

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université A. Mira - Bejaia
Faculté de technologie
Département Génie électrique
Spécialité Electrotechnique



Mémoire de Fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Électrotechnique

Option : *Réseaux électriques*

Thème

**SIMULATION DE LA COUPURE D'UN
COURANT DE COURT-CIRCUIT EN
HAUTE TENSION**

Réalisé par :

M^r : AMROUN Kouçayla

M^r : ABDOUNE Rachid

Encadré par :

M^{me} : ZIDANE.F

2018/2019

Remerciements

Ce jour marque la fin d'une longue période d'étude à l'université de Bejaia.

Au terme de notre formation en générale et notre projet de fin d'étude.

En particulier, nous tenons à remercier, le Dieu miséricordieux qui nous a donné la force d'achever ce modeste travail.

Un grand merci à nos familles qui nous ont toujours encouragés et soutenus durant toutes nos études

Un grand merci à notre promotrice : M^{me} ZIDANE. F, de nous avoir encadrée tout au long de la préparation de ce mémoire.

Nos sincères remerciements vont également à tous les enseignants du génie électrique De l'université de Bejaia.

Nos gratitudes à tous les membres du jury qui font l'honneur de juger notre Travail.

Un grand merci à toutes personnes ayant contribués à l'élaboration de ce Mémoire, De près ou de loin.

A. Kouçayla & A. Rachid

DÉDICACES

*Je dédie d'abord ce travail à mes très
chers parents*

*A mes chers frères et chères sœurs chacun
à son nom*

A toute ma famille

*Sans oublier mon collègue Kouçayla et
tous mes copains*

de chambre

A la famille ABDOUNE

Et à tous mes amis.

ABDOUNE RACHID

DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

✚ *Mes parents qui m'ont soutenu et encouragé durant toute ma vie.*

✚ *Mes frères : Massinissa, Chafik, Karim et mes sœurs Dalila et Nyssa et à toute la famille AMROUN.*

✚ *A Mon binôme : Rachid.*

✚ *Mes amis sans exception.*

✚ *Toute la promotion 2018.*

AMROUN KOUÇAYLA

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : RÉGIMES TRANSITOIRES DANS LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

Fig.I.1: Une source de tension sinusoïdale est connectée à un circuit RL en série	03
Fig.I.2 : Une source DC commutée sur un circuit LC en série.....	06
Fig.I.3 Tension aux bornes du condensateur pour trois valeurs initiales différentes de la tension du condensateur. La source de tension a la valeur $E=100(V)$	08
Fig.I.4 : Une source de tension sinusoïdale est activée sur un circuit RLC en série	09
Fig.I.5 : régime oscillatoire amorti, critique et fortement amorti d'un circuit (R, L, C) série, après fermeture de l'interrupteur a la tension d'alimentation maximale, $t = 0$, $\varphi = +\pi/2$	11
Fig.I.6 : Court-circuit triphasé isolé.....	12
Fig.I.7 : Court-circuit triphasé terre	12
Fig.I.8 : Court-circuit biphasé terre	13
Fig.I.9 : Court-circuit biphasé isolé	13
Fig.I.10 : Court-circuit monophasé	13
Fig.I.11 : Séquence directe	15
Fig.I.12 : Séquence inverse	16
Fig.I.13 : Séquence homopolaire	16
Fig.I.14 : Court-circuit phase terre	17
Fig.I.15 : Représentation en composantes symétriques lors d'un défaut phase terre	19
Fig.I.16 : Court-circuit biphasé terre	20
Fig.I.17 : Représentation complexe du défaut biphasé terre	21
Fig.I.18: Court-circuit triphasé	22
Fig.I.19 : Représentation en composantes symétriques lors d'un défaut triphasé	23

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE II: LES PHÉNOMÈNES DE COUPURE

Fig.II.1: circuit inductif en courant continu	24
Fig.II.2 : Variation des paramètres I_r en fonction de temps	26
Fig.II.3 : Circuit R L en courant alternatif	27
Fig.II.4 : Importance de l'instant de coupure dans l'interruption d'un circuit alimenté en courant continu	27
Fig. II.5: Coupure réalisée par un interrupteur idéal.	28
Fig.II.6: Processus de coupure avec un arc électrique	31
Fig.II.7 : Constante de temps de désionisation en fonction de la pression de quelques gaz ...	35
Fig.II.8 : Influence de la puissance de refroidissement P_0 sur la pointe d'extinction, pour une constante de temps d'arc invariable	36
Fig.II.9 : la tension transitoire de rétablissement	37
Fig.II.10 : courant post-arc dans un disjoncteur SF6 HT	37
Fig.II.11 : Les phénomènes transitoires sont très faibles lors de la coupure d'un courant d'une charge résistive	38
Fig.II.12 : Circuit alimentant un transformateur à vide de faible courant inductif	39
Fig.II.13 : phénomène d'arrachement de courant lors de la coupure d'un faible courant inductif	40
Fig.II.14 : Coupure d'un circuit capacitif.....	41

CHAPITRE III : LES MILIEUX DE COUPURE

Fig.III.1: Évolution des techniques de coupure	43
Fig.III.2: allongement d'un arc électrique entre les plaques réfractaires en céramique d'une chambre de coupure d'un disjoncteur à coupure dans l'air	44
Fig.III.3: Domaine d'utilisation des différents milieux de coupure	45

LISTE DES FIGURES

Fig.III.4 : interrupteurs à couteaux montés sur socle de marbre	46
Fig.III.5 : Bulles de gaz à l'origine d'un défaut phase masse lors d'une coupure dans un disjoncteur à grand volume d'huile	47
Fig.III.6 : Disjoncteurs à grand volume d'huile	48
Fig.III.7 : Disjoncteurs à faible volume d'huile 72 kV	49
Fig.III.8 : Ampoule sous vide d'un disjoncteur à vide	51
Fig.III.9 : La molécule de SF ₆	53
Fig.III.10 : Evolutions de la tension de claquage du SF ₆ en fonction de la distance entre les contacts et en fonction de la de la pression	53
Fig.III.11 : Conductivité thermique du SF ₆ et de l'azote	54
Fig.III.12 : Disjoncteur à cuve sous tension pour un pouvoir de coupure de 40 kA sous 170KV	55

CHAPITRE IV: SIMULATION DE LA COUPURE D'UN COURANT DE DÉFAUT PROCHE EN LIGNE - UTILISATION DU MODÈLE DE SCHWARZ -

Fig. IV.1 : situation typique du défaut kilométrique	58
Fig. IV.2 : L'effet de la longueur de la ligne sur le courant et sur la TTR	58
Fig. IV.3 : une version simplifiée du circuit d'essai utilisé par KEMA	59
Fig. VI.4 : circuit côté source	59
Fig. IV.5 : circuit côté charge	60
Fig. IV.6 : Système d'équation de modèle Schwarz	62
Fig. IV.7 : Le bloc subsystem du modèle	62
Fig. IV.8 : Le bloc du modèle de Schwarz	63
Fig. IV.9 : Subsystem de modèle de Schwarz	63

LISTE DES FIGURES

Fig. IV.10: Modèle de Schwarz intégré dans le circuit test	64
Fig. IV.11: Boite de dialogue du modèle Schwarz	65
Fig. IV.12: Tension simulée par le modèle de Schwarz	66
Fig. IV.13 : Courant simulée par le modèle de Schwarz	66
Fig. IV.14: Courant post arc	67
Fig. VI.15 : Tension transitoire de rétablissement (TTR)	67

ANNEXES

Fig.1 : force électrodynamique lors d'un court -circuit biphasé.....	70
--	----

GLOSSAIRE

TABLE DES ABREVIATIONS ET DES SYMBOLES

CHAPITRE I : RÉGIMES TRANSITOIRES DANS LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

Fig.: figure.

V_d : tension directe. [V]

V_i : tension inverse. [V]

V_o : tension homopolaire. [V]

I_d : courant directe. [A]

I_i : courant inverse. [A]

I_o : courant homopolaire. [A]

Z_d : impédance directe. [Ω]

Z_i : impédance inverse. [Ω]

Z_o : impédance homopolaire. [Ω]

a : Opérateur de rotation d'un angle de 120°

V1, V2, V3 : les tensions de phases réelles. [V]

I1 I2 I3 : des courants réels. [A]

E : source de tension équivalente de toutes les sources.

I_{terre} : courant de terre. [A]

I_{cc} : courant de court-circuit (défaut). [A]

Z : impédance de défaut. [Ω]

CHAPITRE II: LES PHÉNOMÈNES DE COUPURE

τ : la constante de temps de désionisation. [s]

u: la tension d'arc. [V]

P₀: la puissance de refroidissement. [W]

T: la durée de la coupure. [s]

r: la résistance de l'interrupteur (résistance variable). [Ω]

E: la tension de la source. [V]

R: la résistance de circuit. [Ω]

GLOSSAIRE

L: l'inductance de circuit. [H]

i : le courant électrique. [A]

\hat{E} : la tension max du générateur. [V]

Z: l'impédance du circuit. [Ω]

R: Réactance du circuit. [Ω]

L: L'inductance du circuit. [H]

w: la pulsation. [rd/s]

cos φ : Facteur de puissance.

f: fréquence de réseau. [Hz]

W: puissance dissipée dans l'appareil. [W]

t₀: l'instant d'initiation de l'arc. [s]

t_{arc}: l'instant de la coupure. [s]

SF₆: hexafluorure de soufre (six atomes de fluor et un atome de soufre).

TTR : tension transitoire de rétablissement. [V]

CEI 60056 : norme commission international en électrotechnique.

HT : haute tension.

CHAPITRE IV: SIMULATION DE LA COUPURE D'UN COURANT DE DÉFAUT PROCHE EN LIGNE - UTILISATION DU MODÈLE DE SCHWÁRZ -

D_j: disjoncteur

g: la conductance de l'arc. [S]

u : la tension de l'arc. [V]

i : le courant de l'arc. [A]

τ : la constante de temps de désionisation.

P : la puissance de refroidissement ou la puissance évacuée de l'arc. [W].

w₀: Coefficient constant qui représente la quantité d'énergie.

K: exprime la valeur absolue de la conductance.

w: l'énergie de l'arc.

P : la pression de remplissage du disjoncteur. [bar]

τ_0 : la constante de temps de l'arc. [s]

α : le paramètre qui influe sur **τ** en fonction de **g**.

β : le paramètre qui influe sur **P** en fonction de **g**.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale.....	01
----------------------------	----

CHAPITRE I : RÉGIMES TRANSITOIRES DANS LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

I.1 Introduction.....	03
I.2 Fermeture d'un circuit (R, L).....	03
I.3 Fermeture d'un circuit (L, C).....	05
I.4 Fermeture d'un circuit RLC.....	09
I.5 Les défauts de court-circuit.....	11
I.5.1 Les courts-circuits triphasés	12
I.5.1.1 Court-circuit triphasé isolé.....	12
I.5.1.2 Court-circuit triphasé terre	12
I.5.2 Les Courts-circuits biphasés	13
I.5.2.1 Court-circuit biphasé terre	13
I.5.2.2 Court-circuit biphasé isolé	13
I.5.3 Court-circuit monophasé	13
I.6 Caractéristiques des courants de court-circuit.	14
I.6.1 Les conséquences des courants de court-circuit	14
I.6.1.1 Au point de défaut.....	14
I.6.1.2 Pour les autres circuits électriques du réseau.....	15
I.7 Calcul des courants de court-circuit par les composantes symétriques.	15
I.7.1 Composantes symétriques.....	15
I.7.1.1 Système direct	15
I.7.1.2 Système inverse	16
I.7.1.3 Système homopolaire.....	16
I.7.2 Calcul des courants de court-circuit.....	17
I.7.2.1 Défaut phase-terre	17

SOMMAIRE

I.7.2.2 Défaut biphasé terre.	19
I.7.2.3 Défaut triphasé à la terre.	22
Conclusion.....	23

CHAPITRE II: LES PHÉNOMÈNES DE COUPURE

II.1 Introduction.	24
II.2 Nature du courant électrique.	24
II.3 Interruption d'un courant continu.	24
II.4 Interruption d'un courant alternatif... ..	26
II.4.1 Principe de la coupure avec un interrupteur idéal	28
II.4.2 Coupure avec l'arc électrique.	29
II.4.2.1 Processus de coupure avec un arc électrique.....	30
II.5 Modélisation du comportement dynamique de l'arc.	32
II.5.1 Hypothèses d'Otto Mayr.	32
II.5.1.1 Première hypothèse.....	32
II.5.1.2 Deuxième hypothèse.....	33
II.5.1.3 Troisième hypothèse.	33
II.6 Paramètres importants durant le régime transitoire.	34
II.6.1 La constante de temps de désionisation.....	34
II.6.2 La pointe d'extinction.....	35
II.6.3 La puissance de refroidissement.....	36
II.6.4 La tension transitoire de rétablissement.	36
II.6.5 Le courant post-arc.	37
II.7 Quelques cas de coupures.....	38
II.7.1 Coupure des courants résistifs.	38
II.7.2 Coupure des faibles courants inductifs.....	39
II.7.3 La coupure des courants capacitifs.....	40
II.7.4 Coupure des courants de défaut.	42
II.7.5 Les défauts aux bornes aval du disjoncteur.	42

SOMMAIRE

II.7.6 Le défaut en ligne.....	42
Conclusion.....	42

CHAPITRE III : LES MILIEUX DE COUPURE

III.1 Introduction.....	43
III.2 Evolution des techniques de coupure.....	43
III.3 La coupure dans l'air.....	44
III.3.1 Mécanisme de la coupure dans l'air.....	44
III.3.2 Principales caractéristiques d'un dispositif de coupure dans l'air.....	45
III.4 La coupure dans l'air comprimé.....	45
III.5 La coupure dans l'huile.....	46
III.5.1 Principe de la coupure dans l'huile.....	46
III.5.2 Différentes technologies de coupure dans l'huile.....	47
III.5.2.1 Disjoncteurs à grand volume d'huile.....	47
III.5.2.2 Disjoncteurs à faible volume d'huile.....	48
III.5.3 Les domaines d'application de la coupure dans l'huile.....	49
III.6 La coupure dans le vide.....	49
III.6.1 propriétés diélectrique dans le vide.....	50
III.6.2 Le mécanisme de coupure dans le vide.....	50
III.6.3 La coupure du courant dans le vide.....	50
III.6.4 Principe de coupure des ampoules.....	51
III.6.5 Les domaines d'application de la coupure dans le vide.....	52
III.7 Coupure dans l'hexafluorure de soufre.....	52
III.7.1 La molécule de SF ₆	52
III.7.2 Propriétés diélectrique de SF ₆	53
III.7.3 Conductivité thermique du SF ₆	54
III.7.4 Constante de temps d'arc dans le SF ₆	54
III.7.5 Principe de fonctionnement du disjoncteur à gaz SF ₆	55

SOMMAIRE

III.7.6 Inconvénients de la technique de coupure dans le gaz SF6.	55
III.7.7 Les techniques de coupure de demain.....	56
Conclusion.....	56

CHAPITRE IV: SIMULATION DE LA COUPURE D'UN COURANT DE DÉFAUT PROCHE EN LIGNE - UTILISATION DU MODÈLE DE SCHWARZ -

IV.1 Introduction.....	57
IV.2 Essais d'un défaut proche en ligne.....	57
IV.3 Description du modèle de Schwarz.....	60
IV.4 Implantation du modèle de Schwarz dans le Simulink de MATLAB.	61
IV.5 Simulations numériques.....	64
IV.6 Les résultats de la simulation.....	66
Conclusion.....	68

CONCLUSION GÉNÉRAL

Conclusion générale.....	69
--------------------------	----

ANNEXES

1. Les efforts électrodynamiques.....	70
2. L'arc électrique.....	70
2.1. Le plasma.....	71

*Introduction
générale*

Introduction générale

L'industrialisation et la croissance de la population dans le monde a poussé tous les pays à suivre une politique de mise à niveau pour améliorer leur position mondiale, et pour y arriver, les premiers pas ont été fait dans le domaine de l'énergie et surtout celui de l'énergie électrique.

