.

Tableau (III.2) : les composantes symétriques des circuits [1].

Circuit	Composante directe et inverse	Composante homopolaire
		
		
		
		

On voit dans ce tableau le cas d'un réseau mis à la terre à travers une impédance  $Z_n$  figure (3-4).



**Figure III.4 :** Composante homopolaire d'un réseau mis à la terre à travers une impédance [1]

Le courant dans l'impédance  $Z_n$ , égale à :

$$I_a + I_b + I_c = 3I_0$$

De même on a:

$$V_0 = \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c) = \frac{1}{3} (V_n + V_n + V_n) = V_n$$

$V_n$  est la tension du neutre par rapport à la terre

$$\text{Avec : } V_n = 3I_0 Z_n = V_0 \quad \Longrightarrow \quad Z_0 = \frac{V_0}{I_0} = (3I_0 Z_n) / I_0 = 3Z_n$$

### III.3. Calcul des court-circuits asymétriques dans un réseau électrique

Les équations des composants symétriques d'un court-circuit sont obtenues à partir des données de tension et du courant au point de défaut, ces données sont exprimées par les composants symétriques.

Les formules standard de calcul des courants de court-circuit sont présentés ci-dessous, la phase (a) est prise comme phase de référence, les symboles  $V_1$ ,  $V_2$  et  $V_0$  sont les tensions des trois composantes au point de court-circuit et les symboles  $I_1$ ,  $I_2$  et  $I_0$  les courants correspondants.

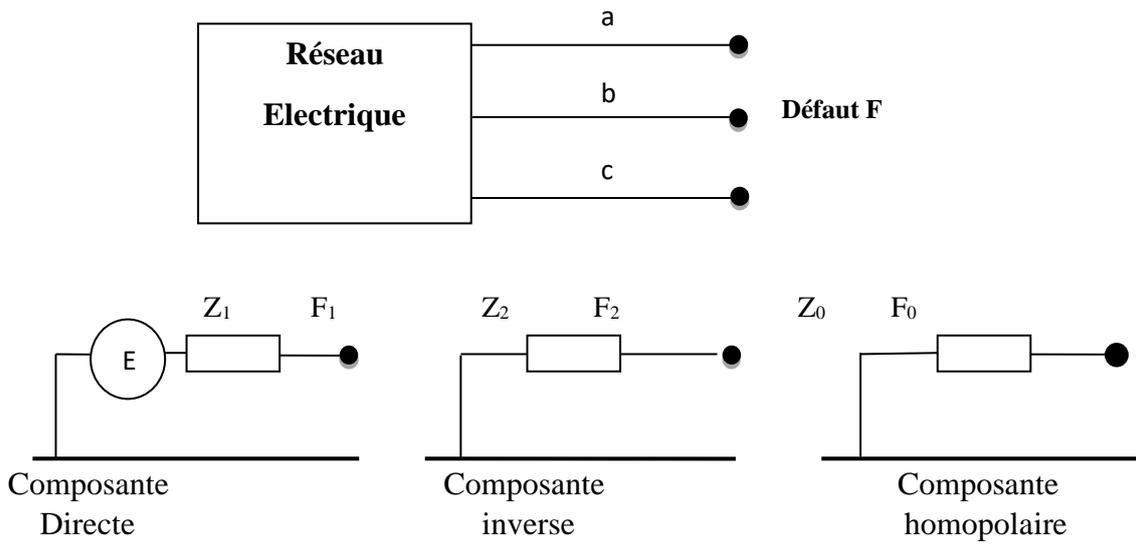


Figure III.5 : Composantes symétriques du réseau vu du point de défaut [1].

**III.3.1. Court-circuit monophasé :**

Considérons un court-circuit monophasé (phase (a) à la terre par exemple) représenté par la figure (III.6), les conditions de court-circuit au point de défaut sont :

$$V_a = 0 \tag{III.12}$$

$$I_b = I_c = 0 \tag{III.13}$$

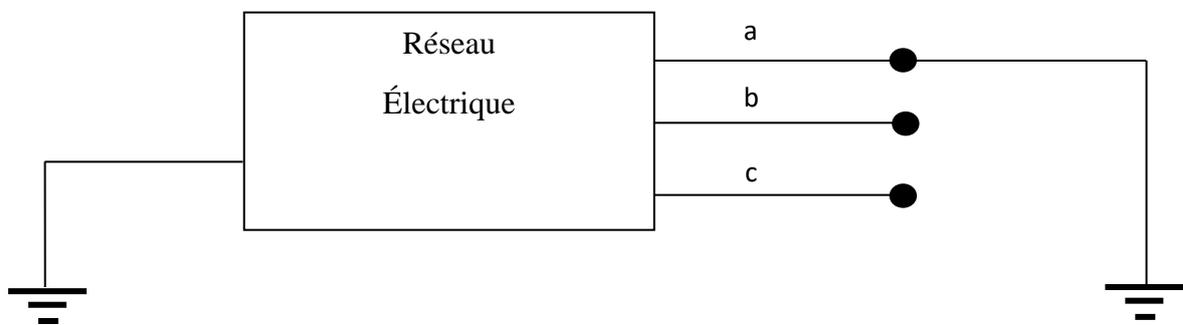


Figure III.6: Court-circuit monophasé (a-T). [1]

De (III.13) on a :

$$I_b = a^2 I_1 + a I_2 + I_0 = 0$$

$$I_c = aI_1 + a^2I_2 + I_0 = 0$$

Ce qui donne:

$$I_b - I_c = (a^2 - a)I_1 + (a - a^2)I_2 = 0$$

$$\implies I_1 = I_2$$

Aussi on a :

$$I_b + I_c = -I_1 - I_2 + 2I_0 = 0$$

En remplaçant  $I_2$  par  $I_1$  on aura :

$$I_b + I_c = -I_1 - I_1 + 2I_0 = 0$$

$$\implies I_0 = I_1$$

Donc :

$$I_1 = I_2 = I_0$$

De (III.12) on a :

$$V_a = E - I_1Z_1 - I_2Z_2 - I_0Z_0 = 0$$

$$\implies V_a = E - I_1(Z_1 + Z_2 + Z_0) = 0$$

Enfin pour un court-circuit monophasé (a-T) on a :

$$\left[ I_1 = I_2 = I_0 = \frac{E}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \right] \quad (\text{III.14})$$

Et les courants des phases correspondant :

$$\left( \begin{array}{l} I_a = I_1 + I_2 + I_0 = \frac{3E}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \\ I_b = a^2I_1 + aI_2 + I_0 = 0 \\ I_c = aI_1 + a^2I_2 + I_0 = 0 \end{array} \right) \quad (\text{III.15})$$

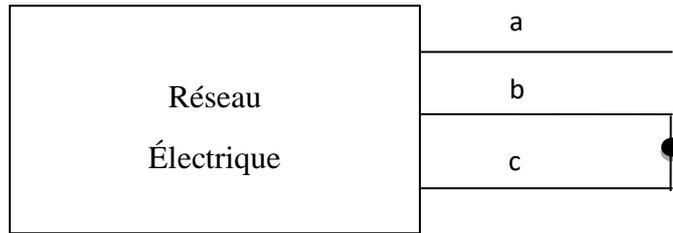
### III.3.2. Court-circuit biphasé non à la terre :

Considérons un court-circuit biphasé (b-c) représenté par la figure (III.7) les conditions de court-circuit au point de défaut sont :

$$I_a = 0 \quad (\text{III.16})$$

$$I_b + I_c = 0 \quad (\text{III.17})$$

$$V_b = V_c = V \quad (\text{III.18})$$



**Figure III.7 :** Court-circuit biphasé (b-c) non à la terre. [1]

Ecrivons les équations (III.16) et (III.17) par les composantes symétriques on aura :

$$I_a = I_1 + I_2 + I_0 = 0$$

Et

$$I_b + I_c = (a^2 I_1 + a I_2 + I_0) + (a I_1 + a^2 I_2 + I_0) = 0$$

Ce qui donne :

$$I_b + I_c = -I_1 - I_2 + 2I_0 = 0$$

Sachant que :  $1 + a + a^2 = 0$

On voit que :  $I_a + I_b + I_c = (I_1 + I_2 + I_0) + (-I_1 - I_2 + 2I_0) = 3I_0 = 0$

$$\implies I_0 = 0$$

On a aussi

$$I_a - (I_b + I_c) = (I_1 + I_2 + I_0) - (-I_1 - I_2 + 2I_0) = 2I_1 + 2I_2 = 0, \text{ avec } I_0 = 0$$

$$\implies I_2 = -I_1$$

Ecrivant l'équation (III.18) par les composantes symétriques on aura :

$$V_b = a^2 E - a^2 I_1 Z_1 - a I_2 Z_2 = V$$

$$V_c = a E - a I_1 Z_1 - a^2 I_2 Z_2 = V$$

Donc

$$V_b - V_c = (a^2 - a)E - (a^2 - a)I_1 Z_1 - (a - a^2)I_2 Z_2 = 0$$

Qui donne

$$E - I_1 Z_1 + I_2 Z_2 = 0$$

Mais  $I_2 = -I_1$

$$\implies E - I_1(Z_1 + Z_2) = 0$$

Donc les équations des composantes symétriques pour le cas d'un court-circuit biphasé non à la terre sont :

$$\begin{pmatrix} I_1 = \frac{E}{Z_1 + Z_2} \\ I_2 = \frac{-E}{Z_1 + Z_2} \\ I_0 = 0 \end{pmatrix} \quad (\text{III.19})$$

Donc les courants de phases correspondants :

$$\begin{pmatrix} I_a = I_1 + I_2 = 0 \\ I_b = a^2 I_1 + a I_2 = \frac{-j\sqrt{3}.E}{Z_1 + Z_2} \\ I_c = a I_1 + a^2 I_2 = \frac{j\sqrt{3}.E}{Z_1 + Z_2} \end{pmatrix} \quad (\text{III.20})$$

Parce que :  $a^2 - a = \left(-0.5 - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) - \left(-0.5 + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = -j\sqrt{3}$

### III.3.3. Court-circuit biphasé à la terre

Considérons un court-circuit biphasé a la terre (b-c-T) représenté par la figure (III.8), les conditions de court-circuit au point de défaut sont :

$$I_a = 0 \quad (\text{III.21})$$

$$V_b = V_c = 0 \quad (\text{III.22})$$

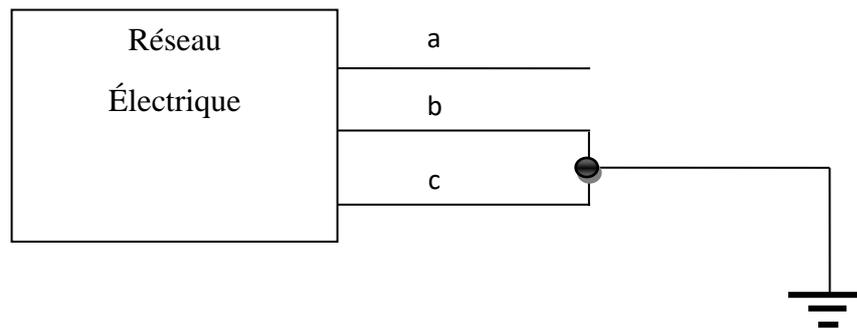


Figure III.8 : Court-circuit biphasé a la terre (b-c-T). [1]