L'exploitation, la maintenance et la protection des réseaux électriques des installations de toutes natures qui existent aujourd'hui ont conduit les constructeurs à porter une attention toute particulière à la réalisation de matériels de coupure, qu'ils soient de haute ou basse tension.

Dans ce cadre la plupart des études et des recherches ont été basé sur le perfectionnement des moyens de protection contre les dangers et les problèmes survenant sur les réseaux électriques et surtout celui de court-circuit.

Les courts-circuits sont des incidents très fréquents sur les réseaux de haute tension, chaque année ces réseaux subissent un grand nombre de courts-circuits dus surtout aux orages, malgré la géométrie de la ligne aérienne et la présence des câbles de garde.

Les courts-circuits provoquent l'augmentation de température des conducteurs, mais aussi le développement de l'intensité du courant, cette croissance d'intensité peut causer des dégâts importants.

Cependant, lors de la coupure d'un courant alternatif d'une manière générale et d'un courant de court-circuit d'une manière particulière, des phénomènes électriques surviennent et décident de la réussite ou de l'échec de la coupure.

Dans ce travail on s'intéresse au processus de la coupure d'un courant alternatif et surtout au processus de la coupure d'un courant de court-circuit dans un réseau haute tension. Pour reproduire ce processus avec des simulations numériques, nous avons conçu « un disjoncteur » à base du modèle de Schwarz, dans le Simulink de MATLAB.

Ce travail est reparti sur quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à l'étude des régimes transitoires dans les réseaux électriques et en particulier le régime transitoire lors du rétablissement du courant dans le cas d'un circuit (R, L), (L, C) et (R, L, C) et au calcul des différents courants de court-circuit qui peuvent avoir lieu sur les réseaux électriques MT et HT on se basant sur la méthode des composantes symétriques.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le deuxième chapitre est réservé à la description du processus de coupure d'un courant alternatif et les phénomènes physiques qui ont lieu lors de la coupure des courants électriques particulièrement dans les réseaux MT et HT car ils jouent un rôle essentiel dans l'échec ou la réussite de la coupure, ainsi la dernière partie de ce chapitre est consacrée à l'analyse de la coupure de quelques types de courants présentant des contraintes.

Quand au troisième chapitre nous avons insisté sur les grandes techniques de coupure dans le domaine de la moyenne et haute tension et le choix de la solution la mieux adaptée à chaque utilisation.

Le dernier chapitre est consacré à la conception d'un « disjoncteur » à base du modèle de Schwarz et à la reproduction du processus de coupure d'un défaut proche en ligne, par simulation numérique en utilisant ce modèle.

*Chapitre I : Régimes
transitoires dans les réseaux
électriques*

I.1 Introduction

Les réseaux électriques sont constitués par l'ensemble des appareils (centrales, lignes, postes de transformation, conducteurs, isolateurs, pylônes, parafoudres, transformateurs, équipements de protection,...) destinés à produire, transporter, et distribuer l'électricité depuis les centrales de production jusqu'aux consommateurs.

Il est indispensable de pouvoir couper le courant en tout point du réseau pour des raisons d'exploitation et de maintenance ou pour protéger le réseau lorsqu'il y a un défaut. Il faut également pouvoir le rétablir dans diverses situations normales ou de défaut.

Dans ce chapitre on va étudier le régime transitoire lors du rétablissement du courant dans le cas d'un circuit (R, L), (L, C) et (R, L, C). Ces cas représentent des situations qu'on rencontre dans les réseaux électriques. Aussi on va étudier les différents courants de courts-circuits qui peuvent avoir lieu sur les réseaux électriques MT et HT.

I.2 Fermeture d'un circuit (R, L)

La figure (I.1) représente la fermeture d'un circuit RL alimenté par une tension sinusoïdale. C'est la représentation la plus simple d'un disjoncteur haute tension fermant une ligne court-circuitée. L'application de la loi de Kirchhoff donne l'équation différentielle non homogène du circuit : [01]

$$E_{max} \sin(\omega t + \varphi) = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (\text{I.1})$$

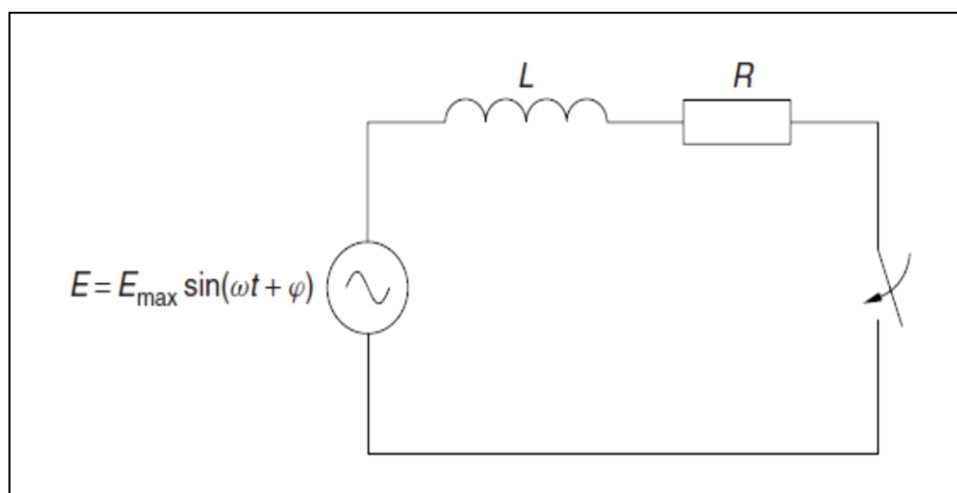


Fig. (I.1) : Une source de tension sinusoïdale est connectée à un circuit RL en série [01].

L'interrupteur peut fermer le circuit à tout moment et l'angle de phase peut avoir une valeur comprise entre 0 et 2π (rad). Pour trouver la solution générale de l'équation différentielle, nous devons résoudre l'équation caractéristique de l'équation différentielle homogène :

$$Ri + L \frac{di}{dt} = 0 \quad (\text{I.2})$$

$\lambda = (L / R)$ est la constante du temps du circuit. La solution générale de l'équation (I.2) est une fonction exponentielle de la forme :

$$i_h(t) = C_1 e^{-(R/L)t} \quad (\text{I.3})$$

La constante C_1 est déterminée à partir des conditions initiales.

La solution particulière de l'équation (I.1) est le courant au régime permanent :

$$i_p(t) = A \sin(\omega t + \varphi) + B \cos(\omega t + \varphi) \quad (\text{I.4})$$

A et B peut être déterminé :

$$\begin{cases} A = \frac{RE_{max}}{R^2 + \omega^2 L^2} \\ B = \frac{\omega LE_{max}}{R^2 + \omega^2 L^2} \end{cases} \quad (\text{I.5})$$

Cela se traduit par la solution particulière pour le courant :

$$i_p(t) = \frac{E_{max}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin \left[\omega t + \varphi - \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right) \right] \quad (\text{I.6})$$

Posons

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right)$$

$$I_{max} = \frac{E_{max}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

La solution complète est la somme des solutions générale et de la particulière :

$$i(t) = i_h(t) + i_p(t)$$

$$i(t) = C_1 e^{-(R/L)t} + I_{max} \sin[\omega t + \varphi - \phi] \quad (\text{I.7})$$

Avant la fermeture de l'interrupteur (Fig. (I.1)), le flux magnétique dans l'inductance L est égal à zéro ; cela reste tel immédiatement après le moment de la fermeture, en raison de la loi de la conservation des flux. Par conséquent, à $t = 0$, à l'instant de fermeture, nous pouvons écrire : **[01]**

$$C_1 + I_{max} \sin[\varphi - \phi] = 0 \quad (I.8)$$

On peut déduire la valeur de C_1 ;

$$C_1 = -I_{max} \sin[\varphi - \phi] \quad (I.9)$$

Par conséquent, l'expression complète du courant devient :

$$i(t) = I_{max} \sin[wt + \varphi - \phi] - e^{-(R/L)t} \{I_{max} \sin[\varphi - \phi]\} \quad (I.10)$$

$$i(t) = I_{max} \left[\sin[wt + \varphi - \phi] - e^{-\frac{t}{\lambda}} \{ \sin[\varphi - \phi] \} \right]$$

Le courant est la somme de deux composantes :

- la composante alternative : $I_{max} [\sin[wt + \varphi - \phi]]$
- la composante continue : $I_{max} e^{-\frac{t}{\lambda}} \{ \sin[\varphi - \phi] \}$

I.3 Fermeture d'un circuit (L, C)

Le circuit de la figure (I.2) est la représentation la plus simple de l'établissement du courant dans le cas d'une batterie de condensateur ou d'un câble du réseau.

Dans ce circuit, il existe deux composants de stockage d'énergie l'inductance et la capacité, la première stocke l'énergie magnétique et la deuxième stocke l'énergie électrique.

En fermant l'interrupteur, une oscillation peut se produire dans le réseau dû au fait qu'un échange entre les deux dispositifs de stockage d'énergie avec une certaine fréquence **[01]**.

- Cas d'une source de tension continue

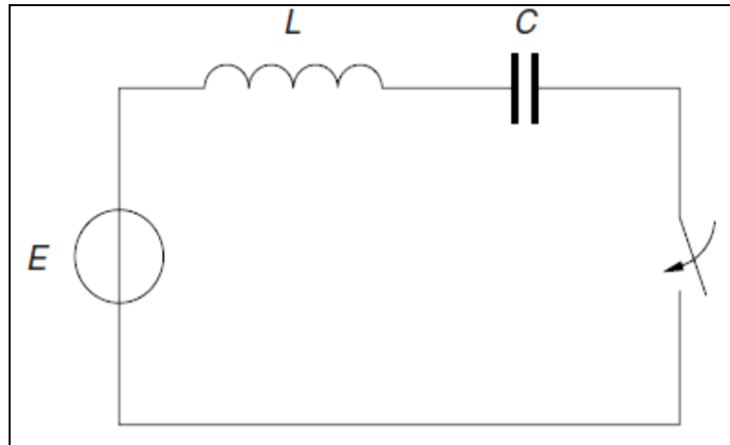


Fig. I.2 : Une source DC commutée sur un circuit LC en série

L'application de la loi de Kirchhoff donne :

$$E = L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt \quad (\text{I.11})$$

Pour résoudre cette équation différentielle, on peut la transformer dans domaine de Laplace, et on obtient :

$$\frac{E}{p} = pLi(p) - Li(0) + \frac{i(p)}{pC} + \frac{V_c(0)}{p} \quad (\text{I.12})$$

p est la variable complexe de Laplace.

On multiplie par p et on divise par L les deux membres de l'équation (I.12)

$$\frac{E}{L} = p^2 i(p) - pi(0) + \frac{i(p)}{LC} + \frac{V_c(0)}{L} \quad (\text{I.13})$$

L'équation (I.13) peut être écrite :

$$i(p) \left(p^2 + \frac{1}{LC} \right) = \frac{E - V_c(0)}{L} + pi(0) \quad (\text{I.14})$$

Lorsqu'on cherche les conditions initiales, il est clair que $i(0) = 0$, mais dans le cas du condensateur, la situation n'est pas si facile car il peut avoir une tension initiale.

- Supposons qu'il n'y a pas de charge sur le condensateur et donc $V_c(0) = 0$ avec $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$.

De l'équation (I.14) on écrit :

$$i(p)(p^2 + \omega_0^2) = \frac{E}{L} \quad (\text{I.15})$$

$$i(p) = \frac{EC}{LC} \frac{1}{(p^2 + \omega_0^2)} = \frac{EC}{LC} \sqrt{\frac{1}{LC}} \sqrt{\frac{1}{LC}} \frac{1}{(p^2 + \omega_0^2)} = E \sqrt{\frac{C^2}{LC}} \frac{\omega_0}{(p^2 + \omega_0^2)}$$

$$i(p) = E \sqrt{\frac{C}{L}} \frac{\omega_0}{p^2 + \omega_0^2} \quad (\text{I.16})$$

La transformation du domaine de Laplace au domaine temporel donne la solution de l'équation (I.11) comme suit :

$$i(t) = E \sqrt{\frac{C}{L}} \sin(\omega_0 t) \quad (\text{I.17})$$

Dans l'équation (I.17), on peut déduire deux propriétés importantes du circuit LC série:

- Après la fermeture du disjoncteur, à l'instant $t = 0$, un courant oscillant commence à circuler avec une fréquence naturelle : $\omega_0 = \sqrt{LC}$
- L'impédance caractéristique, $Z_0 = (L / C)^{1/2}$, ainsi que la valeur de la tension de la source E , détermine la valeur de crête du courant oscillant.
- Lorsqu'il y a une charge présente sur le condensateur, le courant dans le domaine de Laplace devient :

$$i(p) = [E - V_c(0)] \sqrt{\frac{C}{L}} \frac{\omega_0}{p^2 + \omega_0^2} \quad (\text{I.18})$$

La tension de condensateur dans le domaine de Laplace (équations (I.11) et (I.18)) :

$$V_c(p) = \frac{E}{p} - pLi(p) = \frac{E}{p} - [E - V_c(0)] \frac{p}{p^2 + \omega_0^2} \quad (\text{I.19})$$

Et après la transformation dans le domaine temporel :

$$V_c(t) = E - [E - V_c(0)] \cos(\omega_0 t) \quad (\text{I.20})$$

Comme exemple, La figure (I.3) montre les ondes de tensions pour trois valeurs initiales de la tension aux bornes du condensateur avec $E=100V$, on peut observer que :

- Pour $V_C(0) = 0$ (l'équation (I.20) donne :

$$V_C(t) = 100 - 100\cos(\omega_0 t)$$

L'onde de tension a la forme d'une (1- cosinusoïde) et peut atteindre le pic de la source de tension E

- Pour $V_C(0) = 100$ l'équation (I.20) donne :

$$V_C(t) = 100$$

- Pour $V_C(0) = -100$ l'équation (I.20) donne :

$$V_C(t) = 100 - [200]\cos(\omega_0 t)$$

Pour une charge négative, $V_C(0) = -100$ par exemple, le pic de tension dépasse le pic de la source de tension E , car la charge électrique ne peut pas changer instantanément après la fermeture du disjoncteur. En plus, quand l'impédance caractéristique du circuit a une valeur faible (par exemple, dans le cas d'une batterie de condensateur (une grande C et une faible L), le pic du courant après la fermeture peut atteindre une valeur élevée) [01].