De (III.22) on a

$$V_b = a^2 E - a^2 I_1 Z_1 - a I_2 Z_2 - I_0 Z_0 = 0$$

$$V_c = a E - a I_1 Z_1 - a^2 I_2 Z_2 - I_0 Z_0 = 0$$

Donc

$$V_b - a V_c = (1 - a) I_2 Z_2 - (1 - a) I_0 Z_0 = 0$$

$$I_0 = \frac{I_2 Z_2}{Z_0}$$

De (III.21) on a :

$$I_a = I_1 + I_2 + I_0 = 0$$

En remplaçant par  $I_0$

$$I_a = I_1 + \frac{(Z_2 + Z_0)I_2}{Z_0} = 0$$

Ce qui donne

$$I_2 = \frac{-Z_0 I_1}{Z_2 + Z_0}$$

$$I_0 = \frac{I_2 Z_2}{Z_0} = \frac{-Z_2 I_1}{Z_2 + Z_0}$$

On a

$$V_b + V_c = -E + I_1 Z_1 + I_2 Z_2 - 2I_0 Z_0 = 0$$

En remplaçant dans  $I_2$  et  $I_0$  :

$$-E + I_1 Z_1 + \frac{-Z_0 I_1}{Z_2 + Z_0} Z_2 - 2 \frac{-Z_2 I_1}{Z_2 + Z_0} Z_0 = 0$$

Ce qui donne

$$E = I_1 \left( Z_1 - \frac{Z_2 Z_0}{Z_2 + Z_0} + \frac{2Z_2 Z_0}{Z_2 + Z_0} \right)$$

Donc

$$E = \left( Z_1 + \frac{Z_2 Z_0}{Z_2 + Z_0} \right) I_1$$

Donc pour un court-circuit biphasé à la terre (b-c-T) on a :

$$\begin{pmatrix} I_1 = \frac{(Z_2 + Z_0)E}{Z_1 Z_2 + Z_0 Z_2 + Z_1 Z_0} \\ I_2 = \frac{-(Z_0)E}{Z_1 Z_2 + Z_0 Z_2 + Z_1 Z_0} \\ I_0 = \frac{-(Z_2)E}{Z_1 Z_2 + Z_0 Z_2 + Z_1 Z_0} \end{pmatrix} \quad \text{(III.23)}$$

Et pour les courants de phase :

$$\begin{pmatrix} I_a = I_1 + I_2 + I_0 = 0 \\ I_b = a^2 I_1 + a I_2 + I_0 = \frac{-j\sqrt{3}(Z_0 - aZ_2)E}{Z_1 Z_2 + Z_0 Z_2 + Z_1 Z_0} \\ I_c = a I_1 + a^2 I_2 + I_0 = \frac{+j\sqrt{3}(Z_0 - a^2 Z_2)E}{Z_1 Z_2 + Z_0 Z_2 + Z_1 Z_0} \end{pmatrix} \quad \text{(III.24)}$$

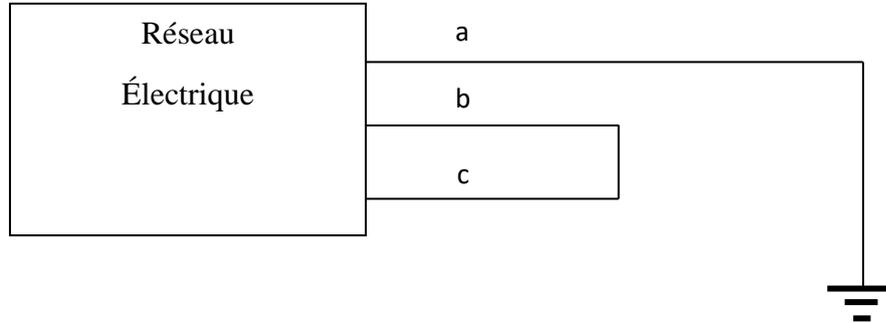
### III.3.4. Court-circuit biphasé non à la terre + court-circuit monophasé

Considérons les deux courts-circuits biphasé non à la terre (b-c) et monophasé (a-T) représentés par la figure (III.9)

$$V_a = 0 \quad (III.25)$$

$$V_b = V_c = V \quad (III.26)$$

$$I_b + I_c = 0 \quad (III.27)$$



**Figure III.9 :** Court-circuit biphasé (b-c) plus court-circuit monophasé (a-T) [1].

De (III.25) et (III.26) on a :

$$V_a = E - I_1 Z_1 - I_2 Z_2 - I_0 Z_0 = 0$$

$$V_b = a^2 E - a^2 I_1 Z_1 - a I_2 Z_2 - I_0 Z_0 = V$$

$$V_c = a E - a I_1 Z_1 - a^2 I_2 Z_2 - I_0 Z_0 = V$$

Ce qui donne :

$$V_a + V_b + V_c = -3I_0 Z_0 = 2V$$

$$V = \frac{-3I_0 Z_0}{2}$$

On a aussi :

$$V_b - aV_c = (1 - a)I_2 Z_2 - (1 - a)I_0 Z_0 = (1 - a)V$$

Donc

$$I_2 Z_2 - I_0 Z_0 = V$$

En remplace V on aura :

$$I_2 Z_2 - I_0 Z_0 = \frac{-3I_0 Z_0}{2}$$

$$I_0 = \frac{-2I_2 Z_2}{Z_0}$$

D'après l'équation (III.27) on a :

$$\begin{aligned} I_b + I_c &= (a^2 I_1 + a I_2 + I_0) + (a I_1 + a^2 I_2 + I_0) = 0 \\ -I_1 - I_2 + 2I_0 &= 0 \end{aligned}$$

En remplaçant dans  $I_0$  :

$$-I_1 - I_2 - \frac{4I_2 Z_2}{Z_0} = 0$$

Donc

$$I_2 = \frac{-I_1 Z_0}{4Z_2 + Z_0}$$

Et

$$I_0 = \frac{2I_1 Z_2}{4Z_2 + Z_0}$$

En remplaçant dans  $I_2$  et  $I_0$  de l'expression de  $V_a$  on aura :

$$V_a = E - I_1 \left[ Z_1 - \frac{Z_0 Z_2}{4Z_2 + Z_0} + \frac{2Z_0 Z_2}{4Z_2 + Z_0} \right] = 0$$

Alors :

$$E - I_1 \left[ \frac{4Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_0 Z_1}{4Z_2 + Z_0} \right] = 0$$

Donc pour ce type de court-circuit on a :

$$\begin{pmatrix} I_1 = \frac{(4Z_2 + Z_0)E}{4Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_0 Z_1} \\ I_2 = \frac{-Z_0 E}{4Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_0 Z_1} \\ I_0 = \frac{2Z_2 E}{4Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_0 Z_1} \end{pmatrix} \quad (\text{III.28})$$

Et pour les courants de phases sont :

$$\begin{pmatrix} I_a = I_1 + I_2 + I_0 = \frac{6Z_2 E}{4Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_0 Z_1} \\ I_b = a^2 I_1 + a I_2 + I_0 = \frac{-j\sqrt{3}E(2Z_2 + Z_0)}{4Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_0 Z_1} \\ I_c = a I_1 + a^2 I_2 + I_0 = \frac{j\sqrt{3}E(2Z_2 + Z_0)}{4Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_0 Z_1} \end{pmatrix} \quad (\text{III.29})$$

**Remarque**

On peut exprimer le court-circuit symétrique (triphase) par les composantes symétriques comme suit :

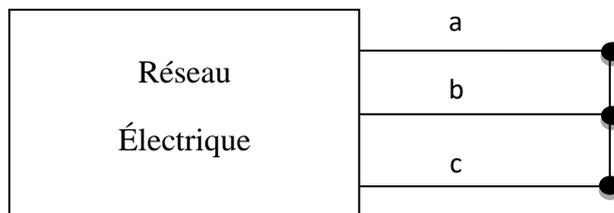
**III.3.5. Court-circuit triphasé****A- Court-circuit triphasé non à la terre**

Considérons premièrement un court-circuit triphasé non à la terre représenté par la figure (III.10), donc les conditions de court-circuit au point de défaut sont :

$$V_a = V_b = V_c = V \quad (\text{III.30})$$

$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad (\text{III.31})$$

On remplace dans (III.31) par les composantes symétriques on aura :



**Figure III.10 :** Court-circuit triphasé non à la terre [1].

$$(I_1 + I_2 + I_0) + (a^2 I_1 + a I_2 + I_0) + (a I_1 + a^2 I_2 + I_0) = 0 \Rightarrow 3I_0 = 0$$

De cette équation on aura :

$$I_0 = 0$$

Parce qu'on a :

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

Maintenant on remplace dans (III.30) par les composantes symétriques en tenant compte que  $I_0 = 0$

On aura :

$$\begin{pmatrix} V_a = E - I_1 Z_1 - I_2 Z_2 = V \\ V_b = a^2 E - a^2 I_1 Z_1 - a I_2 Z_2 = V \\ V_c = a E - a I_1 Z_1 - a^2 I_2 Z_2 = V \end{pmatrix} \quad (\text{III.32})$$

La somme de ces trois tensions nous donne :

$$V_a + V_b + V_c = 3V = 0$$

Donc :

$$V_a = V_b = V_c = 0$$

De (3.32) on a :

$$V_a - a V_b = (a^2 - 1) I_2 Z_2 = (1 - a) V = 0$$

Ce qui donne

$$I_2 = 0$$

Et

$$I_1 = \frac{E}{Z_1}$$

Donc les composantes symétriques pour le cas d'un court-circuit triphasé sont :

$$\begin{pmatrix} I_1 = \frac{E}{Z_1} \\ I_2 = 0 \\ I_0 = 0 \end{pmatrix} \quad (\text{III.33})$$

### B- Court-circuit triphasé non à la terre

Dans ce cas on a

$$V_a = V_b = V_c = 0 \quad (\text{III.34})$$

Donc

$$\begin{pmatrix} V_a = E - I_1 Z_1 - I_2 Z_2 - I_0 Z_0 = 0 \\ V_b = a^2 E - a^2 I_1 Z_1 - a I_2 Z_2 - I_0 Z_0 = 0 \\ V_c = a E - a I_1 Z_1 - a^2 I_2 Z_2 - I_0 Z_0 = 0 \end{pmatrix} \quad (\text{III.35})$$

Ce qui donne

$$V_a + V_b + V_c = -3I_0Z_0 = 0 \Rightarrow I_0 = 0$$

De même on a :

$$V_a - aV_b = (a^2 - 1)I_2Z_2 = 0 \Rightarrow I_2 = 0$$

Donc pour le cas d'un court-circuit triphasé que ce soit à la terre ou non à la terre, les équations de composantes symétriques des courants sont les mêmes de l'équation (III.33).

Les courants de phase entrant dans le défaut sont :

$$\begin{pmatrix} I_a = I_1 = \frac{E}{Z_1} \\ I_b = a^2 I_1 = \frac{a^2 E}{Z_1} \\ I_c = a I_1 = \frac{a E}{Z_1} \end{pmatrix} \quad (\text{III.36})$$

#### III.4. Résumé des formules des composantes symétriques :

Les composantes symétriques des courants de court-circuit pour les cinq cas de court-circuit sont regroupées dans les tableaux (III.3) et (III.4)

Pour les tensions les composantes symétriques au point de défaut sont déterminées à partir des formules (III.37) :

$$\begin{pmatrix} V_1 = E - I_1 Z_1 \\ V_2 = -I_2 Z_2 \\ V_0 = -I_0 Z_0 \end{pmatrix} \quad (\text{III.37})$$

Les résultats sont résumés dans les tableaux « III.5 et III.6 »

**Tableau (III.3) :** Présentent les formules des courants pour les composantes symétriques [1].

Type de défaut	$I_1$	$I_2$	$I_0$
Monophasé à la terre (a-t)	$\frac{E}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$	$\frac{E}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$	$\frac{E}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$
Biphasé (b-c)	$\frac{E}{Z_1 + Z_2}$	$\frac{-E}{Z_1 + Z_2}$	0
Biphasé à la terre (b-c-T)	$\frac{(Z_2 + Z_0)E}{Z_1Z_2 + Z_2Z_0 + Z_1Z_0}$	$\frac{-Z_0E}{Z_1Z_2 + Z_2Z_0 + Z_1Z_0}$	$\frac{-Z_2E}{Z_1Z_2 + Z_2Z_0 + Z_1Z_0}$
Biphasé et monophasé à la terre (b-c + a-T)	$\frac{(4Z_2 + Z_0)E}{4Z_1Z_2 + Z_2Z_0 + Z_1Z_0}$	$\frac{-Z_0E}{4Z_1Z_2 + Z_2Z_0 + Z_1Z_0}$	$\frac{2Z_2E}{4Z_1Z_2 + Z_2Z_0 + Z_1Z_0}$
Triphasé (a-b-c ou a-b-c-T)	$\frac{E}{Z_1}$	0	0

**Tableau (III.4) :** présentent les formules des courants de phase [1].

Type de défaut	$I_a$	$I_b$	$I_c$
Monophasé à la terre (a-t)	$\frac{3E}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$	0	0
Biphasé (b-c)	0	$\frac{-j\sqrt{3}E}{Z_1 + Z_2}$	$\frac{+j\sqrt{3}E}{Z_1 + Z_2}$
Biphasé à la terre (b-c-T)	0	$\frac{-j\sqrt{3}(Z_0 - aZ_2)E}{Z_1Z_2 + Z_2Z_0 + Z_1Z_0}$	$\frac{j\sqrt{3}(Z_0 - a^2Z_2)E}{Z_1Z_2 + Z_2Z_0 + Z_1Z_0}$
Biphasé monophasé à la terre (b-c + a-T)	$\frac{6Z_2E}{4Z_1Z_2 + Z_2Z_0 + Z_1Z_0}$	$\frac{-j\sqrt{3}E(2Z_2 + Z_0)E}{4Z_1Z_2 + Z_2Z_0 + Z_1Z_0}$	$\frac{j\sqrt{3}E(2Z_2 + Z_0)E}{4Z_1Z_2 + Z_2Z_0 + Z_1Z_0}$
Triphasé (a-b-c ou a-b-c-T)	$\frac{E}{Z_1}$	$\frac{a^2E}{Z_1}$	$\frac{aE}{Z_1}$

**Tableau (III.5) :** Présentent les formules des tensions des composantes symétriques [1]

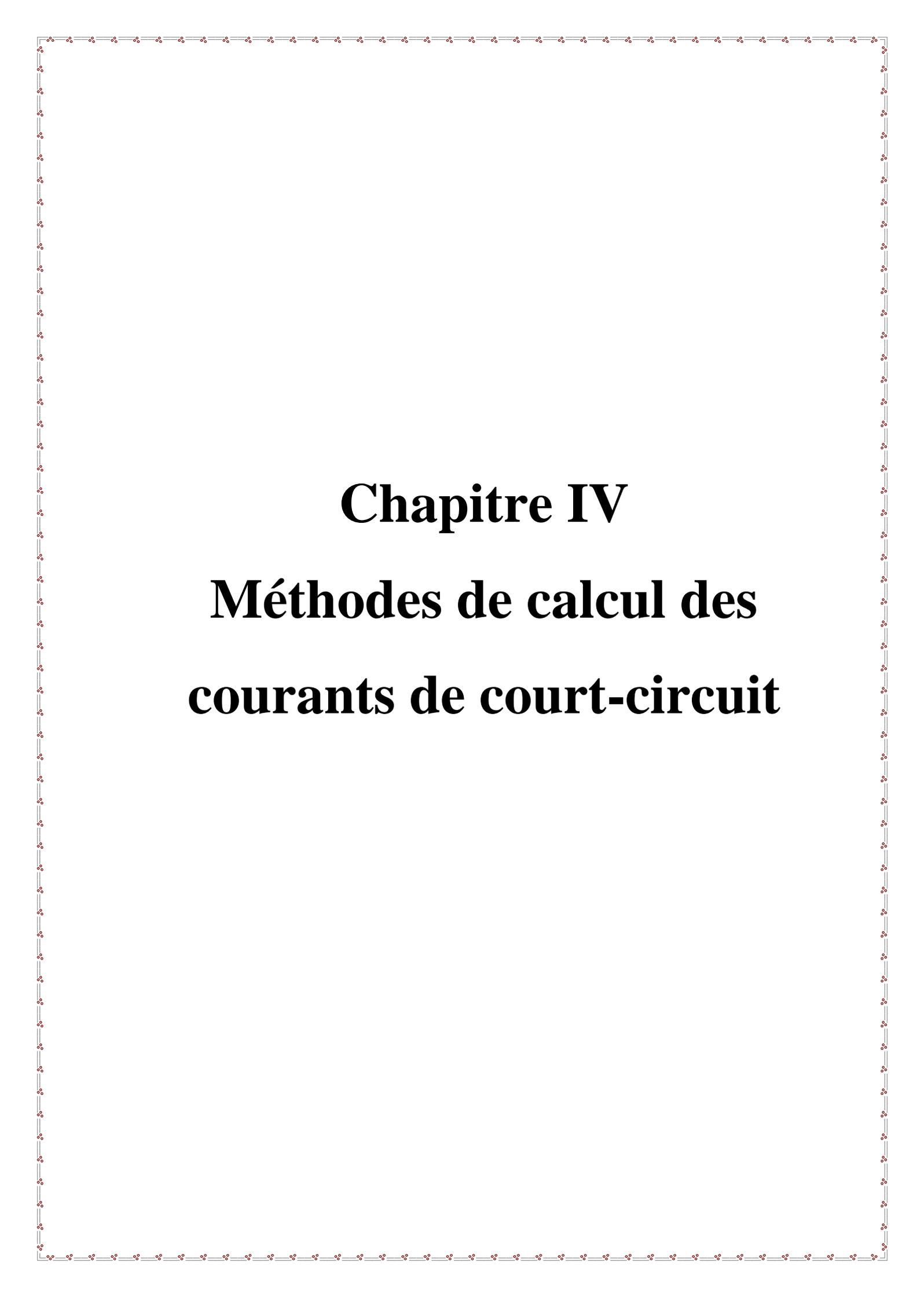
Type de défaut	$V_1$	$V_2$	$V_0$
Monophasé à la terre (a-t)	$\frac{E(Z_2 + Z_0)}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$	$\frac{-Z_2 E}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$	$\frac{-Z_0 E}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$
Biphasé (b-c)	$\frac{Z_2 E}{Z_1 + Z_2}$	$\frac{Z_2 E}{Z_1 + Z_2}$	0
Biphasé à la terre (b-c-T)	$\frac{Z_2 Z_0 E}{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_1 Z_0}$	$\frac{Z_2 Z_0 E}{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_1 Z_0}$	$\frac{Z_0 Z_2 E}{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_1 Z_0}$
Biphasé et monophasé à la terre (b-c + a-T)	$\frac{Z_2 Z_0 E}{4Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_1 Z_0}$	$\frac{Z_2 Z_0 E}{4Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_1 Z_0}$	$\frac{-2Z_0 Z_2 E}{4Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_1 Z_0}$
Triphasé (a-b-c ou a-b-c-T)	0	0	0

**Tableau (III.6) :** Présentent les formules des tensions de phase [1]

Type de défaut	$V_a$	$V_b$	$V_c$
Monophasé à la terre (a-t)	0	$\frac{[(a^2 - a)Z_2 + (a^2 - 1)Z_0]E}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$	$\frac{[(a - a^2)Z_2 + (a - 1)Z_0]E}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$
Biphasé (b-c)	$\frac{2Z_2 E}{Z_1 + Z_2}$	$\frac{-Z_2 E}{Z_1 + Z_2}$	$\frac{-Z_2 E}{Z_1 + Z_2}$
Biphasé à la terre (b-c-T)	$\frac{3Z_2 Z_0 E}{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_1 Z_0}$	0	0
Biphasé et monophasé à la terre (b-c + a-T)	0	$\frac{-3Z_2 Z_0 E}{4Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_1 Z_0}$	$\frac{-3Z_0 Z_2 E}{4Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_1 Z_0}$
Triphasé (a-b-c ou a-b-c-T)	0	0	0

### III.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a vu que l'utilisation des composantes symétriques est importante pour l'analyse et le calcul des court-circuits asymétriques.



# **Chapitre IV**

## **Méthodes de calcul des courants de court-circuit**

## IV.1. Introduction

Le calcul des courants de court-circuit est très compliqué, si l'on tient compte des caractéristiques réels et des régimes réels de tous les éléments du système énergétique.

Les méthodes de calcul des courant de court-circuit sont celle utilisés pour l'analyse des réseaux électriques on distingue :

- a) Solution par transformation et simplification du schéma équivalent du réseau.
- b) Solution directe du système d'équation obtenu par la méthode des tensions noeudales.
- c) Solution par simulation d'un réseau.

Le choix de l'une de ces méthodes dépend de la taille et la complexité du réseau et des informations sur les données nécessaires pour l'analyse juste avant le défaut.

La solution directe par la résolution du système d'équations est actuellement la plus utilisée en utilisant des programmes appropriés.

L'utilisation des programmes de calculs permet de calculer un grand nombre de réseaux (plusieurs sources ou plusieurs mailles).