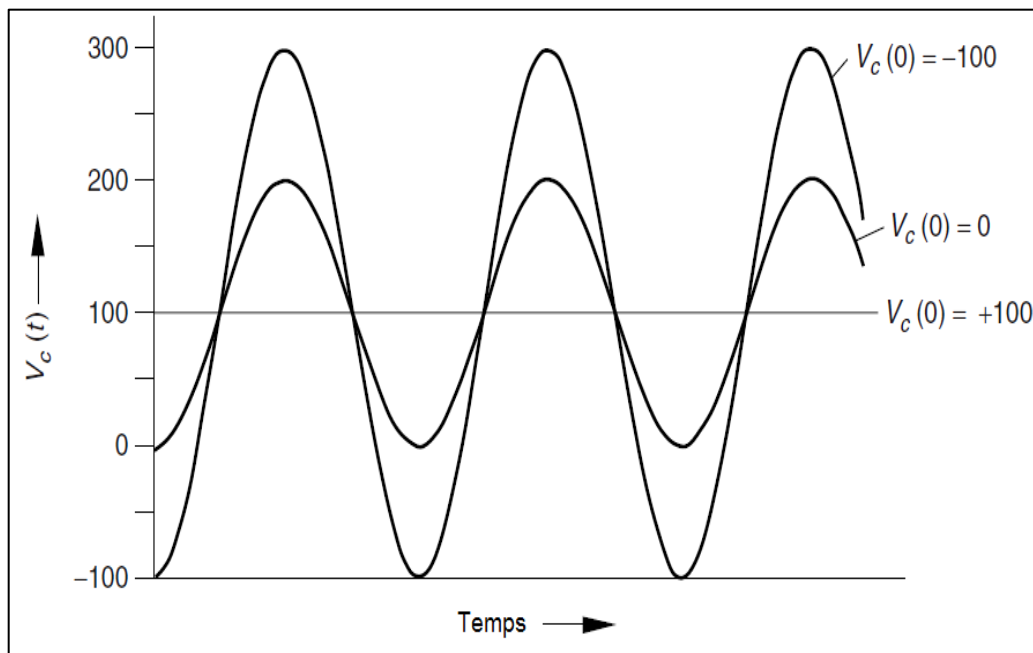


Fig. I.3: Tension aux bornes du condensateur pour trois valeurs initiales différentes de la tension du condensateur. La source de tension a la valeur $E=100(V)$.

I.4 Fermeture d'un circuit RLC

En pratique, il y a toujours un amortissement dans le circuit L, C en série et cela peut être représenté en ajoutant une résistance R en série (Fig. I.4). On considère le cas où le circuit est alimenté en tension alternative. Quand le circuit est fermé à $t=0$, la loi de Kirchhoff donne : **[01]**

$$E_{max} \sin(\omega t + \varphi) = L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt \quad (I.21)$$

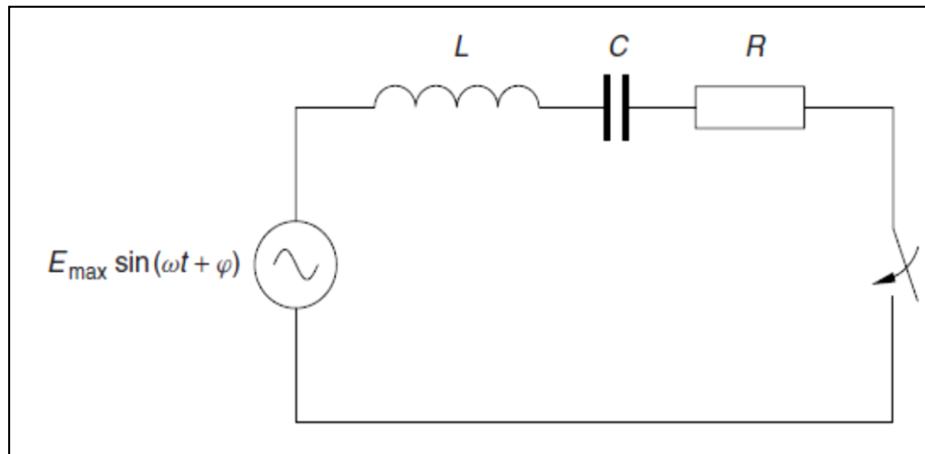


Fig. I.4 : Une source de tension sinusoïdale est activée sur un circuit RLC en série.

Pour trouver les réponses transitoires du réseau, nous devons résoudre l'équation différentielle homogène :

$$0 = \frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} i \quad (I.22)$$

La solution générale de l'équation différentielle homogène est :

$$i_h(t) = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} \quad (I.23)$$

Où λ_1 et λ_2 sont les racines de l'équation caractéristique :

$$0 = \lambda^2 + \frac{R}{L} \lambda + \frac{1}{LC} = \lambda^2 + 2 \left(\frac{R}{2L} \right) \lambda + \frac{1}{LC}$$

$$\Delta = \left(\frac{R}{2L} \right)^2 - \frac{1}{LC} \quad (I.24)$$

$$\lambda_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L} \right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (I.25)$$

Les valeurs de l'inductance, de la capacité et de la résistance sont bien positives parce qu'ils sont des composants physiques. La valeur absolue de l'expression $[(R/2L)^2 - (1/LC)]^{1/2}$ est plus petite que $R/2L$.

- Quand $[(R / 2L)^2 - (1 / LC)]$ est positive, les racines λ_1 et λ_2 sont négatives
- Quand $[(R / 2L)^2 - (1 / LC)]$ est négative, les racines λ_1 et λ_2 sont complexes mais la partie réelle est négative, Cela montre que dans la solution générale :

$$i_h(t) = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} \quad (I.26)$$

Les fonctions exponentielles deviendront nulles pour les grandes valeurs de t , et c'est seulement la solution particulière qui restera, elle peut être écrite comme :

$$i_p(t) = A \sin(\omega t + \varphi) + B \cos(\omega t + \varphi) \quad (I.27)$$

Dans cette solution particulière, les constantes A et B doivent être déterminées. L'équation (I.27) est substituée à l'équation (I.21), ce qui nous donne pour la solution particulière :

$$i_p(t) = \frac{E_{max}}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}} \sin \left[\omega t + \varphi + \tan^{-1} \left(\frac{\frac{1}{\omega C} - \omega L}{R} \right) \right] \quad (I.28)$$

La solution complète, c'est la somme de la solution générale et de la solution particulière :

$$i(t) = i_h(t) + i_p(t)$$

$$i(t) = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} + \frac{E_{max}}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}} \sin \left[\omega t + \varphi + \tan^{-1} \left(\frac{\frac{1}{\omega C} - \omega L}{R} \right) \right] \quad (I.29)$$

Trois situations différentes peuvent être distinguées (selon le signe de Δ de l'équation (I.24) et pour ces trois cas la solution particulière est la même mais la solution homogène est différentes **[01]**.

1. $\Delta > 0$: donc $(R / 2L)^2 > 1 / LC$, l'oscillation transitoire est fortement amortie et les racines de l'équation caractéristique (I.24) sont à la fois réelles et négatives.

2. $\Delta=0$: donc $(R / 2L)^2 = 1 / LC$, les racines de l'équation caractéristique sont égales et réelles et l'oscillation transitoire est critique. L'expression du courant oscillatoire critique est :

$$i(t) = e^{\alpha t} (C_1 + C_2) + \frac{E_{max}}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}} \sin \left[\omega t + \varphi + \tan^{-1} \left(\frac{\frac{1}{\omega C} - \omega L}{R} \right) \right] \quad (I.30)$$

Avec : $\alpha = -(R/2L)$.

3. $\Delta < 0$: donc $(R / 2L)^2 < 1 / LC$, les racines λ_1 et λ_2 dans la solution générale (équation (I.26)) sont complexes. $\lambda_1 = \alpha + j\beta$ et $\lambda_2 = \alpha - j\beta$ avec $\alpha = -(R / 2L)$ et $\beta = [(1 / LC) - (R / 2L)^2]^{1/2}$

La figure (I.5) représente les trois cas :

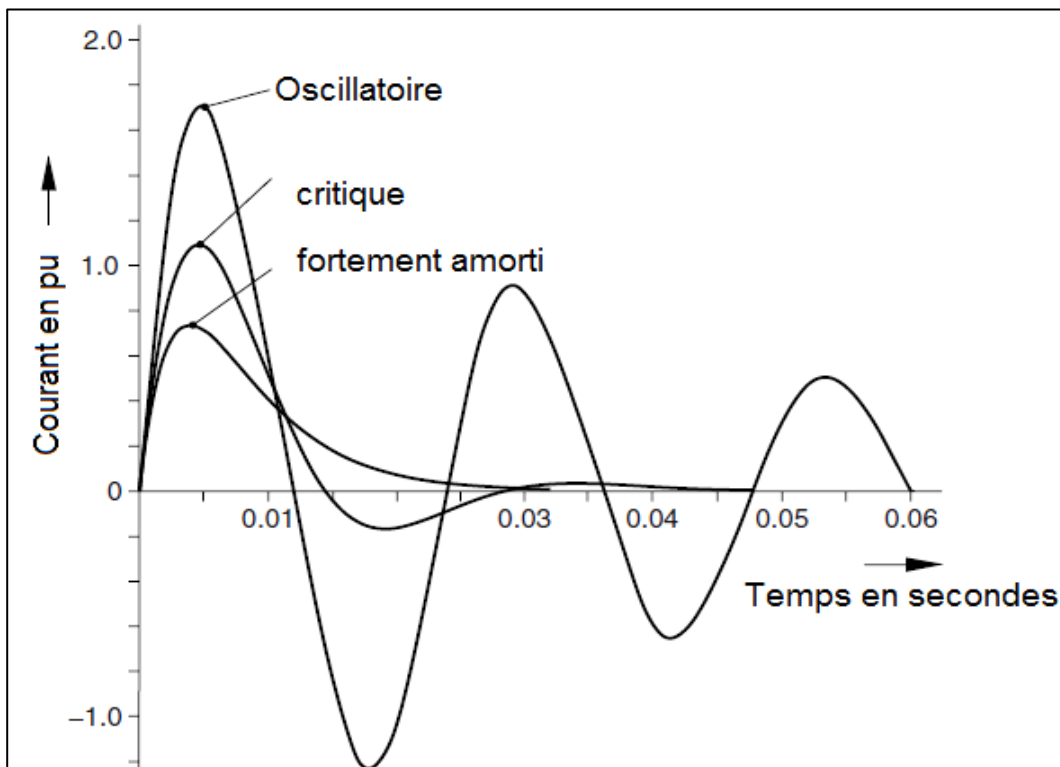


Fig. I.5 : régime oscillatoire amorti, critique et fortement amorti d'un circuit (R, L, C) série, après fermeture de l'interrupteur à la tension d'alimentation maximale, $t = 0$, $\varphi = +\pi/2$

I.5 Les défauts de court-circuit

Les défauts électriques les plus fréquents sur les réseaux électriques sont les défauts de court-circuit. Un court-circuit est une liaison accidentelle de deux points de potentiels différents.

Les courants de court-circuit sont caractérisés par de fortes intensités pouvant provoquer des dommages importants sur les équipements électriques [02].

On distingue trois types de court-circuit sur le réseau électriques :

- Le court-circuit phase-terre ou monophasé, c'est le défaut le plus fréquent (80 % des cas) ;
- Le court-circuit biphasé, il représente 15 % des cas.
- Le court-circuit triphasé, il représente 5 % des cas.

I.5.1 Les courts-circuits triphasés

Le court-circuit triphasé correspond à la liaison des trois phases, c'est le court-circuit le plus sévère. On distingue deux types de court-circuit triphasé :

I.5.1.1 Court-circuit triphasé isolé

Il correspond à la liaison des trois phases, comme le montre la fig. (I.6).

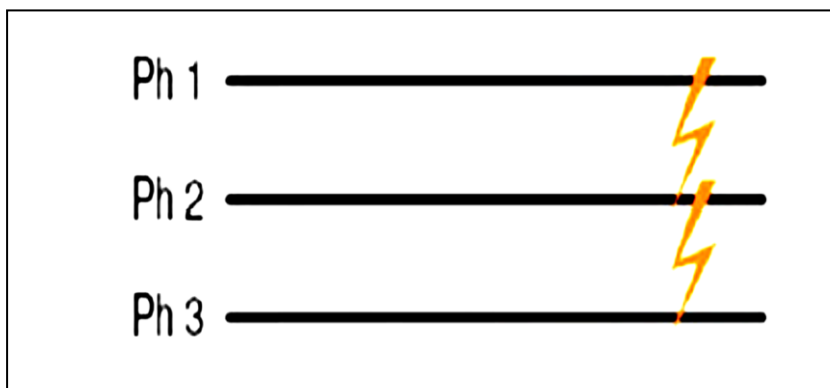


Fig. I.6: Court-circuit triphasé isolé

I.5.1.2 Court-circuit triphasé terre

Il correspond à la liaison des trois phases et la terre comme le montre la fig. (I.7)

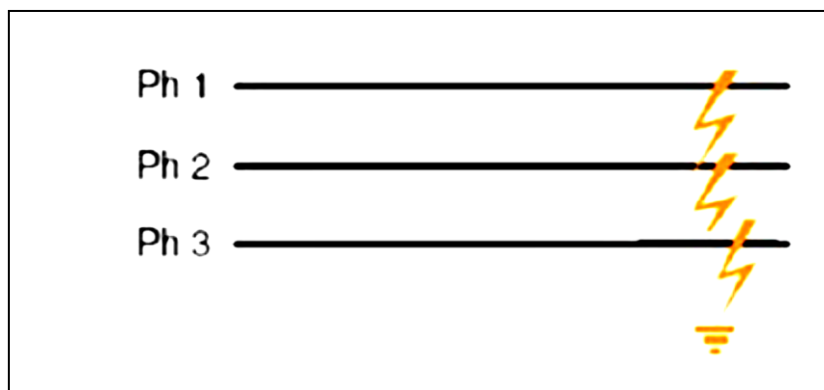


Fig. I.7: Court-circuit triphasé terre

I.5.2 Les Courts-circuits biphasés

Les courts-circuits biphasés sont deux types :

I.5.2.1 Court-circuit biphasé terre

C'est la liaison de deux phases à la terre comme le montre la fig. I.8).