La solution par transformation et simplification du schéma est utilisée pour résoudre les problèmes de certains réseaux caractérisés par une taille et complexité réduite, elle donne la solution à plusieurs nombres de défauts et utilisé aussi à des problèmes plus complexes, elle est seulement limitée par le temps d'obtention de la solution.

La solution par simulation a l'avantage d'être plus simple à l'application grâce à la correspondance élément par élément entre le réseau réel et le réseau simulée.

Devant l'apparition des méthodes numériques elle est généralement limitée à l'étude des petits réseaux et dans les situations ou l'ordinateur ne peut pas donner des solutions.

Dans ce chapitre on va expliquer les deux premières méthodes,

## IV.2. Méthode de transformation et simplification du schéma du réseau

La méthode de transformation du schéma, qui dépend de la réduction du schéma à sa plus simple forme, cette méthode est en particulier utilisé quand on veut donner la solution des courants d'un nombre limité de branches.

La réduction du réseau est le processus de combinaison des branches du réseau, afin de réduire le réseau donné à un réseau équivalent avec un nombre réduit de branches, et qui donne une solution simple et directe.

Les formules de réductions les plus utilisées sont :

### IV.2.1. Combinaison des branches série :

Prenant par exemple plusieurs branches branchées en série, chaque branche (i) comprend une source de tension  $E_i$  et une impédance série  $Z_i$ , la branche équivalente comprend la tension équivalente  $E_{eq}$  en série avec l'impédance  $Z_{eq}$  avec :

$$E_{eq} = \sum_{i=1}^n E_i = E_1 + E_2 + \dots + E_n \quad (IV.1)$$

Et

$$Z_{eq} = \sum_{i=1}^n Z_i = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n \quad (IV.2)$$

Où n est le nombre de branches, la figure (IV.1) illustre cette combinaison.

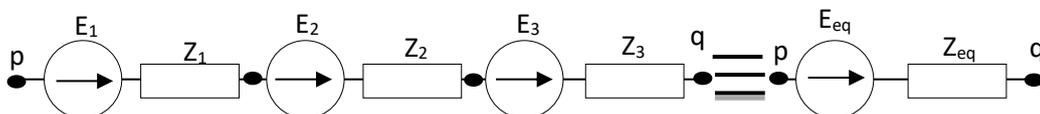


Figure IV.1: Combinaison des branches série [1].

### IV.2.2. Combinaison des branches parallèles

Prenant par exemple plusieurs branches branchées en parallèles, chaque branche (i) est donnée par la source de tension  $E_i$  en série avec l'admittance  $Y_i$ , la branche équivalente comprend la source de tension équivalente  $Z_{eq}$ ,

Comme le montre la figure (IV.2).

$$E_{eq} = \left(\frac{1}{Y_{eq}}\right) \sum_{i=1}^n E_i Y_i = \left(\frac{1}{Y_{eq}}\right) [E_1 Y_1 + E_2 Y_2 + \dots + E_n Y_n] \quad (IV.3)$$

Et

$$Y_{eq} = \sum_{i=1}^n Y_i = Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n \quad (IV.4)$$

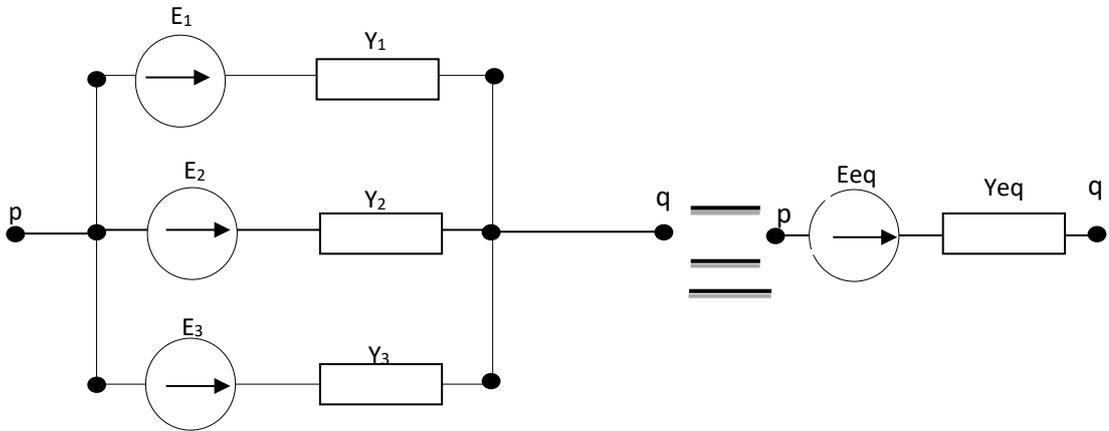


Figure IV.2: Combinaisons des branches parallèles [1].

### IV.2.3. Transformation étoile triangle (Y-Δ) :

La transformation étoile triangle permet de transformer trois branches d'impédances branchées en étoile en trois branches branchées en triangle. Prenant le circuit de la figure (IV.3), la relation entre paramètres du schéma en triangle en fonction de celui en étoile sera :

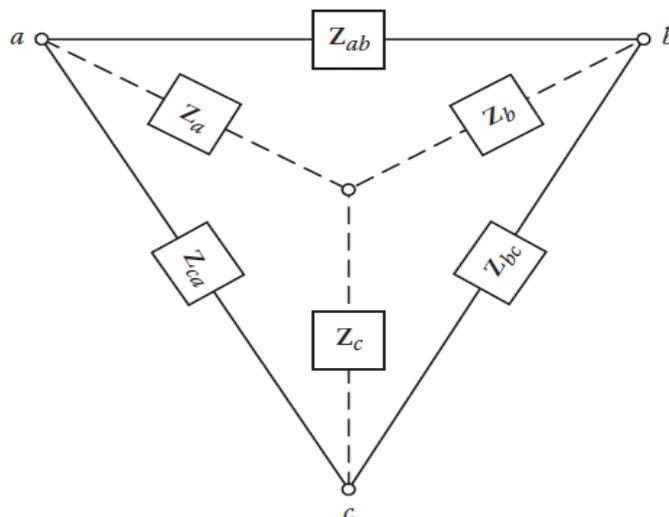


Figure IV.3: Transformation Y-Δ [1].

$$\begin{pmatrix} Z_{ab} = \frac{Z_a Z_b + Z_b Z_c + Z_c Z_a}{Z_c} \\ Z_{bc} = \frac{Z_a Z_b + Z_b Z_c + Z_c Z_a}{Z_a} \\ Z_{ca} = \frac{Z_a Z_b + Z_b Z_c + Z_c Z_a}{Z_b} \end{pmatrix} \quad (IV.5)$$

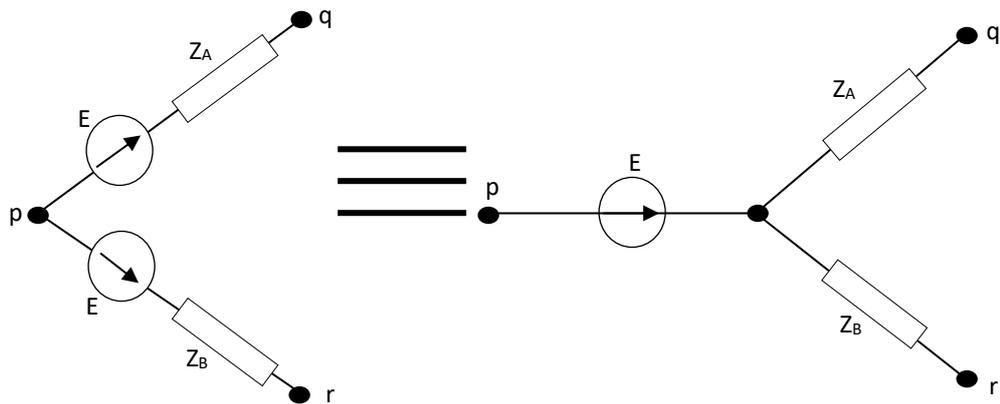
**IV.2.4. Transformation triangle étoile ( $\Delta$ -Y) :**

D'après la figure (IV.3), la transformation inverse ( $\Delta$ -Y) nous permet d'écrire les relations suivantes :

$$\begin{pmatrix} Z_a = \frac{Z_{ab} \cdot Z_{ca}}{Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{ca}} \\ Z_b = \frac{Z_{bc} \cdot Z_{ab}}{Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{ca}} \\ Z_c = \frac{Z_{bc} \cdot Z_{ca}}{Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{ca}} \end{pmatrix} \quad (IV.6)$$

**IV.2.5. Combinaisons des tensions égaux**

Si deux ou plusieurs branches ont le même nœud commun et des tensions égales, la tension individuelle de chaque branche peut être remplacée par une seule branche contenant une seule source de tension qui a la même valeur que les autres tensions comme le montre la figure (IV.4).



**Figure IV.4:** Combinaisons des tensions égaux [1].

Ce théorème est utilisé dans les réseaux électriques pour la réduction de plusieurs sources à une seule source équivalente.

### IV.3. Méthode Des Tensions Noeudales.

L'utilisation de la méthode de transformation et simplification du schéma du réseau électrique est seulement utilisée pour les réseaux de faible taille, par contre pour les réseaux de grande taille, on fait recours à d'autres méthodes, parmi lesquelles, la méthode des tensions noeudales.

On va voir qu'avec l'utilisation des éléments de la matrice d'impédance  $Z_{bus}$ , on peut calculer facilement les courants des courts-circuits, ainsi que les tensions des jeux de barres (JB) durant le défaut.

Considérons un exemple d'un réseau type de  $n$  JB, comme le montre la figure (IV-5), le système est supposé opérationnel sous les conditions de fonctionnement équilibrés.