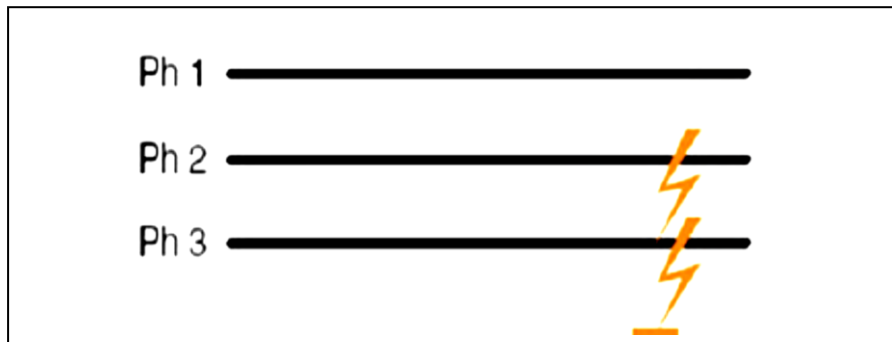


Fig. I.8 : Court-circuit biphasé terre

I.5.2.2 Court-circuit biphasé isolé

Il correspond à la liaison de deux phases, comme le montre la fig. (I.9).

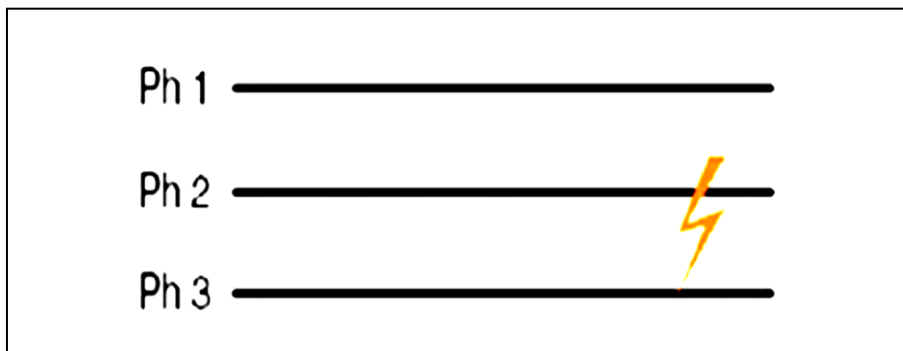


Fig. I.9 : Court-circuit biphasé isolé

I.5.3 Court-circuit monophasé

Il correspond à la liaison d'une phase avec la terre comme le montre la fig. (I.10).

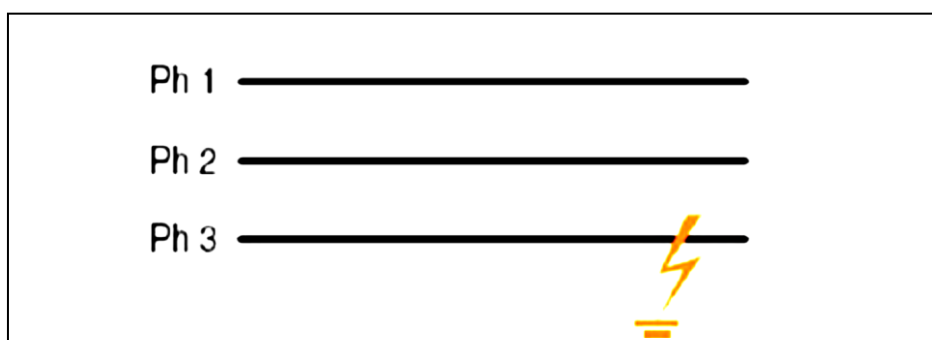


Fig. I.10: Court-circuit monophasé

I.6 Caractéristiques des courants de court-circuit

Les courts-circuits sont caractérisés par :

- **Leur durée**

- auto-extincteur : le défaut disparaît de lui-même en un temps très court, sans provoquer le déclenchement des organes de protection (fusible ou disjoncteur) ;
- fugitif : le défaut ne disparaît qu'après une ou plusieurs coupures brèves et ne reparait pas lors de la remise en service ;
- permanent : le défaut provoque un déclenchement définitif et nécessite l'intervention du personnel pour la reprise du service.

- **Leur origine**

- Mécaniques (rupture de conducteurs, liaison électrique accidentelle entre deux conducteurs par un corps étranger conducteur tel que outils ou animaux) ;
- surtensions électriques d'origine interne (surtensions de manœuvres) ou atmosphériques (foudre) ;
- Problème de dégradation des isolants.

- **Leur localisation**

Interne ou externe à une machine ou à un tableau électrique, sur une ligne aérienne ou souterraine.

I.6.1 Les conséquences des courants de court-circuit

Les conséquences des défauts de court-circuit sont variables selon leurs types et leurs durées, leurs intensités et le point concerné du réseau. Dans ce qui suit on va citer les problèmes qui surgissent au point de défaut et sur les autres circuits électriques du réseau à cause des courants de court-circuit [03].

I.6.1.1 Au point de défaut

Il peut y avoir plusieurs conséquences suite à un court-circuit, comme :

- un arc électrique de forte énergie, dont les effets destructeurs sont très importants, et qui peut se propager très rapidement ;
- la détérioration des isolants ;
- échauffement important pouvant entraîner la fusion des parties actives ;
- fusion des conducteurs ;
- incendie et danger pour les personnes ;
- les efforts électrodynamiques, avec :

- déformation des jeux de barres,
- arrachement des câbles ;

I.6.1.2 Pour les autres circuits électriques du réseau

Pour les autres circuits électriques du réseau concerné ou de réseaux situés à proximité, le court-circuit perturbe l'environnement du réseau autour du point de défaut par le creux de tension brutal qu'il entraîne ;

- la mise hors service d'une plus ou moins grande partie du réseau suivant son schéma et la sélectivité des protections ;
- les perturbations dans les circuits de contrôle commande ;
- l'instabilité dynamique et/ou la perte de synchronisme des machines.

I.7 Calcul des courants de court-circuit par les composantes symétriques

La méthode des composantes symétriques c'est un outil mathématique permettant de faire le calcul des courants de défauts asymétriques dans un réseau triphasé déséquilibré. Cette méthode repose sur l'équivalence entre un système triphasé déséquilibré, et la somme de trois systèmes triphasés équilibrés : direct, inverse et homopolaire [04].

I.7.1 Composantes symétriques

I.7.1.1 Système direct

Le système direct est un système triphasé équilibré de séquence directe (I_{1d} I_{2d} I_{3d}), chaque vecteur est déphasé de $2\pi/3$ en arrière du précédent comme le montre la fig. (I.11).

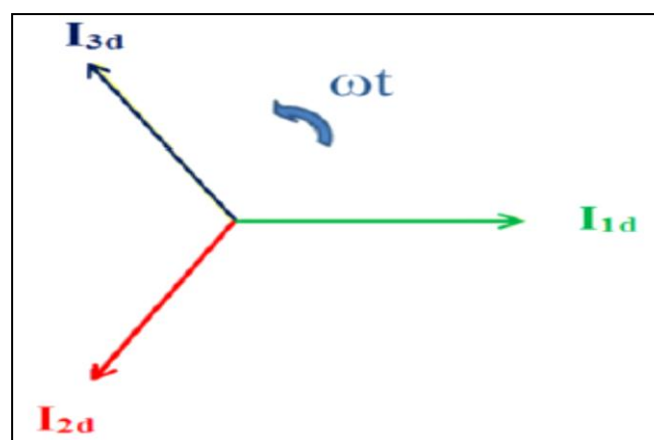


Fig. I.11 : Séquence directe

I.7.1.2 Système inverse

Le système inverse encore appelé par les anglo-saxons « séquence négative » est de séquence inverse (I_{1i} I_{3i} I_{2i}), chaque vecteur est déphasé de $2\pi/3$ en avant du précédent comme le montre la fig. (I.12).

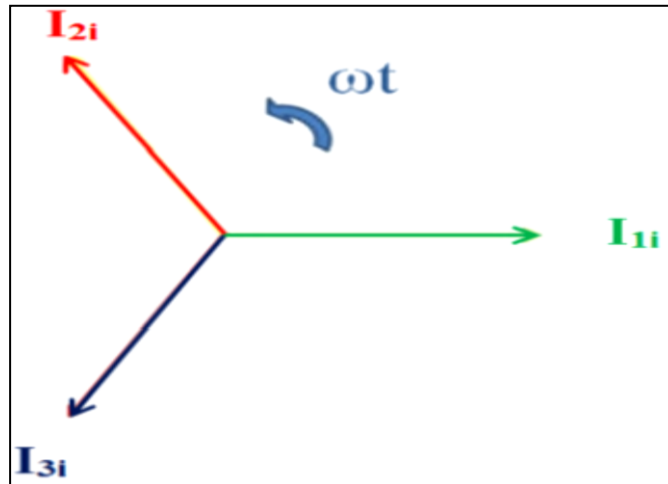


Fig. I.12 : Séquence inverse.

I.7.1.3 Système homopolaire

Le système homopolaire, encore appelé par les anglo-saxons « séquence nulle », dans lequel les trois vecteurs sont en phase et ont la même amplitude comme le montre la fig. (I.13).

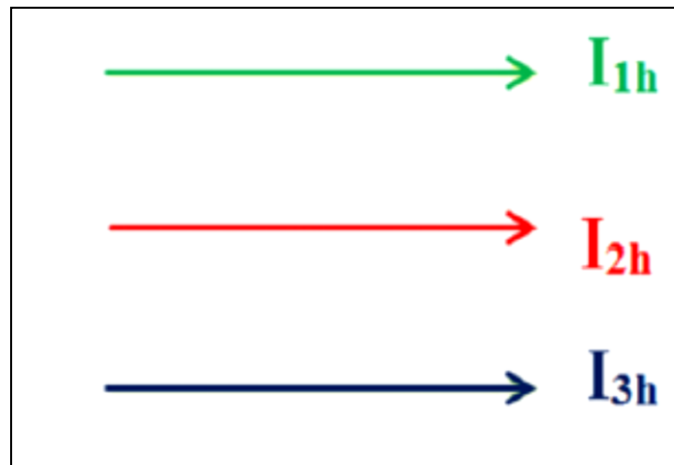


Fig. I.13 : Séquence homopolaire.

I.7.2 Calcul des courants de court-circuit

I.7.2.1 Défaut phase-terre

Ce défaut survient lorsqu'une phase se retrouve accidentellement en contact avec la terre. Dans ce qui suit, le circuit est supposé non chargé comme le montre la fig. (I.13) [05].

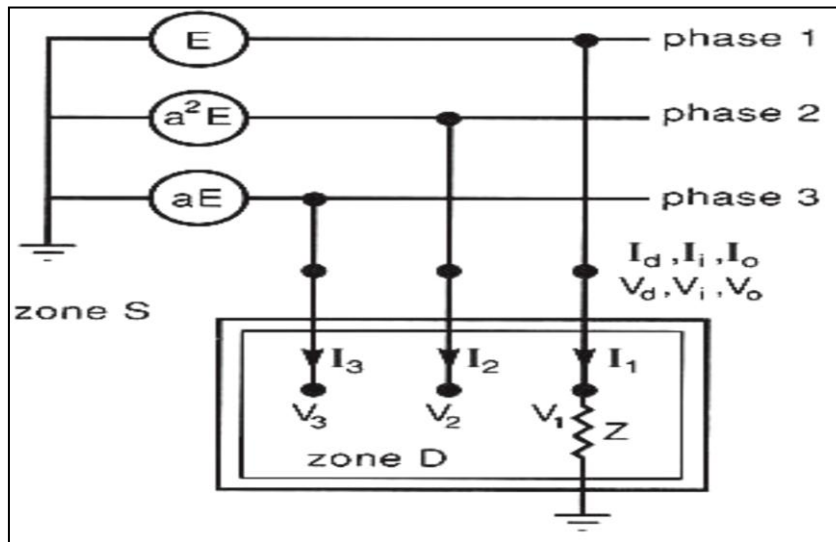


Fig. I.14: Court-circuit phase terre.

Pendant le défaut on a les équations des composantes réelles dans la zone D:

$$\begin{cases} I_1 = \frac{V_1}{Z} \\ I_2 = I_3 = 0 \end{cases} \quad (\text{I.31})$$

($V_1 = 0$ quand $Z=0$)

On a les équations des composantes symétriques dans la zone S :

$$\begin{cases} I_1 = I_d + I_i + I_o \\ I_2 = a^2 I_d + a I_i + I_o \\ I_3 = I_d + a^2 I_i + I_o \end{cases} \quad (\text{I.32})$$

$$\begin{cases} V_1 = V_d + V_i + V_o \\ V_2 = a^2 V_d + a V_i + V_o \\ V_3 = V_d + a^2 V_i + V_o \end{cases} \quad (\text{I.33})$$

Ces équations lient respectivement les courants réels et les tensions réelles à leurs composantes symétriques. On les retrouvera à l'identique dans tous les calculs de régimes déséquilibrés [05].

En combinant entre les équations des composantes réelles dans (D) et les équations des composantes symétriques dans (S) on obtient :

$$\begin{cases} a^2 I_d + a I_i + I_o = 0 \\ a I_d + a^2 I_i + I_o = 0 \\ V_d + V_i + V_o = Z I_1 \end{cases} \quad (\text{I.34})$$

De la relation (I.34) on déduit :

$$\begin{cases} I_d + I_i + I_o = \frac{I_1}{3} \\ V_d + V_i + V_o = 3Z I_o \end{cases} \quad (\text{I.35})$$

Equations de fonctionnement de S :

$$\begin{cases} E = V_d + Z_d I_d \\ 0 = V_i + Z_i I_i \\ 0 = V_o + Z_o I_o \end{cases} \quad (\text{I.36})$$

Des systèmes d'équations (I.35) et (I.36) on tire les composantes symétriques des courants et des tensions :

$$E + 0 + 0 = 3Z I_o + (Z_d + Z_i + Z_o) I_o \quad (\text{I.37})$$

Soit :

$$I_d = I_i = I_o = \frac{E}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z} \quad (\text{I.38})$$

Donc :

$$\begin{cases} V_d = E \frac{Z_i + Z_o + 3Z}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z} \\ V_i = -Z_i \frac{E}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z} \\ V_o = -Z_o \frac{E}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z} \end{cases} \quad (\text{I.39})$$

Les résultats du réseau selon les composantes symétriques sont représentés sur le schéma de la fig. (I.15).

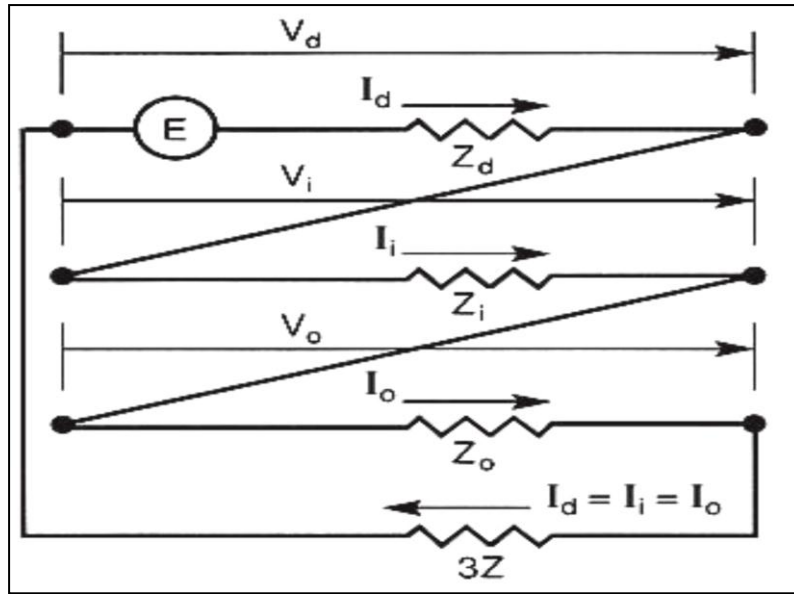


Fig. I.15 : Représentation en composantes symétriques lors d'un défaut phase terre.

En fonction des expressions précédentes, le système d'équations (I.31) donnant les valeurs réelles des courants et des tensions devient :

$$\begin{cases} I_1 = \frac{3E}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z} \\ I_2 = 0 \\ I_3 = 0 \end{cases} \quad (I.40)$$

$$\begin{cases} V_1 = 3Z \frac{E}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z} \\ V_2 = a^2 E \left(1 - \frac{Z_d + a^2 Z_i + a Z_o}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z} \right) \\ V_3 = a E \left(1 - \frac{Z_d + a Z_i + a^2 Z_o}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z} \right) \end{cases} \quad (I.41)$$

Dans les cas particuliers :

➤ Si le défaut est franc $\Rightarrow Z=0$, donc le courant de défaut phase-terre prend la valeur :

$$I_1 = \frac{3E}{Z_d + Z_i + Z_o} \quad (I.42)$$

I.7.2.2 Défaut biphasé terre

C'est un défaut constitué par un court-circuit entre deux phases et la terre. De la fig. (I.16) on aura les équations suivantes :

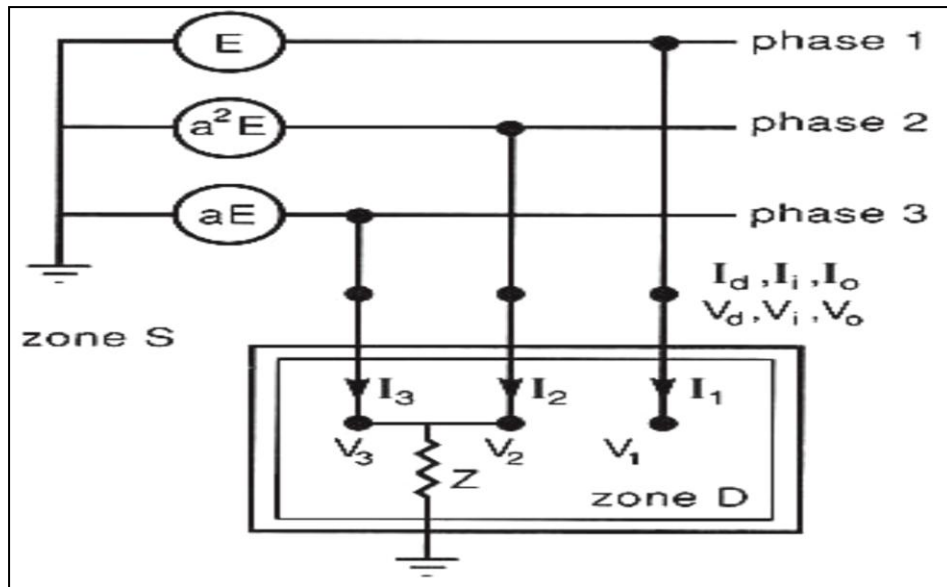


Fig. I.16 : Court-circuit biphasé terre.

Les équations de défauts dans la zone D sont :

$$\begin{cases} I_1 = 0 \\ V_2 = V_3 = Z(I_2 + I_3) \end{cases} \tag{I.43}$$

Les tensions de phase sont nulles quand : $Z=0, (V_2=0 ; V_3=0)$

Dans la zone (S) :

$$\begin{cases} I_1 = I_d + I_i + I_o \\ I_2 = a^2 I_d + a I_i + I_o \\ I_3 = I_d + a^2 I_i + I_o \end{cases} \tag{I.45}$$

En utilisant les équations (I.32), (I.33) et (I.36), on peut déterminer les composantes symétriques des courants et tensions, on aura :

$$\begin{cases} I_d + I_i + I_o = 0 \\ I_d = \frac{(Z_i + Z_o + 3Z)E}{Z_d Z_i + (Z_o + 3Z)(Z_d + Z_i)} \\ I_i = \frac{-(Z_o + 3Z)E}{Z_d Z_i + (Z_o + 3Z)(Z_d + Z_i)} \\ I_o = \frac{-Z_i E}{Z_d Z_i + (Z_o + 3Z)(Z_d + Z_i)} \end{cases} \tag{I.46}$$

Ainsi pour les tensions :

$$\begin{cases} V_d = V_i = \frac{Z_i(Z_o+3Z)E}{Z_d(Z_i+Z_o+3Z)+Z_i(Z_o+3Z)} \\ V_o = \frac{Z_i Z_o E}{Z_d(Z_i+Z_o+3Z)+Z_i(Z_o+3Z)} \end{cases} \quad (I.47)$$

Détermination des composantes réelles des courants et tensions :

$$\begin{cases} I_1 = 0 \\ I_2 = \frac{-j\sqrt{3}(-aZ_i+Z_o+3Z)E}{Z_d Z_i (Z_o+3Z)(Z_d+Z_i)} \\ I_3 = \frac{j\sqrt{3}(-a^2 Z_i+Z_o+3Z)E}{Z_d Z_i (Z_o+3Z)(Z_d+Z_i)} \\ I_{terre} = I_1 + I_2 = \frac{j3Z_i E}{Z_d Z_i (Z_o+3Z)(Z_d+Z_i)} \end{cases} \quad (I.48)$$

$$\begin{cases} V_1 = \frac{3Z_i(Z_o+2Z)E}{Z_d Z_i (Z_o+3Z)(Z_d+Z_i)} \\ V_2 = V_3 = \frac{-3ZZ_i E}{Z_d Z_i (Z_o+3Z)(Z_d+Z_i)} \end{cases} \quad (I.49)$$

Le schéma du réseau selon les composantes symétriques est représenté dans la fig. (I.17).

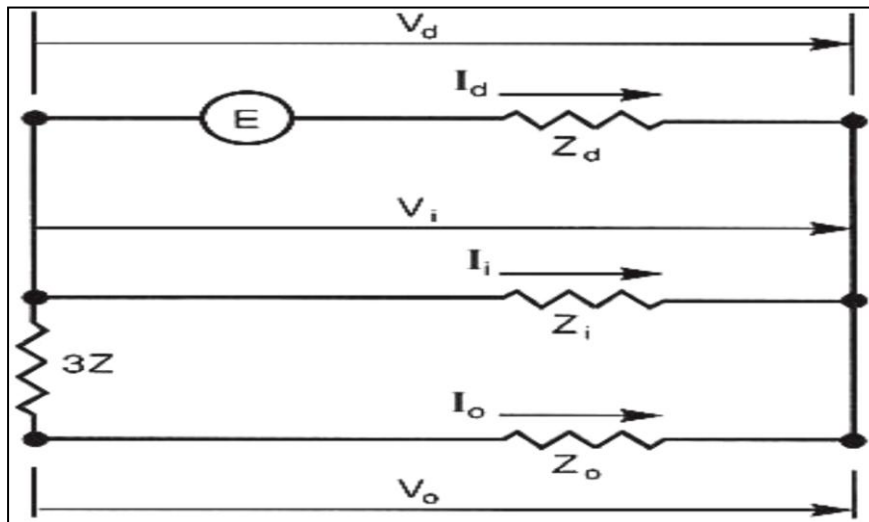


Fig. I.17: Représentation complexe du défaut biphasé terre.

Cas particulier :

- Défaut franc : Soit $Z = 0$, le courant de défaut phase-terre prend la valeur :

$$I_2 + I_3 = \frac{-3Z_i E}{Z_d Z_o + Z_i Z_o + Z_d Z_i} \tag{I.50}$$

I.7.2.3 Défaut triphasé à la terre

Il est constitué par la mise en court-circuit des trois phases. C’est un défaut symétrique qui ne fait intervenir que le système direct. Dans ce cas, il est clair que les tensions de phases au point de court-circuit sont égales et les tensions composées sont nulles (voir fig. (I.18)).

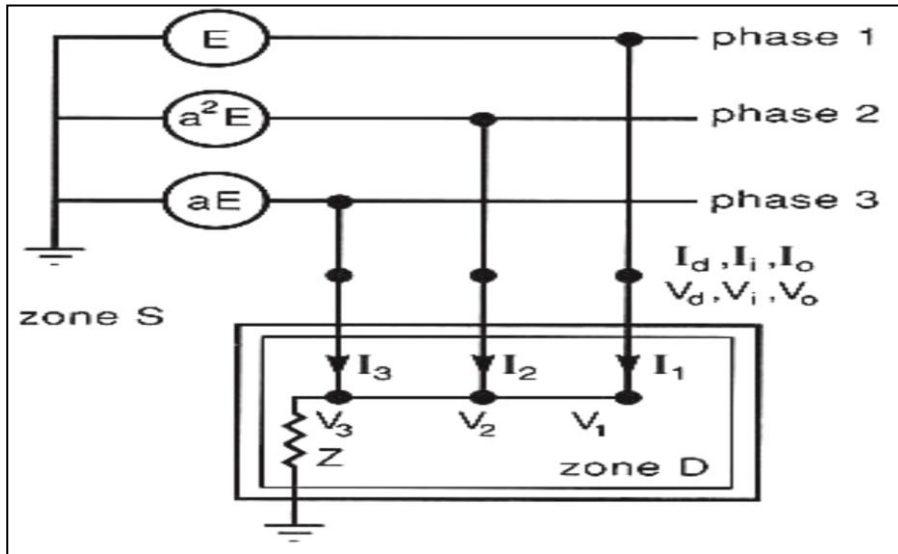


Fig. I.18: Court-circuit triphasé

Dans la zone (D) :

$$V_1 = V_2 = V_3 = Z(I_1 + I_2 + I_3) \tag{I.51}$$

Dans la zone (S) : les mêmes systèmes d’équations (I.32et I.33) s’appliquent :

Continuité à la frontière (D) - (S) :

$$\begin{cases} I_1 + I_2 + I_3 = 3I_o = \frac{V_o}{Z} \\ V_d = V_i = 0 \\ V_1 = V_2 = V_3 = V_o \end{cases} \tag{I.52}$$

Fonctionnement de (S) : les équations (I.36) s’appliquent ici :

Résolution des équations :

$$\begin{cases} I_d = \frac{E}{Z_d} \text{ et } I_i = I_o = 0 \\ V_d = V_i = V_o = 0 \end{cases} \tag{I.53}$$

$$\begin{cases} I_1 = \frac{E}{Z_d} \\ I_2 = a^2 \frac{E}{Z_d} \\ I_3 = a \frac{E}{Z_d} \end{cases} \quad (I.56)$$

$$V_1 = V_2 = V_3 = 0 \quad (I.57)$$

Les résultats sont indépendants des valeurs Z , Z_i et Z_o .

Schéma du réseau selon les composantes symétriques (fig. 19).

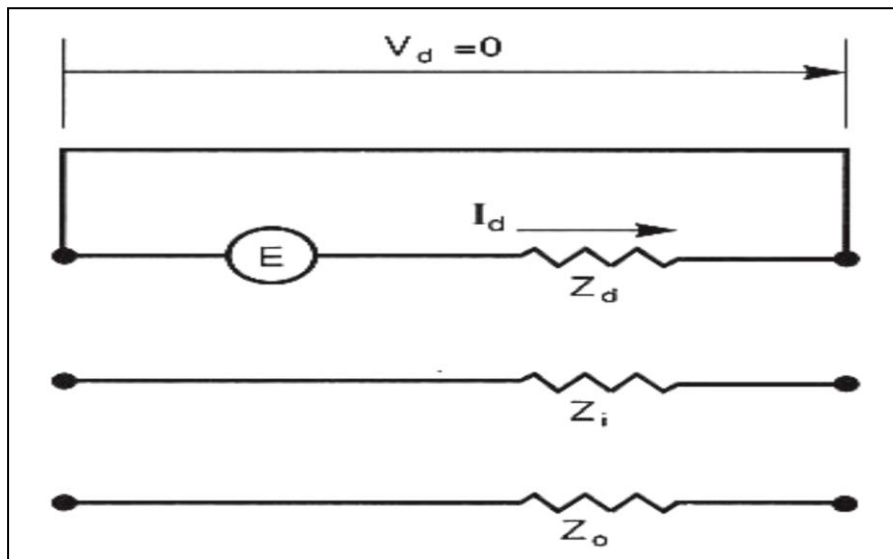


Fig. I.19: Représentation en composantes symétriques lors d'un défaut triphasé

Donc les courts-circuits triphasés sont caractérisés par des courants de très fortes intensités et les tensions peuvent chuter jusqu'à zéro au point de défaut (court-circuit franc) ce qui provoque l'instabilité du réseau en l'absence des moyens de protection.

De ce point de vue, il est indispensable d'avoir des moyens de déclenchement automatique et rapide des éléments de protections [05].

Conclusion

Dans ce premier chapitre on a étudié le régime transitoire lors du rétablissement du courant dans les trois différents cas de circuit (R, L), (L, C) et (R, L, C).

On a vu aussi les différents courants de courts-circuits qui peuvent avoir lieu sur les réseaux électriques MT et HT et on constate que parmi ces différents types de courts-circuits, le plus sévère est le court-circuit triphasé.

On a terminé ce chapitre par un calcul des courants de court-circuit en utilisant la méthode des composantes symétriques.

Chapitre II :
Les phénomènes de
coupure

II.1 Introduction

L'interruption d'un courant dans un circuit électrique à courant continu ou à courant alternatif, est l'une des actions indispensables à réaliser par des disjoncteurs, pour les deux cas, il en résulte des phénomènes électriques et des contraintes sévères sur le réseau et sur l'appareil de coupure.

Dans ce chapitre, on va d'abord décrire le processus de coupure d'un courant alternatif, les phénomènes physiques qui ont lieu lors de la coupure des courants électriques particulièrement dans les réseaux MT et HT et qui jouent un rôle essentiel dans l'échec ou la réussite de la coupure, ensuite on va décrire la coupure de quelques courants spéciaux.

II.2 Nature du courant électrique

Le courant électrique est produit par le déplacement d'électrons dans un matériau conducteur et pour l'établissement d'un courant électrique il faut trois conditions : une source d'énergie, un matériau conducteur et un circuit fermé.

Il existe deux types de courants électriques : le courant continu et le courant alternatif. Le premier est constant alors que le second est périodique et change de sens deux fois par période, il est caractérisé par sa fréquence 50 ou 60 Hz, selon les pays et leurs normes utilisées en vigueur. Le courant alternatif le plus utilisé est le courant sinusoïdal.