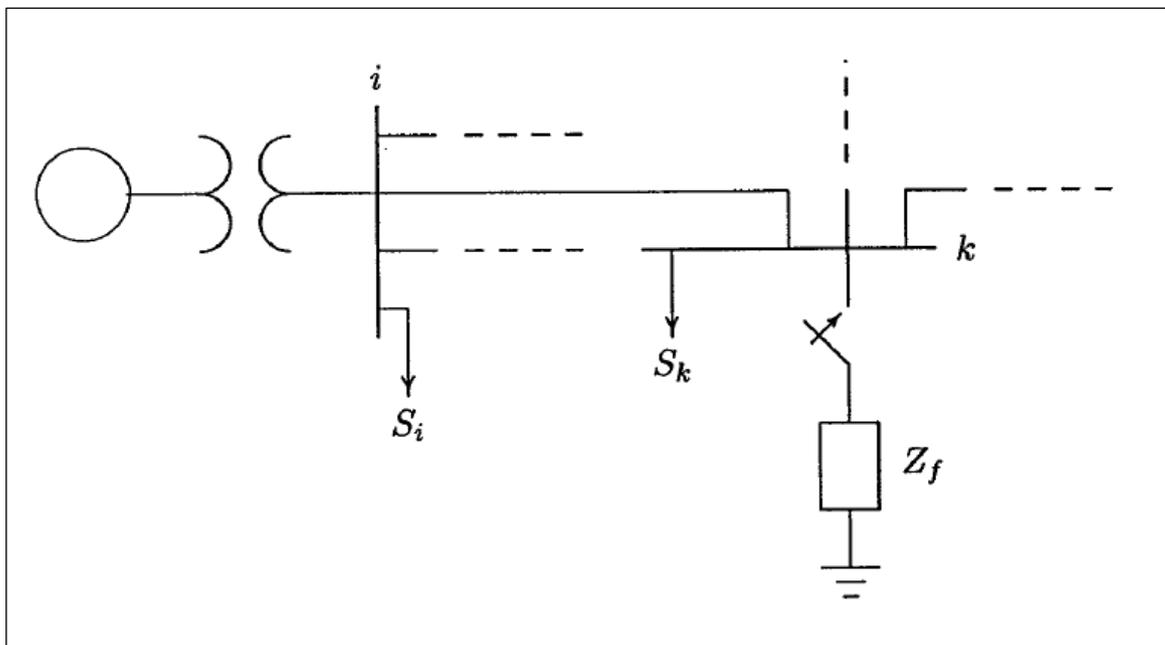


Figure IV.5: Réseau électrique type.

Dans le schéma unifilaire de la figure (IV.5), en général, le générateur est représenté par une tension constante en série avec sa propre impédance, qui doit être  $x''_d$ ,  $x'_d$  ou  $x_d$  selon le régime de fonctionnement. Les lignes de transport sont représentées par

les paramètres du modèle en  $\pi$ , sachant que tous les paramètres sont exprimés en unité relative (p.u) par rapport à la même valeur de la puissance de base  $S_{base}$ .

Si par exemple un court-circuit triphasé est appliqué au JB « k » à travers une impédance de défaut  $Z_f$ .(Figure IV-5).

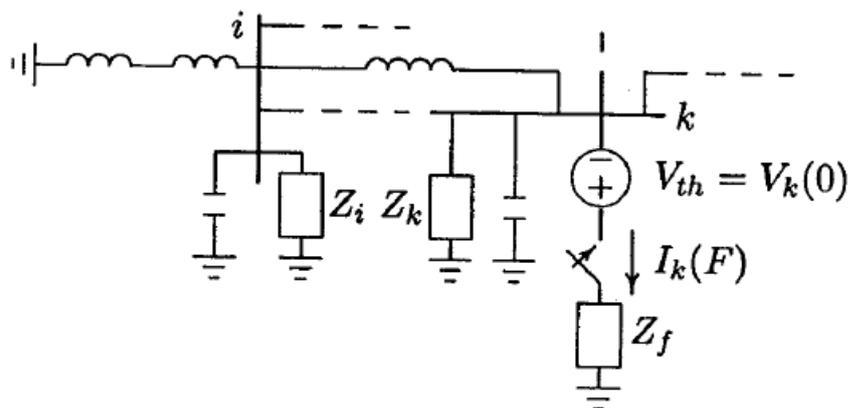
Les tensions  $V_{bus}(0)$  des JB juste avant le court-circuit sont obtenues à partir de la solution du système d'équations du réseau et qui sont représentés par le vecteur colonne suivant :

$$V_{bus}(0) = \begin{bmatrix} V_1(0) \\ \vdots \\ V_k(0) \\ \vdots \\ V_n(0) \end{bmatrix} \quad (IV.7)$$

Pour une meilleure estimation du courant de court-circuit, on représente les JB de charge par des impédances constantes déterminées à partir des tensions  $V_{bus}(0)$ , alors pour le JB « i » par exemple, on a

$$Z_{i,ch} = \frac{|V_i(0)|^2}{\hat{S}_{ch}} \quad (IV.8)$$

La variation de la tension causée par le court-circuit à travers l'impédance de défaut  $Z_f$  est équivalent à celle causée par l'addition de la tension  $V_k(0)$  avec toutes les sources étant court-circuitées. Alors, on court-circuitant toutes les sources et on représente tous les éléments du réseau ainsi que les charges par leurs impédances, nous obtenons le circuit de Thévenin de la figure (IV.6).



**Figure IV.6:** Circuit d Thévenin du réseau en défaut au JB « k ».

L'écart de la variation de la tension des JB ( $\Delta V_{bus}(0)$ ) causée par l'apparition du court-circuit

$$\Delta V_{bus}(0) = \begin{bmatrix} \Delta V_1(0) \\ \vdots \\ \Delta V_k(0) \\ \vdots \\ \Delta V_n(0) \end{bmatrix} \quad (\text{IV.9})$$

Du théorème de Thévenin, la tension des JB durant le défaut est obtenue par l'addition des tensions juste avant le défaut ( $V_{bus}(0)$ ) avec l'écart des variations des tensions ( $\Delta V_{bus}$ ) durant ce défaut.

Alors, on peut écrire

$$V_{bus}(F) = V_{bus}(0) + \Delta V_{bus} \quad (\text{IV.10})$$

Sachant que les courants injectés dans les JB sont déterminés à partir de l'équation matricielle suivante :

$$I_{bus} = Y_{bus} \cdot V_{bus} \quad (\text{IV.11})$$

Avec les éléments de la diagonale de la matrice admittance  $Y_{bus}$  sont déterminés comme suit :

$$Y_{ii} = \sum_{j=0}^m y_{ij}, \text{ avec } j \neq i, \quad (\text{IV.12})$$

Et

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij}$$

Dans le circuit de Thévenin de la figure (IV.6), le courant entrant dans tous les JB est nul, sauf pour le JB « k » en défaut, dans lequel un courant de défaut sortant. Donc dans la représentation matricielle, on le représente par un signe négatif entrant au JB de défaut « k », alors le système d'équation pour le circuit de Thévenin devient :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -I_k(F) \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1k} & \cdots & y_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ y_{k1} & \cdots & y_{kk} & \cdots & y_{kn} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ y_{n1} & \cdots & y_{nk} & \cdots & y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_1(0) \\ \vdots \\ \Delta V_k(0) \\ \vdots \\ \Delta V_n(0) \end{bmatrix} \quad (\text{IV.13})$$

Ou bien sous la forme matricielle suivante :

$$I_{bus}(F) = Y_{bus} \cdot \Delta V_{bus} \quad (\text{IV.14})$$

La solution de ce système nous donne :

$$\Delta V_{bus} = Z_{bus} \cdot I_{bus}(F) \quad (IV.15)$$

Où :

$Z_{bus} = Y_{bus}^{-1}$  : est la matrice impédance du circuit.

En remplace (IV.15) dans (IV.10), on aura :

$$V_{bus}(F) = V_{bus}(0) + Z_{bus} \cdot I_{bus}(F) \quad (IV.16)$$

Où avec les éléments de chaque matrice :

$$\begin{bmatrix} V_1(F) \\ \vdots \\ V_k(F) \\ \vdots \\ V_n(F) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1(0) \\ \vdots \\ V_k(0) \\ \vdots \\ V_n(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1k} & \cdots & Z_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{k1} & \cdots & Z_{kk} & \cdots & Z_{kn} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{n1} & \cdots & Z_{nk} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -I_k(F) \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (IV.17)$$

Puisque nous avons un seul élément non nul du vecteur colonne du courant, alors le  $k^{\text{ème}}$  équation du système (IV.17) devient :

$$V_k(F) = V_k(0) - Z_{kk} \cdot I_k(F) \quad (IV.18)$$

Aussi, à partir du circuit de Thévenin de la figure (IV-6), on a

$$V_k(F) = Z_f \cdot I_k(F) \quad (IV.19)$$

Pour un court-circuit front, on a  $Z_f = 0$ , et  $V_k(F) = 0$ .

En remplace (IV.19) dans (IV.18), on aura :

$$I_k(F) = \frac{V_k(0)}{Z_{kk} + Z_f} \quad (IV.20)$$

Ceci est pour le cas du court-circuit au JB « k », on aura besoin seulement des éléments  $Z_{kk}$  de la matrice d'impédance  $Z_{bus}$ .

Aussi, écrivant la  $i^{\text{ème}}$  équation de (IV.17), on aura :

$$V_i(F) = V_i(0) - Z_{ik} \cdot I_k(F) \quad (IV.21)$$

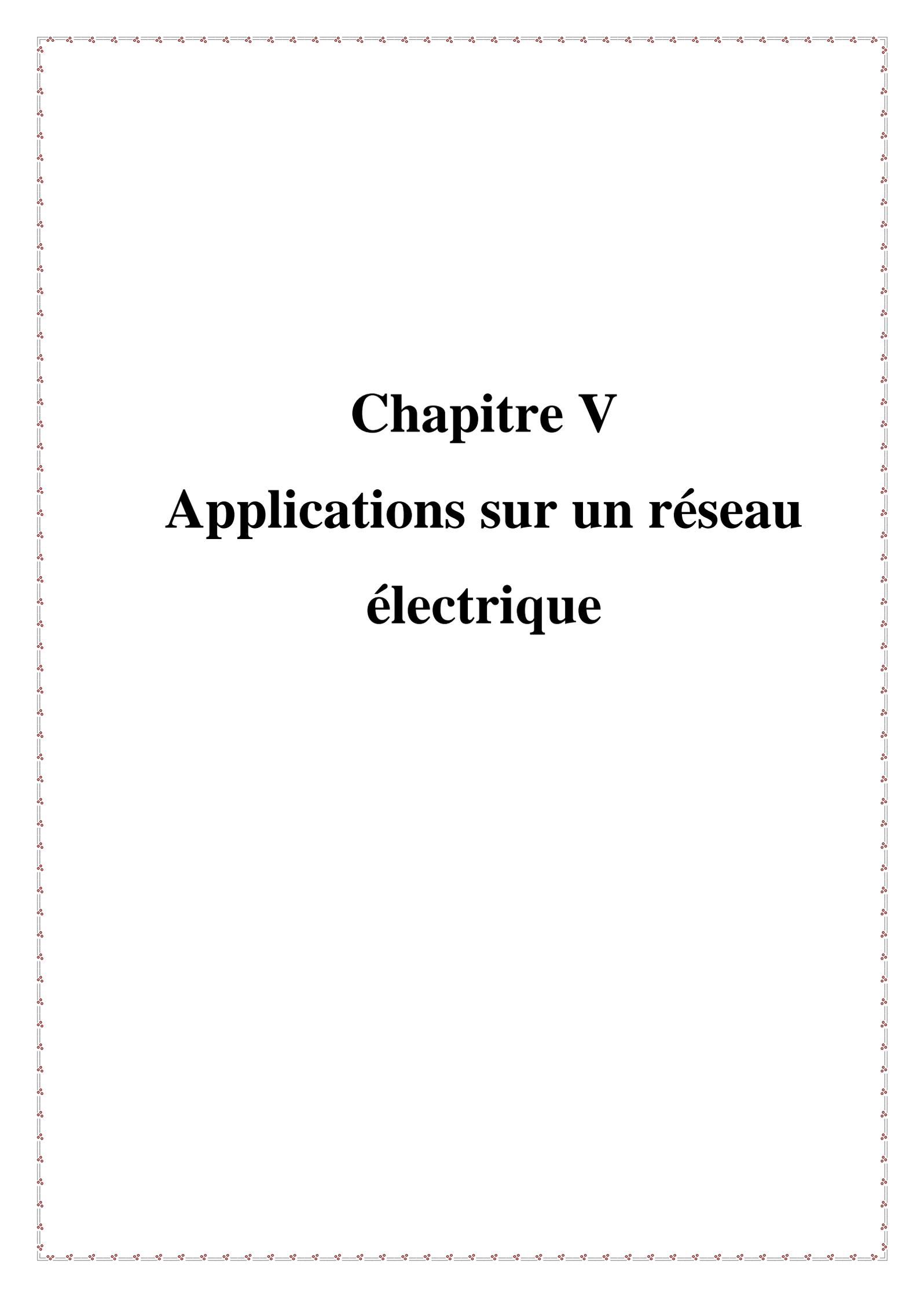
En remplace  $I_k(F)$  par sa formule de (IV.20), on aura :