Pour le transport et la distribution de l'énergie électrique, deux raisons favorisent le choix du courant alternatif plutôt que le courant continu, la simplicité de la transformation des niveaux de tension en utilisant des transformateurs et la facilité de conception des disjoncteurs pour couper le courant. [06].

II.3 Interruption d'un courant continu

Soit un circuit inductif de résistance R et d'inductance L alimenté par courant continu d'intensité i (fig. II.1).

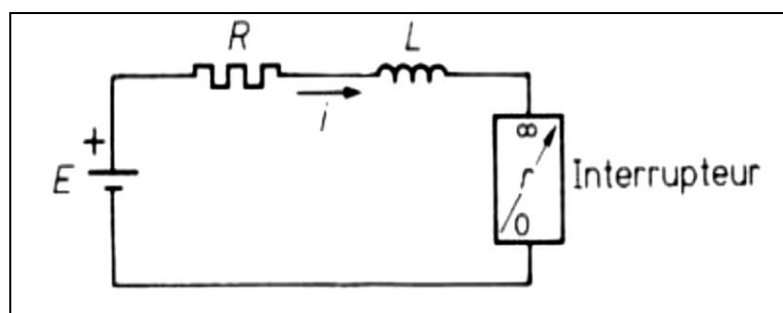


Fig. II.1: circuit inductif en courant continu [02].

- La loi d'Ohm qui régit le circuit pendant la phase transitoire est :

$$E - Ri - L \frac{di}{dt} - ri = 0 \quad (\text{II.1})$$

- L'énergie de coupure est :

$$\int_0^T ri^2 dt = \int_0^T (E - Ri)idt - \int_i^0 Lidt \quad (\text{II.2})$$

Avec :

- E la tension de la source
 r la résistance de l'interrupteur (résistance variable).
 T la durée de la coupure

Cette énergie est constituée de deux types :

- Energie électrique qui dépend du temps de coupure :

$$\int_0^T (E - Ri)idt \quad (\text{II.3})$$

- Energie électromagnétique qui dépend du courant :

$$- \int_I^0 Lidt = \frac{1}{2} Li^2 \quad (\text{II.4})$$

Pour réaliser l'interruption du courant parcourant ce circuit, il faut et il suffit que la résistance r de l'interrupteur, supposée initialement nulle, croisse et devienne infinie (ou sa conductance diminue, puis s'annule). Lorsque cette condition unique est réalisée, l'appareil, devenu isolant, n'est plus traversé par aucun courant.

La figure (fig. II.2) représente la variation de la résistance de l'interrupteur en fonction de l'évolution du courant [07].

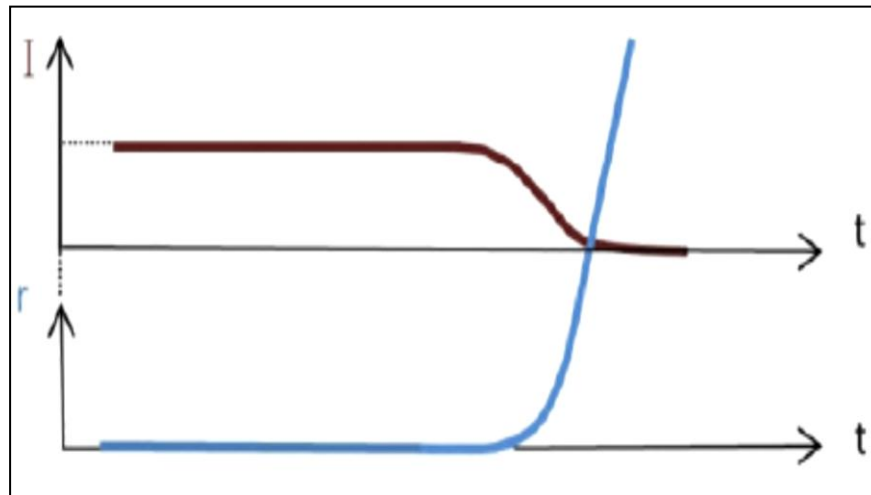


Fig. II.2 : Variation des paramètres I, r en fonction de temps [07].

Cependant, même si la variation de la résistance r est infiniment rapide on constate qu'il faut néanmoins dépenser dans l'interrupteur la totalité de l'énergie électromagnétique emmagasinée initialement dans l'inductance propre du circuit, soit $\frac{1}{2}Li^2$. Cette énergie est souvent considérable. Un critère minimal de bon fonctionnement est donc que l'interrupteur doit pouvoir absorber sans dommage cette énergie. Ce critère, s'il est primordial, n'est pas le seul. Il en existe au moins un autre d'importance. Si, en effet, la variation de la résistance est infiniment rapide, celle du courant l'est aussi et en conséquence, la force électromotrice induite dans l'inductance propre du circuit ($L \frac{di}{dt}$) devient infiniment grande. Cette surtension illimitée est évidemment inadmissible [07].

Dans la pratique, il faut donc se fixer une limite à ne pas dépasser pour la valeur de la surtension. Une fois cette condition est définie, la loi de variation de la résistance se trouve imposée et le problème est théoriquement résolu. L'énergie dépensée au cours de la coupure est alors supérieur à l'énergie électromagnétique du circuit sans dépasser généralement le double de cette valeur.

II.4 Interruption d'un courant alternatif

Soit un circuit inductif de résistance R et d'inductance L alimentée par courant alternatif d'intensité i (fig. II.3). La condition nécessaire et suffisante de la coupure est que l'impédance Z de l'interrupteur croisse et devienne infinie, mais cette condition de coupure est purement théorique, car, pratiquement, on ne peut guère commander, par variation d'inductance L ou de capacitance

(I/C)), que de modiques puissances, donc on est confronté à la nécessité d'emploi d'une résistance, dont la loi de variation va représenter tout le problème.

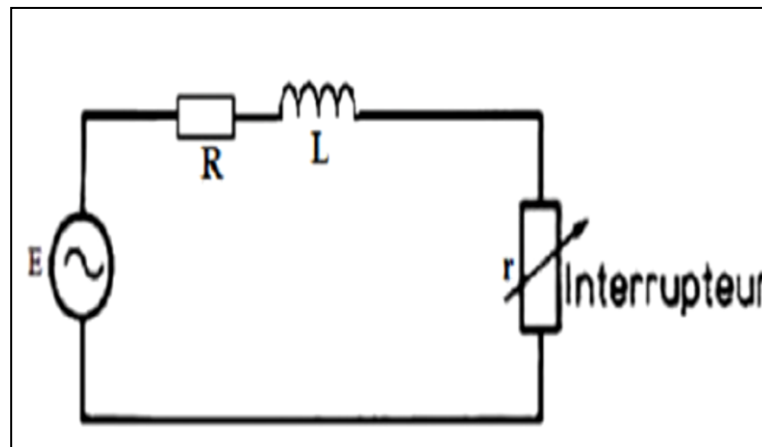


Fig. II.3 : Circuit R L en courant alternatif [07].

Les choses sont donc bien différentes de ce qui se passe en courant continu, où l'instant initial est sans influence et où l'on n'échappe pas à une certaine dépense d'énergie dans l'interrupteur.

En courant continu, l'instant initial de coupure est sans influence et où l'on n'échappe pas à une certaine dépense d'énergie dans l'interrupteur, ce n'est pas le cas en alternatif. Si l'instant de coupure coïncide avec un maximum de l'intensité du courant (fig. II.4, courbe i_1) l'énergie de coupure atteindra sa valeur maximale (équation (II.2)), par contre si l'instant de coupure correspond à un instant où le l'intensité du courant est très faible, (fig. II.4, courbe i_2) l'énergie de coupure pourra être très réduite. Si la variation de la résistance se produit à l'instant précis du passage du courant par zéro, il y a la possibilité de couper sans aucune dépense d'énergie.

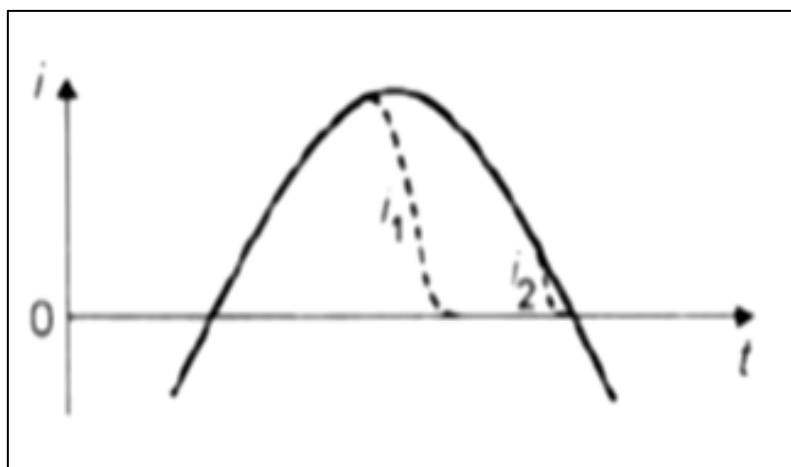


Fig. II.4 : Importance de l'instant de coupure dans l'interruption d'un circuit alimenté en courant continu [07].

II.4.1 Principe de la coupure avec un interrupteur idéal

Un appareil de coupure idéal serait un appareil doté d'un pouvoir qui lui permet d'interrompre le courant d'une manière instantanée, or aucun appareil mécanique n'est capable de couper le courant sans l'aide de l'arc électrique qui dissipe l'énergie électromagnétique du circuit électrique, limite les surtensions, mais retarde la coupure totale du courant [08].

Un interrupteur idéal est un dispositif qui dans la position fermé, il se comporte comme un conducteur idéal (sa résistance est nulle) et dans la position ouvert, il se comporte comme un isolateur idéal (sa résistance est infinie). Un interrupteur idéal changes directement de la position fermé à la position ouvert et courant sinusoïdal est toujours interrompu au zéro du courant.

En théorie, Interrompre instantanément un courant c'est d'être capable de passer directement de l'état conducteur à l'état isolant, donc la résistance d'un tel interrupteur idéal doit passer immédiatement de zéro à l'infini comme le montre la (fig. II.5).

D'un autre côté, cet appareil devrait être capable :

- D'absorber toute l'énergie électromagnétique accumulée dans le circuit avant la coupure.
- De supporter la surtension ($L di/dt$) qui apparait à ses bornes et si le passage isolant-conducteur se faisait en un temps très petit, elle aurait une valeur infini, ce qui conduirait forcément au claquage diélectrique.

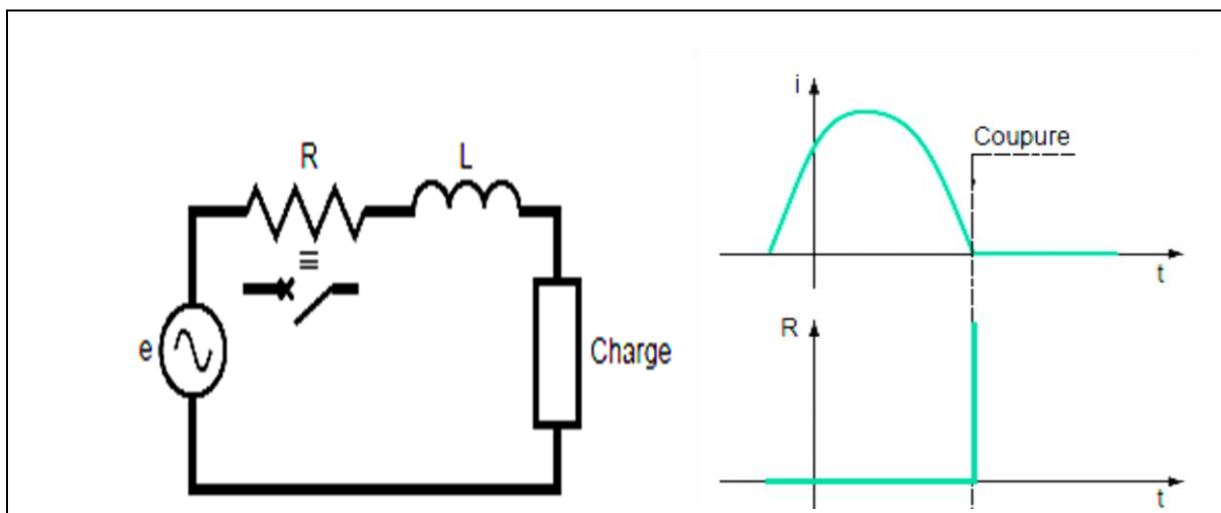


Fig. II.5 : Coupure réalisée par un interrupteur idéal

Pour concevoir un interrupteur idéal, il existe deux difficultés à surmonter :

a/ La synchronisation

En courant alternatif, avec une synchronisation judicieuse on peut concevoir un interrupteur idéal capable de couper sans être le siège d'aucune dépense d'énergie. Il suffit que sa résistance soit nulle jusqu'à l'instant du passage naturel du courant par zéro, puis redevienne infinie tout de suite après, mais cette synchronisation constitue une difficulté de taille, supposons par exemple un courant de fréquence 50 Hz et d'intensité maximale 1000 A. Un millième de seconde avant le zéro du courant, il circule encore 3000 A et l'on ne peut toujours pas espérer séparer des contacts sans qu'aucune dépense d'énergie.

b/ la tension transitoire de rétablissement

Juste après l'interruption du courant, la tension transitoire de rétablissement (TTR) aux bornes de l'interrupteur rejoint la tension du réseau qui est maximale à cet instant là pour les circuits inductifs. Un régime transitoire s'établit alors assurant le raccordement de cette tension à celle du réseau. La tension transitoire de rétablissement dépend des caractéristiques du réseau et sa vitesse de croissance (dv/dt) peut être considérable (de l'ordre du kV/ms) pour un interrupteur idéal. En d'autres termes, pour éviter l'échec de la coupure, l'interrupteur idéal doit pouvoir supporter une TTR de plusieurs kilovolts pendant moins d'une micro seconde après la transition conducteur-isolant.

En conclusion, dans la pratique aucun dispositif purement mécanique ne peut être assez bien synchronisé ni suffisamment rapide.

II.4.2 Coupure avec l'arc électrique

En réalité, le courant ne disparaît pas brutalement et l'arc prend naissance dès la séparation des deux contacts, sans qu'il apparaisse de surtension dangereuse.

L'arc permet alors, tout en continuant d'assurer le passage du courant dans le circuit, d'éloigner les deux contacts l'un de l'autre à des vitesses raisonnables, jusqu'à une distance suffisante pour que, une fois la coupure terminée, l'appareil résiste diélectriquement à la tension appliquée à ses bornes. De plus, l'arc évite, la libération prématurée de l'énergie électromagnétique tant que le courant est encore important.