$$V_i(F) = V_i(0) - Z_{ik} \cdot \frac{V_k(0)}{Z_{kk} + Z_f} \quad (IV.22)$$

Alors, connaissant la valeur de la tension des JB durant le défaut, on peut calculer les courants dans tous les lignes, par exemple, pour la ligne entre les JB « i » et « j » et d'impédance  $z_{ij}$  le courant de court-circuit dans cette ligne (défini positivement dans la direction de « i » vers « j ») est :

$$I_{ij}(F) = \frac{V_i(F) - V_j(F)}{z_{ij}} \quad (\text{IV.23})$$

Donc, on peut conclure qu'avec la connaissance de la matrice impédance  $Z_{bus}$ , les courants de courts-circuits et les tensions des JB durant le défaut sont obtenus pour un court-circuit à n'importe quel JB. Cette méthode est très simple et pratique.



# **Chapitre V**

## **Applications sur un réseau électrique**

**V.1. Donnée du réseau à calculer**

Le réseau proposé à l'étude est un réseau à cinq JB, qui comprend deux générateurs, deux transformateurs et trois lignes, on veut déterminer le courant de court-circuit des différents courts-circuits qui se produisent au JB n° : 3 à travers une impédance  $Z_f = j0.1 pu$ . (Figure V.1) ;

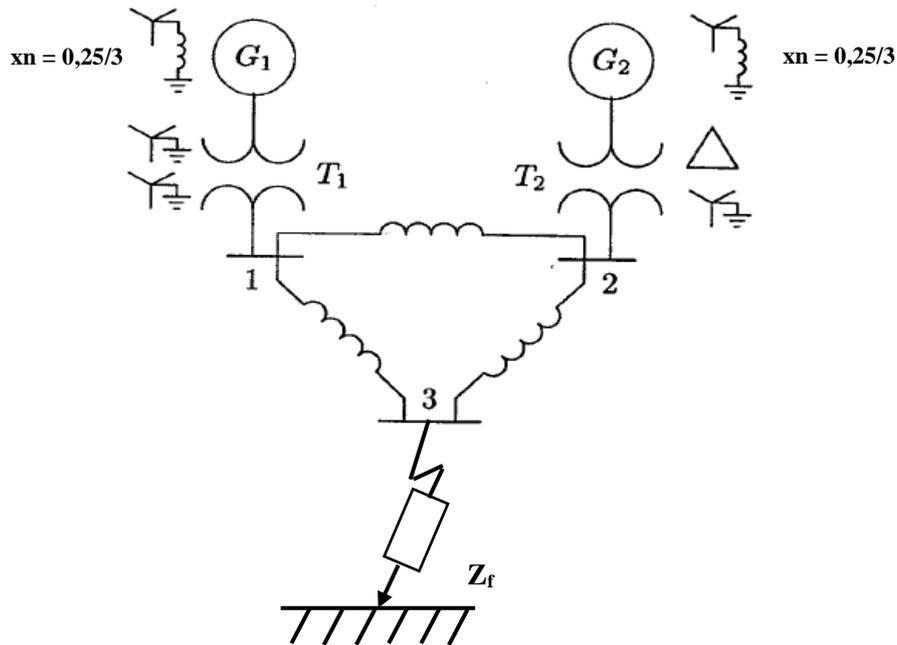


Figure V.1. : Réseau à calculer [3].

Les données du réseau sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau V.1. : Données du réseau à calculer [3]

Elément du réseau	S <sub>b</sub> (MVA)	U <sub>N</sub> (KV)	x <sub>1</sub> (en pu)	x <sub>2</sub> (en pu)	x <sub>0</sub> (en pu)
G <sub>1</sub>	100	20	0.15	0.15	0.05
G <sub>2</sub>	100	20	0.15	0.15	0.05
T <sub>1</sub>	100	20/220	0.10	0.10	0.10
T <sub>2</sub>	100	20/220	0.10	0.10	0.10
L12	100	220	0.125	0.125	0.30
L13	100	220	0.15	0.15	0.35
L23	100	220	0.25	0.25	0.7125

## V.2. Calcul du réseau avec la méthode de transformation et simplification du schéma

Pour cela, on va commencer par le schéma équivalent des composantes directe et inverse représentés par les figure V.2 et 3 ci-dessous :

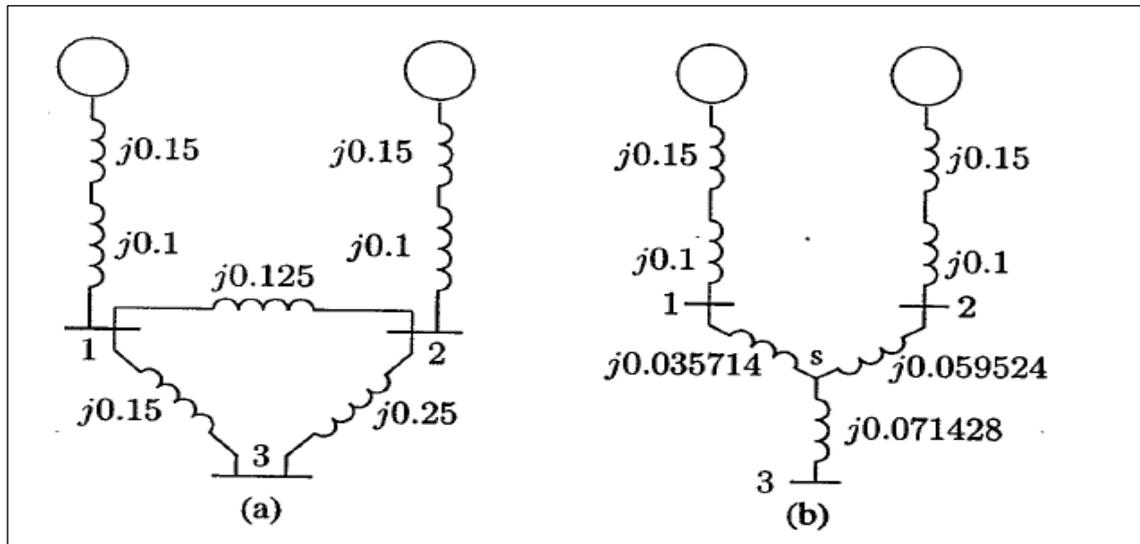


Figure V.2. : Schéma équivalent de la composante directe

Pour calculer l'impédance de Thevenin vue du JB de défaut, on doit simplifier notre schéma par la transformation triangle (figure V.2.a) vers l'étoile (figure V.2.b), avec :

$$Z_{1s} = \frac{Z_{12} \cdot Z_{13}}{Z_{12} + Z_{13} + Z_{23}} = \frac{(j0.15) \cdot (j0.125)}{(j0.15 + j0.125 + j0.25)} = j0.035714$$

$$Z_{2s} = \frac{Z_{12} \cdot Z_{23}}{Z_{12} + Z_{13} + Z_{23}} = \frac{(j0.125) \cdot (j0.25)}{(j0.525)} = j0.059524$$

$$Z_{3s} = \frac{Z_{13} \cdot Z_{23}}{Z_{12} + Z_{13} + Z_{23}} = \frac{(j0.15) \cdot (j0.25)}{(j0.525)} = j0.071428$$

Par combinaisons des branches série et parallèle, on aura le schéma équivalent de la composante directe représentée par la figure V.3.a, avec l'impédance équivalente de Thevenin :

$$Z_{33}^1 = \frac{(j0.15 + j0.1 + j0.035714) \cdot (j0.15 + j0.1 + j0.059524)}{(j0.15 + j0.1 + j0.035714 + j0.15 + j0.1 + j0.059524)} + j0.071428 = j0.22$$

Pour la composante inverse est la même que celle de la composante directe sans la f.é.m. du générateur comme le montre la figure V.3.b, avec  $Z_{33}^2 = Z_{33}^1 = j0.22$ .



Figure V.3. : Schéma équivalent de la composante directe (a) et inverse (b).

Pour la composante homopolaire, le schéma équivalent est représenté par la figure V.4 suivante :

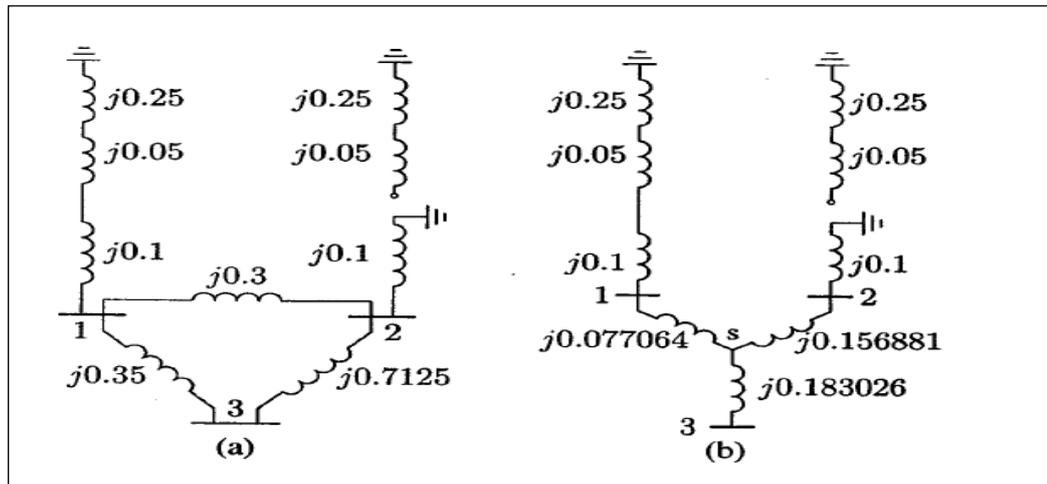


Figure V.4. : Détermination de la composante homopolaire.

On procède de la même manière que précédemment (càd par transformation triangle étoile), on aura :

$$Z_{1s} = \frac{(j0.3) \cdot (j0.35)}{(j0.3 + j0.35 + j0.7125)} = j0.077064$$

$$Z_{2s} = \frac{(j0.3) \cdot (j0.7125)}{(j1.3625)} = j0.156881$$

$$Z_{3s} = \frac{(j0.35) \cdot (j0.7125)}{(j1.3625)} = j0.1830275$$

Ce qui donne pour l'impédance équivalente de Thevenin  $Z_{33}^0$ , (figure V.5)

$$Z_{33}^0 = \frac{(j0.4770642) \cdot (j0.2568807)}{j0.7339449} + 0.1830275 = j0.35$$

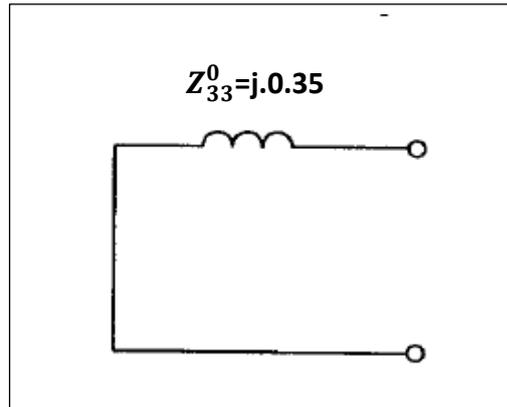


Figure V.5 : Schéma équivalent de la composante homopolaire.

## V.2.1. Détermination des courants de court-circuit

### A. Pour un court-circuit triphasé

$$I_{3cc}^{(3)} = \frac{V_3}{Z_{33}^1 + Z_f} = \frac{1 \angle 0^\circ}{j0.22 + j0.10} = -j3.125 \text{ pu.}$$

En Ampère on a :

$$I_{3cc}^{(3)}(A) = I_{3cc}^{(3)}(\text{pu}) \cdot I_b$$

Avec

$$I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3}U_b} = \frac{100 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 220} = 262.432 \text{ A}$$

Donc

$$I_{3cc}^{(3)}(A) = -j3.125 \cdot (262.432) = 820.1 \angle (-90^\circ) \text{ A}$$

### B. Pour un court-circuit monophasé

Les composantes symétriques du courant de court-circuit au JB 3, d'après (III.14) sont :

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{E}{Z_{33}^1 + Z_{33}^2 + Z_{33}^0 + 3Z_f} = \frac{1.0}{j0.22 + j0.22 + j0.35 + 3 \cdot (j0.1)} = -j0.9174$$

Les courants de court-circuit des trois phases seront d'après (III.15) :

$$I_a = \frac{3E}{Z_{33}^1 + Z_{33}^2 + Z_{33}^0 + 3Z_f} = \frac{3}{j1.09} = -j2.7522 \text{ (pu)}$$

$$I_b = 0 \quad (\text{pu})$$

$$I_c = 0 \quad (\text{pu})$$

Sachant que

$$I_{base} = 262.432 \text{ A}$$

Alors

$$I_a = 722.265 \angle(-90^\circ) \text{ (A)}$$

$$I_b = 0 \angle 0^\circ \text{ (A)}$$

$$I_c = 0 \angle 0^\circ \text{ (A)}$$

### C. Pour un court-circuit biphasé non à la terre

D'après (III.19) les composantes symétriques du courant de court-circuit biphasé non à la terre au JB 3 à travers l'impédance  $Z_f$  sont :

$$I_1 = \frac{E}{Z_{33}^1 + Z_{33}^2 + Z_f} = \frac{1.0}{j0.22 + j0.22 + j0.10} = j1.8519$$

$$I_2 = \frac{-E}{Z_{33}^1 + Z_{33}^2 + Z_f} = \frac{-1.0}{j0.22 + j0.22 + j0.10} = -j1.8519$$

$$I_0 = 0$$

Ce qui donne les courants par phase d'après (III.20) :

$$I_a = 0 \text{ pu}$$

$$I_b = \frac{-j\sqrt{3}E}{Z_{33}^1 + Z_{33}^2 + Z_f} = \frac{-j\sqrt{3} \cdot 1.0}{j0.54} = -3.2075 \text{ pu}$$

$$I_c = \frac{+j\sqrt{3}E}{Z_{33}^1 + Z_{33}^2 + Z_f} = 3.2075 \text{ pu}$$

Donc les courants réels dans chaque phase sont

$$\begin{cases} I_a = 0 \angle 0^\circ & \text{(A)} \\ I_b = -841.7506 \angle 0^\circ & \text{(A)} \\ I_c = 841.7506 \angle 0^\circ & \text{(A)} \end{cases}$$

### D. Pour un court-circuit biphasé à la terre

D'après (III.23) les composantes symétriques du courant de court-circuit biphasé à la terre au JB 3 à travers l'impédance  $Z_f$  sont :

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \frac{(Z_{33}^2 + Z_{33}^0 + 3 Z_f)E}{Z_{33}^1 Z_{33}^2 + (Z_{33}^0 + 3 Z_f) \cdot Z_{33}^2 + Z_{33}^1 (Z_{33}^0 + 3 Z_f)} \\
 &= \frac{(j0.22 + j0.35 + 3 \cdot (j0.1))1.0}{(j0.22)(j0.22) + (j0.65)(j0.22) + (j0.22)(j0.65)} = -j2.6017 \text{ pu} \\
 I_2 &= \frac{-(Z_{33}^0 + 3 Z_f)E}{Z_{33}^1 Z_{33}^2 + (Z_{33}^0 + 3 Z_f) \cdot Z_{33}^2 + Z_{33}^1 (Z_{33}^0 + 3 Z_f)} = \frac{-j0.65}{-0.3344} = j1.9438 \text{ pu} \\
 I_0 &= \frac{-(Z_{33}^2)E}{Z_{33}^1 Z_{33}^2 + (Z_{33}^0 + 3 Z_f) \cdot Z_{33}^2 + Z_{33}^1 (Z_{33}^0 + 3 Z_f)} = \frac{-j0.22}{-0.3344} = j0.6579 \text{ pu}
 \end{aligned}$$

Les courants de court-circuit par phase d'après (III.24) :

$$\begin{aligned}
 I_a &= 0 \text{ pu} \\
 I_b &= \frac{-j\sqrt{3}(Z_{33}^0 + 3 Z_f - aZ_2)E}{Z_{33}^1 Z_{33}^2 + (Z_{33}^0 + 3 Z_f) \cdot Z_{33}^2 + Z_{33}^1 (Z_{33}^0 + 3 Z_f)} \\
 &= \frac{-j\sqrt{3} \cdot \left( j0.65 - \left( -0.5 + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) (j0.22) \right) 1.0}{-0.3344} \\
 &= \frac{(1.1258 + 0.1905 - j0.33)}{-0.3344} = \frac{1.3163 - j0.33}{-0.3344} = (-3.9363 + j0.9868) \text{ pu} \\
 &= 4.058 \angle (165.93^\circ) \text{ pu} \\
 I_c &= \frac{+j\sqrt{3}(Z_0 + 3 Z_f - a^2 Z_{33}^2)E}{Z_{33}^1 Z_{33}^2 + (Z_{33}^0 + 3 Z_f) \cdot Z_{33}^2 + Z_{33}^1 (Z_{33}^0 + 3 Z_f)} = 4.058 \angle (14.07^\circ) \text{ pu}
 \end{aligned}$$

Le courant de court-circuit totale au JB 3 sera :

$$I_{3cc} = I_b + I_c = 4.058 \angle (165.93^\circ) + 4.058 \angle (14.07^\circ) = 1.9732 \angle (90^\circ)$$

Donc les courants réels dans chaque phase sont

$$\begin{cases}
 I_a = 0 \angle 0^\circ & (A) \\
 I_b = 1064.95 \angle 165.93^\circ & (A) \\
 I_c = 1064.95 \angle 14.07^\circ & (A)
 \end{cases}$$

$$I_{3cc}(A) = I_{3cc}(pu) \cdot I_{base} = 517.831 (A)$$

### V.3. Calcul du réseau avec la méthode des tensions noeudales

Le calcul du réseau avec la méthode des tensions noeudales, appelée aussi méthode des impédances, parce que à chaque fois on détermine l'impédance globale du réseau pour les composantes (directe, inverse et homopolaire), après ça on détermine les courants et les tensions de court-circuit, pour cela, on utilise des programmes de calcul en Matlab pour les différents types de court-circuit par la référence [3].

1<sup>ère</sup> étape : entrées des données

A partir des schémas équivalents des composantes (directe, inverse et homopolaire), on fait entrer les données du réseau comme suit :

Pour la composante directe par :

$$\begin{aligned} \text{zdata1} = & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0.25 \\ & 0 & 2 & 0.25 \\ & & 1 & 2 & 0 & 0.125 \\ & & & 1 & 3 & 0 & 0.15 \\ & & & & 2 & 3 & 0 & 0.25 \end{bmatrix} ; \end{aligned}$$

Pour la composante homopolaire par :

$$\begin{aligned} \text{zdata0} = & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0.40 \\ & 0 & 2 & 0.10 \\ & & 1 & 2 & 0 & 0.30 \\ & & & 1 & 3 & 0 & 0.35 \\ & & & & 2 & 3 & 0 & 0.7125 \end{bmatrix} ; \end{aligned}$$

Pour la composante inverse :

$\text{zdata2} = \text{zdata1}$  ;

Après ça, on détermine les impédances  $Z_{bus1}$ ,  $Z_{bus2}$  et  $Z_{bus0}$  par l'exécution du programme `zbuild`, comme suit :

$Z_{bus1} = \text{zbuild}(\text{zdata1})$  ;

$Z_{bus0} = \text{zbuild}(\text{zdata0})$  ;

$Z_{bus2} = Z_{bus1}$  ;

### V.3.1. Analyse du court-circuit triphasé symétrique

Le programme de calcul du court-circuit triphasé symétrique est **symfault** qui nécessite les données  $\text{zdata1}$  et  $Z_{bus1}$

L'exécution du programme sera comme suit :

Entrer le numéro du JB en CC -> 3

Entrer Impédance de défaut  $Z_f = R + j*X$  in En forme complexe (pour un cc front enter 0).  $Z_f = j*0.1$

Tableau V.2. : Analyse du court-circuit triphasé symétrique

CC triphasé symétrique au JB No. 3 Pour $Z_f = j*0.1$				CC triphasé symétrique au JB No. 3 Pour $Z_f = 0$			
Courant totale de CC = 3.1250 pu				Courant totale de CC = 4.5455 pu			
Tensions des JB durant le CC en per unit				Tensions des JB durant le CC en per unit			
JB No.	Tension Module	Angle degrés		JB No.	Tension Module	Angle degrés	
1	0.5938	0.0000		1	0.4091	0.0000	
2	0.6250	0.0000		2	0.4545	0.0000	
3	0.3125	0.0000		3	0.0000	0.0000	
Courants de lignes pour le CC au JB No. 3				Courants de lignes pour le CC au JB No. 3			
De JB	Au JB	Courant Module	Angle degrés	De JB	Au JB	Courant Module	Angle degrés
G	1	1.6250	-90.0000	G	1	2.3636	-90.0000
1	3	1.8750	-90.0000	1	3	2.7273	-90.0000
G	2	1.5000	-90.0000	G	2	2.1818	-90.0000
2	1	0.2500	-90.0000	2	1	0.3636	-90.0000
2	3	1.2500	-90.0000	2	3	1.8182	-90.0000
3	F	3.1250	-90.0000	3	F	4.5455	-90.0000

### V.3.2. Analyse des courts-circuits asymétriques

#### A. Court-circuit monophasé

Le programme de calcul du court-circuit monophasé est **lgfault** qui nécessite les données  $zdata1$ ,  $Zbus1$ ,  $zdata2$ ,  $Zbus2$ ,  $zdata0$ ,  $Zbus0$  et  $V$ , où  $V$  est la matrice colonne des tensions des JB, si les tensions ne sont pas données, on les prend égales à 1 pu.