Ce sont les étonnantes caractéristiques électrothermiques de l'arc qui vont lui permettre de s'acquitter de ce rôle en lui conférant, automatiquement un comportement voisin de celui de l'interrupteur idéal. En effet, l'arc possède au plus haut point, une inégalable aptitude à passer rapidement, et au bon moment, de l'état conducteur à l'état isolant [08].

II.4.2.1 Processus de coupure avec un arc électrique

Le processus de coupure avec un arc électrique est constitué de trois périodes (figure II.6) :

❖ La période d'attente

Quelques microsecondes avant le zéro du courant, les deux contacts se séparent, il y a rupture diélectrique du milieu intercontacts et l'apparition de l'arc électrique.

L'arc est constitué d'une colonne de plasma composée d'ions et d'électrons. Cette colonne reste conductrice tant que sa température est suffisamment élevée. L'arc est ainsi « entretenu » par l'énergie qu'il dissipe par effet Joule. La tension qui apparaît entre les deux contacts du fait de la résistance de l'arc s'appelle la tension d'arc, elle est notée u , sa valeur dépend de la nature de l'arc et elle est influencée par l'intensité du courant et par les échanges thermiques avec le milieu. Ces échanges thermiques qui se font par rayonnement, convection et conduction sont caractéristiques de la puissance de refroidissement de l'appareil de coupure [08].

La puissance dissipée dans l'appareil au cours de la coupure dépend de la tension d'arc :

$$W = \int_{t_0}^{t_{arc}} u \cdot i dt \quad (\text{II.5})$$

Où

t_0 l'instant d'initiation de l'arc.

t_{arc} l'instant de la coupure.

La tension d'arc en moyenne tension et en haute tension reste toujours très inférieure à la tension du réseau et n'a donc pas d'effet limiteur, la coupure se fait donc au voisinage du zéro « naturel » du courant alternatif.

❖ La période d'extinction

Au moment de passage par zéro du courant, l'arc sera éteint et le milieu entre les contacts commence à redevenir isolant et le courant d'arc s'annule. Cela est réalisable si la puissance de refroidissement développée par le disjoncteur et exercée sur l'arc électrique est suffisante (la puissance de refroidissement est supérieure à puissance fournie par l'arc par effet Joule).

Au voisinage du zéro de courant, la résistance de l'arc augmente selon une courbe qui dépend principalement de la constante de temps de désionisation du milieu inter-contacts. Au zéro

de courant, cette résistance à une valeur qui n'est pas infinie et un courant post-arc traverse encore l'appareil du fait de la tension transitoire de rétablissement qui apparaît à ses bornes.

- Si la puissance dissipée par effet joule dépasse la puissance de refroidissement caractéristique de l'appareil, le milieu ne se refroidit plus, c'est l'emballement thermique suivi d'une nouvelle rupture diélectrique : c'est un échec thermique.
- Si en revanche la croissance de la tension transitoire de rétablissement n'excède pas une certaine valeur critique, la résistance de l'arc peut augmenter suffisamment vite pour que la puissance dissipée dans le milieu reste inférieure à la puissance de refroidissement de l'appareil évitant ainsi l'emballement thermique.

❖ La période post-Arc

Pour que la coupure soit réussie, il faut que la vitesse de régénération diélectrique soit plus rapide que celle l'évolution de la tension transitoire de rétablissement, sinon un claquage diélectrique apparaît.

A l'instant où se produit la rupture diélectrique, le milieu redevient conducteur. Ces échecs diélectriques post-coupure sont appelés :

- réallumages, s'ils ont lieu dans le quart de période qui suit le zéro de courant.
- réamorçages, s'ils se produisent après.

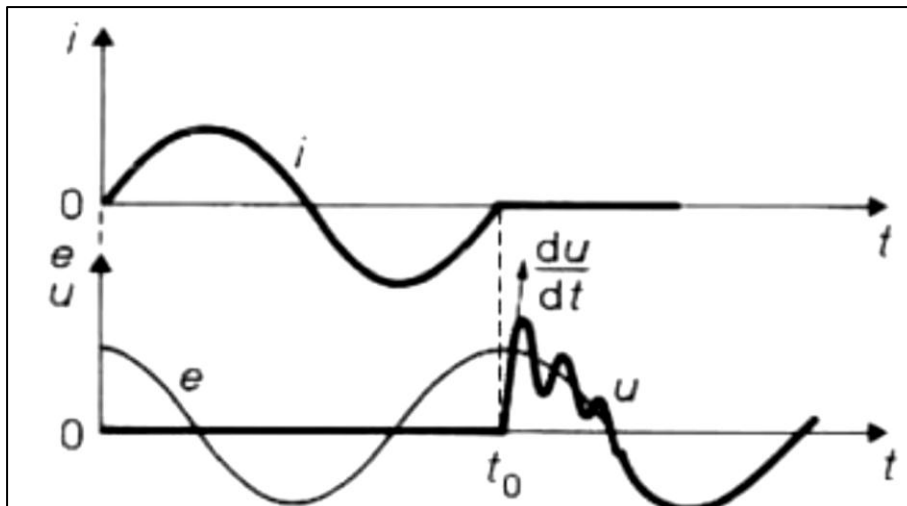


Fig. II.6 : Processus de coupure avec un arc électrique [08].

II.5 Modélisation du comportement dynamique de l'arc

II.5.1 Hypothèses d'Otto Mayr

Ce modèle repose sur un nombre limité d'hypothèses simples et physiquement acceptables. Il constitue le prototype de toute une famille de modèles dits de conductance parce qu'il s'efforce d'explicitier l'évolution de cette dernière en fonction des principaux paramètres qui définissent l'arc et le circuit. [07]

II.5.1.1 Première hypothèse

La conductance g de l'arc est une fonction de l'énergie w de l'arc :

$$g = F(w) \quad (\text{II.6})$$

Cela signifie qu'à une valeur w de l'énergie, il ne correspond qu'une seule valeur de la résistance r .

La dérivation de la relation (II.6) donne :

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{F'(w)}{F(w)} \frac{dw}{dt} \quad (\text{II.7})$$

Soit P la puissance de refroidissement du dispositif de coupure et ri^2 la puissance dissipée par effet Joule et fournie à l'arc : la variation d'énergie entre les contacts est :

$$\frac{dw}{dt} = ri^2 - P \quad (\text{II.8})$$

On en tire

$$w = \int (ri^2 - P) dt \quad (\text{II.9})$$

L'équation (II.7) devient :

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{F'(w)}{F(w)} (ri^2 - P) \quad (\text{II.9})$$

II.5.1.2 Deuxième hypothèse

$F(w)$ est supposée une fonction exponentielle :

$$g = F(w) = k \cdot e^{\left(\frac{w}{w_0}\right)} \quad (\text{II.10})$$

w_0 : coefficient constant.

Qui représente la quantité d'énergie qu'il faut apporter à l'arc pour que sa conductance soit multipliée par e ($e=2,71828$). A l'inverse si on retire une énergie (W_0) à l'arc, sa conductance sera divisée par e .

K : exprime la valeur absolue de la conductance et n'intervient pas dans les relations qui vont nous intéresser, car ce sont seulement les variations relatives de la conductance qui vont être exprimées.

Donc on peut écrire :

$$g = F(w) = e^{\left(\frac{w}{w_0}\right)} \quad (\text{II.11})$$

La dérivée de la relation (II.11), par rapport à l'énergie (w) donne :

$$F'(w) = \frac{1}{w_0} \cdot e^{\left(\frac{w}{w_0}\right)} \quad (\text{II.12})$$

D'où

$$\frac{F'(w)}{F(w)} = \frac{1}{w_0} \quad (\text{II.13})$$

II.5.1.3 Troisième hypothèse

La puissance de refroidissement est supposée constante et égale à P_0 et compte tenu de la relation (II.13), la relation (II.9) devient :

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{w_0} (ri^2 - P_0) = \frac{P_0}{w_0} \left(\frac{ri^2}{P_0} - 1 \right) \quad (\text{II.14})$$

Soit $\tau = \frac{w_0}{P_0}$, la constante de temps de désionisation, l'équation (II.9) sera :

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ri^2}{P_0} - 1 \right) = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{P_0} - 1 \right) \quad (\text{II.15})$$

C'est l'équation de Mayr, elle exprime le comportement dynamique de l'arc.

Avec :

g : la conductance de l'arc.

u : la tension de l'arc.

i : le courant de l'arc.

τ : la constante de temps de désionisation.

P_0 : la puissance de refroidissement constante.

D'après la relation (II.15), il devait exister une variation linéaire de $\left(\frac{1}{g} \frac{dg}{dt}\right)$ en fonction de la puissance fournie à l'arc (u et i) par effet de Joule puisque (τ et P_0) sont considérés comme des constantes, mais la réalité expérimentale est différente, car (τ et P_0) ne restent pas constantes durant la décroissance du courant et l'extinction de l'arc.

II.6 Paramètres importants durant le régime transitoire

II.6.1 La constante de temps de désionisation

Lorsque ri^2 est négligeable devant P_0 , la relation (II.15) montre que r est sensiblement une fonction exponentielle du temps, soit :

$$r = r_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (\text{II.16})$$

τ représente donc le temps minimal nécessaire pour que la résistance de l'arc soit multipliée par e .

Cette constante de temps joue un rôle très important dans les phénomènes qui se produisent au voisinage du zéro de courant et dépend considérablement de la nature du gaz dans lequel l'arc se trouve engendré [02].

La figure II.7 représente la constante de temps de désionisation, en fonction de la pression, de quelques gaz.

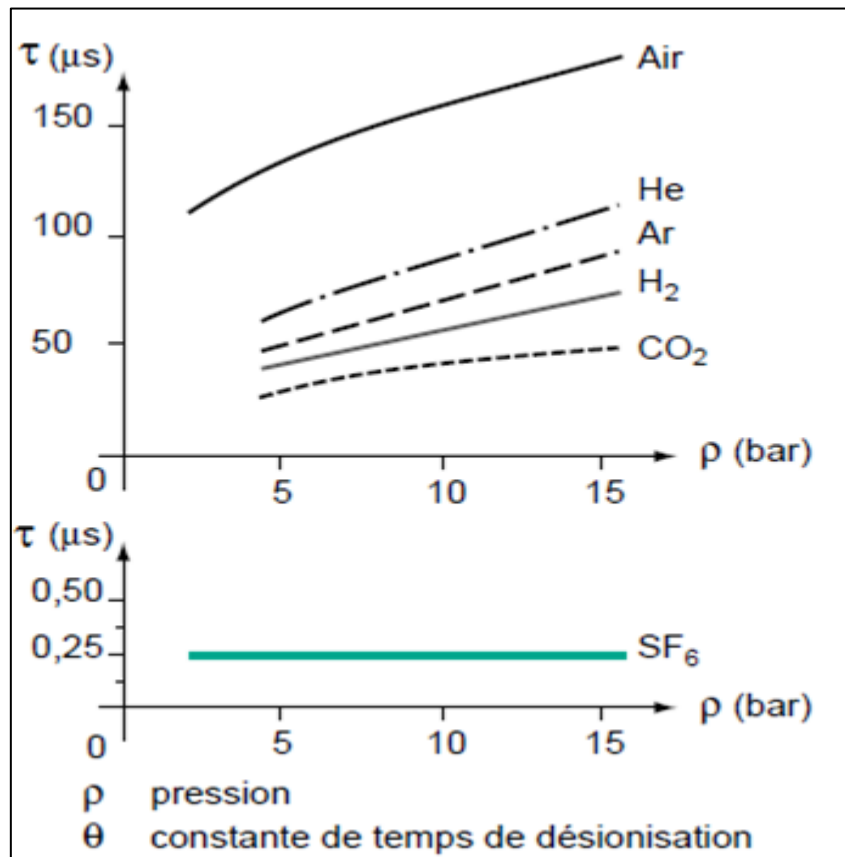


Fig.II.7 : Constante de temps de désionisation en fonction de la pression de quelques gaz [08].

II.6.2 La pointe d'extinction

Après avoir maintenu une valeur constante dans l'intervalle où le courant est fort, la tension d'arc augmente lorsque le courant devient faible et atteint un pic nommé pic d'extinction, puis chute à zéro avec une pente du/dt très raide. [08]

La valeur de cette surtension d'arc ne peut malheureusement pas être établie analytiquement. Le sommet de la pointe d'extinction correspond physiquement (à l'approche du zéro de courant) au moment où l'augmentation de la résistance r n'est plus suffisamment rapide pour compenser la réduction du courant i , de sorte que le produit ri cesse de croître. À partir du sommet de la pointe d'extinction, le produit ui décroît rapidement et devient très vite négligeable devant P , par conséquent, r croît alors sensiblement de façon exponentielle avec une constante de temps voisine de τ . Il en résulte que le courant devient pratiquement négligeable deux à trois constantes de temps τ après la pointe d'extinction.

Il est ainsi possible d'évaluer la constante de temps τ d'un arc réel, à l'approche du zéro de courant, à partir d'un relevé oscillographique.

II.6.3 La puissance de refroidissement

La puissance de refroidissement est une caractéristique du dispositif de coupure. Plus la puissance de refroidissement est grande, plus la pointe d'extinction est grande (fig. II.8) [07].

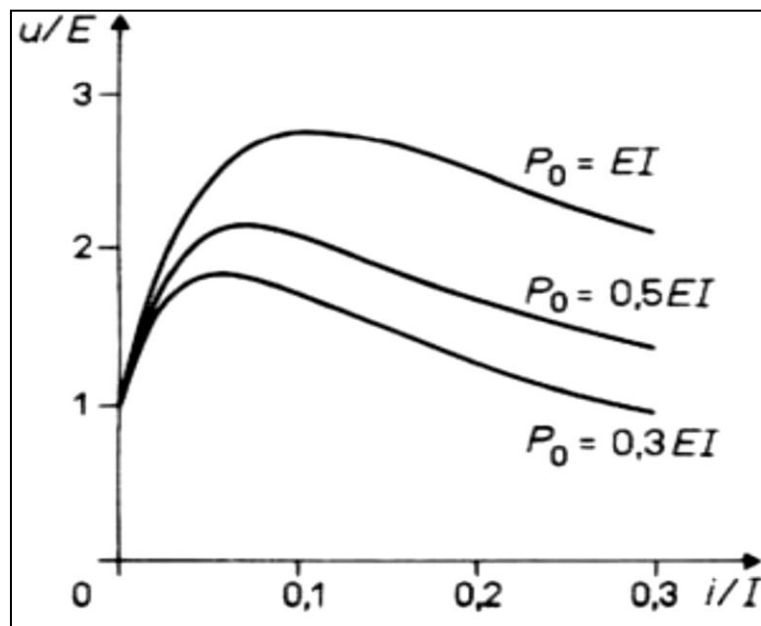


Fig. II.8 : Influence de la puissance de refroidissement P_0 sur la pointe d'extinction, pour une constante de temps d'arc invariable [07].

II.6.4 La tension transitoire de rétablissement

La tension transitoire de rétablissement (TTR) est la tension électrique que l'on observe aux bornes d'un appareillage électrique lors de la coupure d'un courant alternatif. La forme de la TTR dépend du type et des caractéristiques du réseau électrique concerné ainsi que de la nature de la charge (capacitive, inductive).