L'exécution du programme dans les deux cas front et à travers une impédance  $Z_f$  sera comme suit :

Tableau V.3. : Analyse du court-circuit asymétrique monophasé

CC monophasé au JB No. 3 Pour $Z_f = j*0.1$					CC monophasé au JB No. 3 Pour $Z_f = 0$				
Courant totale de CC = 2.7523 pu					Courant totale de CC = 3.7975 pu				
Tensions des JB durant le CC en per unit					Tensions des JB durant le CC en per unit				
<b>JB No.</b>	<b>Phase a</b>	<b>Phase b</b>	<b>Phase c</b>		<b>JB No.</b>	<b>Phase a</b>	<b>Phase b</b>	<b>Phase c</b>	
1	0.6330	1.0046	1.0046		1	0.4937	1.0064	1.0064	
2	0.7202	0.9757	0.9757		2	0.6139	0.9671	0.9671	
3	0.2752	1.0647	1.0647		3	0.0000	1.0916	1.0916	
Courants de lignes pour le CC au JB No. 3					Courants de lignes pour le CC au JB No.3				
<b>De JB</b>	<b>Au JB</b>	<b>Module du courant de ligne</b>			<b>De JB</b>	<b>Au JB</b>	<b>Module du courant de ligne</b>		
		<b>Phase a</b>	<b>Phase b</b>	<b>Phase c</b>			<b>Phase a</b>	<b>Phase b</b>	<b>Phase c</b>
1	3	1.6514	0.0000	0.0000	1	3	2.2785	0.0000	0.0000
2	1	0.3761	0.1560	0.1560	2	1	0.5190	0.2152	0.2152
2	3	1.1009	0.0000	0.0000	2	3	1.5190	0.0000	0.0000
3	F	2.7523	0.0000	0.0000	3	F	3.7975	0.0000	0.0000

### B. Court-circuit biphasé non à la terre

Le programme de calcul du court-circuit biphasé non à la terre est **llfault** qui nécessite les données  $zdata1$ ,  $Zbus1$ ,  $zdata2$ ,  $Zbus2$ , et  $V$ .

L'exécution du programme donne les résultats suivants :

**Tableau V.4. :** Analyse du court-circuit asymétrique biphasé non à la terre

CC biphasé non à la terre au JB No. 3 Pour $Z_f = j*0.1$					CC biphasé non à la terre au JB No. 3 Pour $Z_f = 0$				
Courant totale de CC = 3.2075 pu					Courant totale de CC = 3.9365 pu				
Tensions des JB durant le CC en per unit					Tensions des JB durant le CC en per unit				
JB No.	Phase a	Phase b	Phase c		JB No.	Phase a	Phase b	Phase c	
1	1.0000	0.6720	0.6720		1	1.0000	0.6128	0.6128	
2	1.0000	0.6939	0.6939		2	1.0000	0.6364	0.6364	
3	1.0000	0.5251	0.5251		3	1.0000	0.5000	0.5000	
Courants de lignes pour le CC au JB No. 3					Courants de lignes pour le CC au JB No. 3				
De JB	Au JB	Module du courant de ligne			De JB	Au JB	Module du courant de ligne		
		Phase a	Phase b	Phase c			Phase a	Phase b	Phase c
1	3	0.0000	1.9245	1.9245	1	3	0.0000	2.3619	2.3619
2	1	0.0000	0.2566	0.2566	2	1	0.0000	0.3149	0.3149
2	3	0.0000	1.2830	1.2830	2	3	0.0000	1.5746	1.5746
3	F	0.0000	3.2075	3.2075	3	F	0.0000	3.9365	3.9365

### C. Court-circuit biphasé à la terre

Le programme de calcul du court-circuit biphasé non à la terre est **llgfault** qui nécessite les données  $zdata1$ ,  $Zbus1$ ,  $zdata2$ ,  $Zbus2$ ,  $zdata0$ ,  $Zbus0$  et  $V$ .

L'exécution du programme donne les résultats suivants :

Tableau V.5. : Analyse du court-circuit asymétrique biphasé à la terre

CC biphasé à la terre au JB No. 3 Pour $Z_f = j*0.1$					CC biphasé à la terre au JB No. 3 Pour $Z_f = 0$				
Courant totale de CC = 1.9737 pu					Courant totale de CC = 3.2609 pu				
Tensions des JB durant le CC en per unit					Tensions des JB durant le CC en per unit				
JB No.	Phase a	Phase b	Phase c		JB No.	Phase a	Phase b	Phase c	
1	1.0066	0.5088	0.5088		1	1.0109	0.4498	0.4498	
2	0.9638	0.5740	0.5740		2	0.9402	0.5362	0.5362	
3	1.0855	0.1974	0.1974		3	1.1413	0.0000	0.0000	
Courants de lignes pour le CC au JB No. 3					Courants de lignes pour le CC au JB No. 3				
De JB	Au JB	Module du courant de ligne			De JB	Au JB	Module du courant de ligne		
		Phase a	Phase b	Phase c			Phase a	Phase b	Phase c
1	3	0.0000	2.4350	2.4350	1	3	0.0000	2.5565	2.5565
2	1	0.1118	0.3682	0.3682	2	1	0.1848	0.4456	0.4456
2	3	0.0000	1.6233	1.6233	2	3	0.0000	1.7043	1.7043
3	F	0.0000	4.0583	4.0583	3	F	0.0000	4.2608	4.2608

#### V.4. Interprétations des résultats

On peut regrouper les courants de court-circuit calculés dans le tableau suivant :

Tableau V.6. : Résumé des résultats de calcul des courts-circuits symétrique et asymétrique.

	CC symétriques	CC asymétriques		
	Triphasé	Monophasé	Biphasé non à la terre	Biphasé à la terre
Pour $Z_f = 0$	<b>4.5455 pu</b>	<b>3.7975 pu</b>	<b>3.9365 pu</b>	<b>3.2609 pu</b>
Pour $Z_f = j*(0.1)$	<b>3.1250 pu</b>	<b>2.7523 pu</b>	<b>3.2075 pu</b>	<b>1.9737 pu</b>

- D'après les résultats de calculs, on voit que les deux méthodes donnent les mêmes résultats des courants de court-circuit ;

- L'utilisation des programmes de calcul en Matlab est plus efficace et plus rapide surtout pour les réseaux de grande taille ;
- La méthode de transformation et simplification du schéma du réseau est utilisée pour les réseaux de faible taille ;
- Les courts-circuits front ( $Z_f = 0$ ), donnent des courants de courts-circuits plus grand que celles à travers une impédance de court-circuit  $Z_f \neq 0$  ;
- Le courant de court-circuit dépend de la nature du court-circuit, en général le court-circuit triphasé front est le court-circuit le plus sévère sur les réseaux électriques parce qu'il engendre un courant de court-circuit le plus élevé que les autres types ;
- La connaissance des courants de court-circuit (surtout triphasé) permet de choisir et modéliser les moyens de protections nécessaires.

## Conclusion générale

L'étude et l'analyse des courts-circuits dans les réseaux électriques se divise en deux parties, l'analyse des courts-circuits symétriques et asymétriques ;

Pour les premiers, le calcul et l'analyse des courts-circuits est simple et se détermine à partir du schéma équivalent de la composant directe ;

Pour les deuxièmes, le calcul et l'analyse des courts-circuits est complexe, la solution est d'utiliser les composantes symétriques, on a vu que pour déterminer le courant de court-circuit pour n'importe quel type de défaut, il suffit seulement de tracer les schémas équivalents des trois composantes symétriques (directe, inverse et homopolaire) et en tenant compte des conditions du court-circuit au point de défaut.

Le choix de la méthode de calcul des courts-circuits dépend de la taille et de la complexité du réseau et des informations sur les données nécessaires pour l'analyse juste avant le défaut, ainsi la méthode de transformation et simplification du schéma du réseau est utilisée pour les réseaux de faible taille, par contre pour les réseaux de grande taille on fait recours aux programmes de calcul numérique en se basant sur la méthode des tensions noeudales (appelée aussi méthode des impédances).

Pour assurer une continuité de fourniture de l'énergie électrique on doit protéger notre système électrique contre tout défaut peut influencer le régime de fonctionnement pour cela on installe des organes de protection, le choix de ces derniers dépend de la durée et l'amplitude du défaut, qui sont généralement les courts-circuits.

Pour chaque type de court-circuit il y a des conditions limites à partir de ses conditions on calcule le courant de court-circuit. Donc les appareils de protection sont choisis d'après les valeurs des courants de court-circuit calculés.

## Bibliographie

### Ouvrages :

- [1] DAS J. C., "Power System Analysis, Short circuit Load Flow and Harmonics", CRC Press - 2<sup>ème</sup> édition, 2012.
- [2] MARTINEZ-VELASCO Juan A., "Power System Transients, Parameter Determination", CRC Press, 2010.
- [3] SAADAT Hadi, "Power System Analysis" McGraw-Hill College, 1998.
- [4] NAGSARKAR T. K., "Power System Analysis" Oxford University Press - 2<sup>ème</sup> édition, 2014.
- [5] BOUNAYA Kamel, "Les Réseaux Electriques, Court-Circuit Triphasé, Analyse et Procédure de Calcul", D.P.U. Guelma, 2015.

### Mémoires et thèses :

- [6] DRIDI Khaira, SEBTI Houssam, BENLASSOUED Ayoub, " Méthodes de calcul des courants de court-circuit dans les réseaux électriques", Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945-Guelma, Juin 2015.