La tension transitoire de rétablissement est un paramètre qui influe fortement sur la réussite d'une coupure de courant dans un réseau électrique.

Après le passage par zéro du courant, la conductance du milieu n'est pas totalement nulle et la tension aux bornes du disjoncteur varie très rapidement. Cette tension transitoire de rétablissement impose la circulation d'un très faible courant entraînant une dissipation de l'énergie électrique par effet joule.

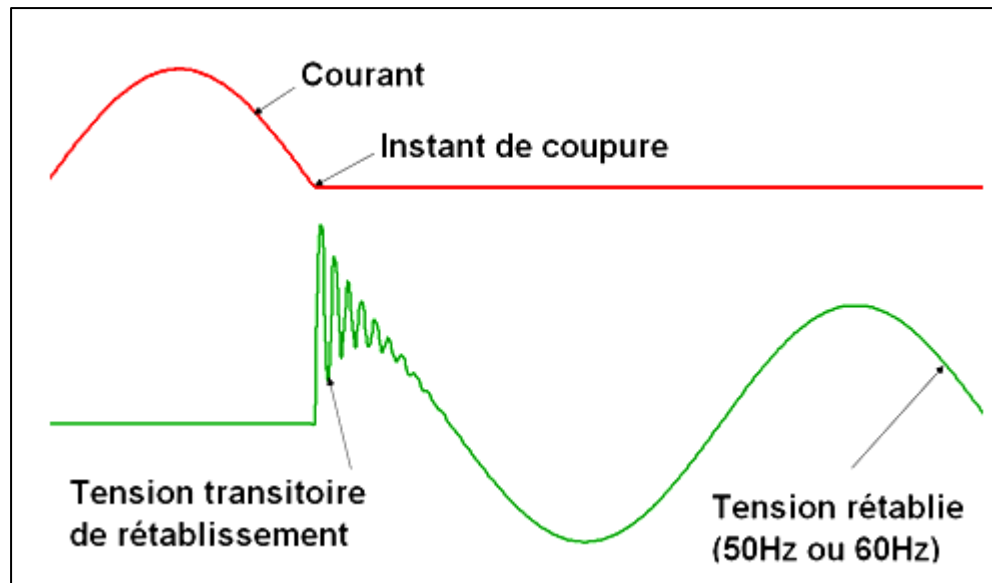


Fig. II.9 : la tension transitoire de rétablissement.

II.6.5 Le courant post-arc

Le courant post-arc est un petit courant qui continue à s'écouler dans les premières quelques microsecondes après que le courant a été interrompu et quand la TTR (Tension transitoire rétablissement) se forme [09].

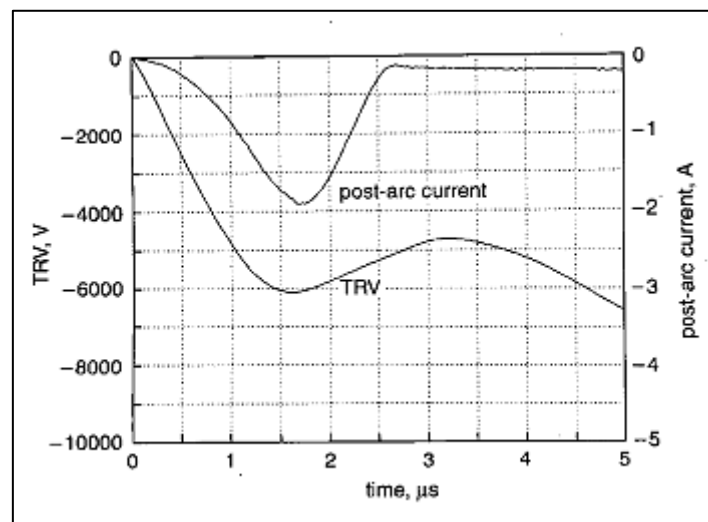


Fig. II.10 : courant post-arc dans un disjoncteur SF6 HT [09].

II.7 Quelques cas de coupures

II.7.1 Coupure des courants résistifs

Dans les réseaux MT et HT la coupure d'un circuit en exploitation normale se fait sur un courant de charge de quelques ampères à quelques centaines d'ampères, ces valeurs sont faibles par rapport au courant de court-circuit (de 10 à 50 kA).

Avec un facteur de puissance supérieur ou égal à 0,8. Le déphasage entre la tension du circuit électrique et le courant est petit et le minimum de tension se produit aux alentours du minimum de courant (circuit fortement résistif).

La tension aux bornes de l'appareil de coupure s'établit alors, à la tension du réseau, quasiment sans phénomène transitoire (Fig. II.11). Dans de telles conditions, la coupure se fait au passage du zéro de courant, sans difficulté, puisque l'appareil est dimensionné pour des courants élevés en quadrature avec la tension. [07]

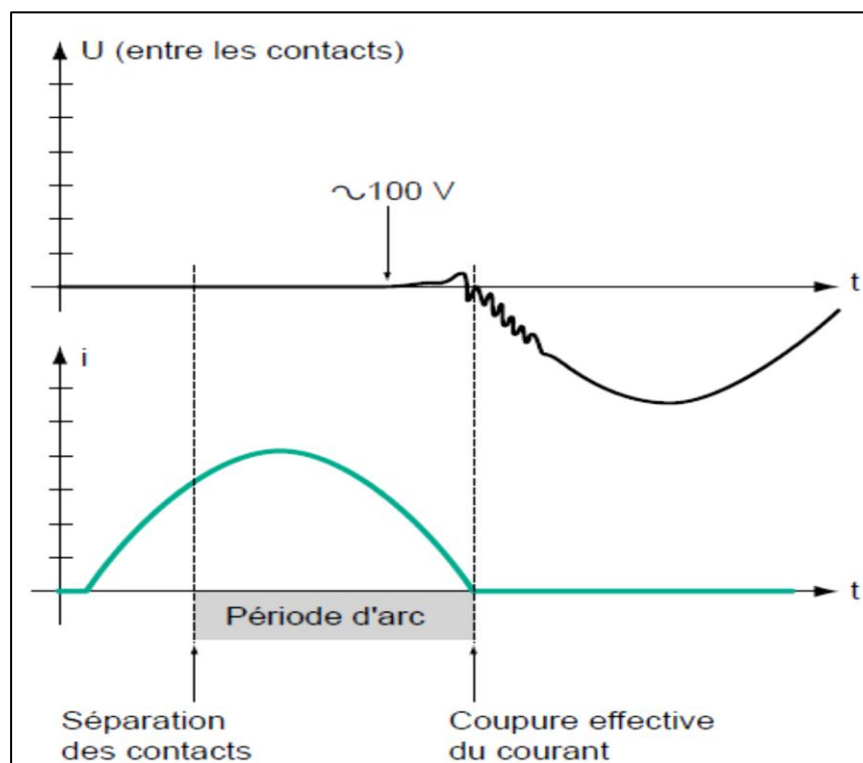


Fig. II.11 : Les phénomènes transitoires sont très faibles lors de la coupure d'un courant d'une charge résistive [08].

II.7.2 Coupure des faibles courants inductifs

Soit à interrompre un circuit présentant une inductance élevée, un transformateur à vide, par exemple. Le courant inductif à couper est de faible valeur (plus L augmente plus i diminue) à comparer avec le courant nominal du circuit ou au courant de court-circuit du réseau au point où se trouve installé l'appareil. La capacité de refroidissement des appareils dimensionnés pour le courant de court-circuit est très élevée par rapport à la faible énergie dissipée dans l'arc, Cela engendre une instabilité de l'arc et un phénomène d'oscillation apparaît lié aux échanges d'énergie entre les capacités « vues » par l'organe de coupure et les inductances (Fig. II.12). Pendant cette oscillation à haute fréquence (de l'ordre de 1 MHz) des passages à zéro du courant sont possibles et le disjoncteur peut interrompre ce courant avant le passage normal à zéro à la fréquence industrielle (50 Hz). Ce phénomène désigné sous le nom d'arrachement de courant s'accompagne d'une surtension $L di/dt$ très élevée aux bornes du transformateur principalement due au régime oscillatoire qui s'établit du côté de la charge (Fig. II.13).[08]

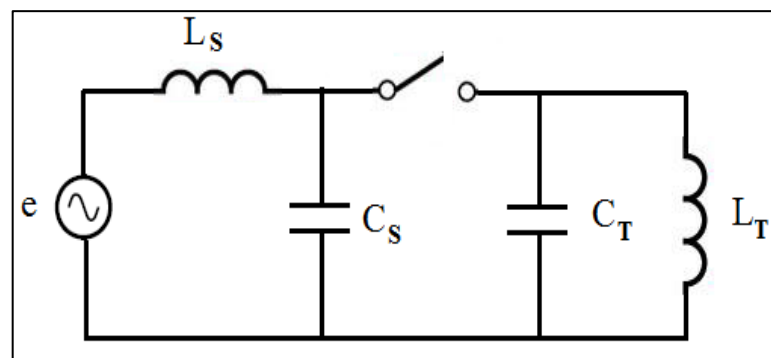


Fig. II.12 : Circuit alimentant un transformateur à vide de faible courant inductif

L_s et C_s sont respectivement l'inductance et la capacité côté gauche du disjoncteur.

L_T et C_T sont respectivement l'inductance et la capacité du transformateur à vide.

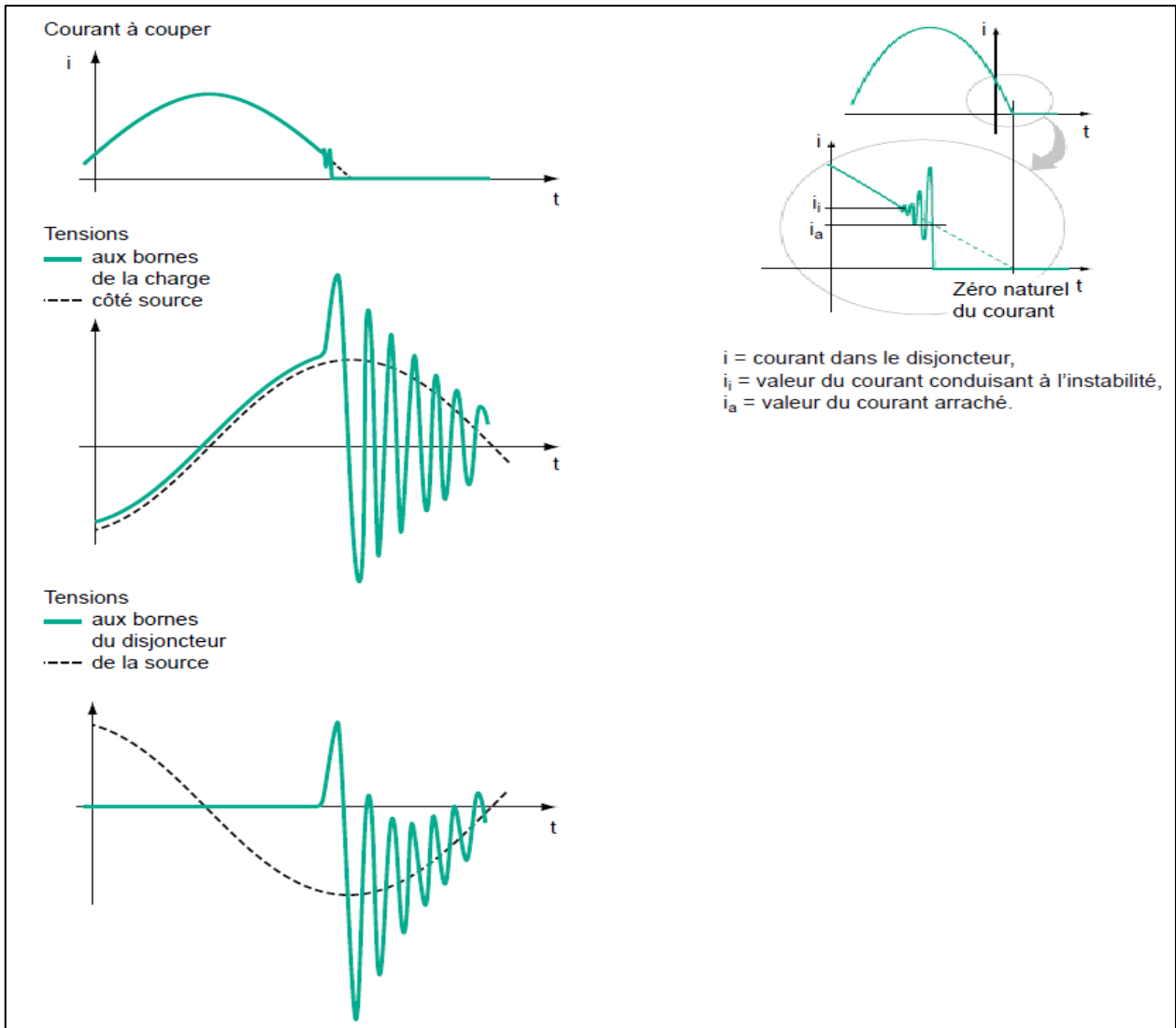


Fig. II.13 : phénomène d'arrachement de courant lors de la coupure d'un faible courant inductif.

[07]

II.7.3 La coupure des courants capacitifs

La coupure des courants capacitifs est en principe sans difficulté mais peut donner lieu à des surtensions dues à des réamorçages lors de la période de rétablissement de la tension.

Dès que les contacts de l'appareil sont séparés et qu'un arc, même très court, a pris naissance, une tentative d'interruption se produit automatiquement au premier passage par zéro du courant (à t_0) (fig. I.5). La tension e du générateur est alors maximale ($-\hat{E}$) puisque le courant est en avance de $\pi/2$ sur la tension. Après l'annulation du courant, le condensateur C reste donc chargé à cette tension $-\hat{E}$. La tension aux bornes de l'interrupteur augmente lentement sans TTR et avec une

dérivée par rapport au temps nulle à l'instant du passage par zéro du courant. Dans ces conditions, on comprend qu'un appareil, même très peu performant, puisse couper au premier passage par zéro du courant qui se présente immédiatement après l'ouverture de ses contacts [08].

Cependant les problèmes viennent après le zéro du courant, des problèmes de réamorçages délicats peuvent avoir lieu. En effet, après une demi-période, la tension du réseau s'est inversée et la tension aux bornes de l'interrupteur atteint deux fois la valeur de la tension crête. Les risques de réamorçage entre les contacts sont donc augmentés et ce d'autant plus que l'ouverture est lente. S'il y a réamorçage à la crête de tension, la capacité se décharge alors dans l'inductance du circuit créant un courant oscillatoire de tension crête $3\hat{E}$ (Fig. II.14). Si la coupure est effective au zéro de courant suivant, le condensateur reste chargé à une tension $3\hat{E}$. Le phénomène peut se poursuivre avec une tension aux bornes de l'interrupteur pouvant atteindre des valeurs de $5\hat{E}$, $7\hat{E}$, etc.

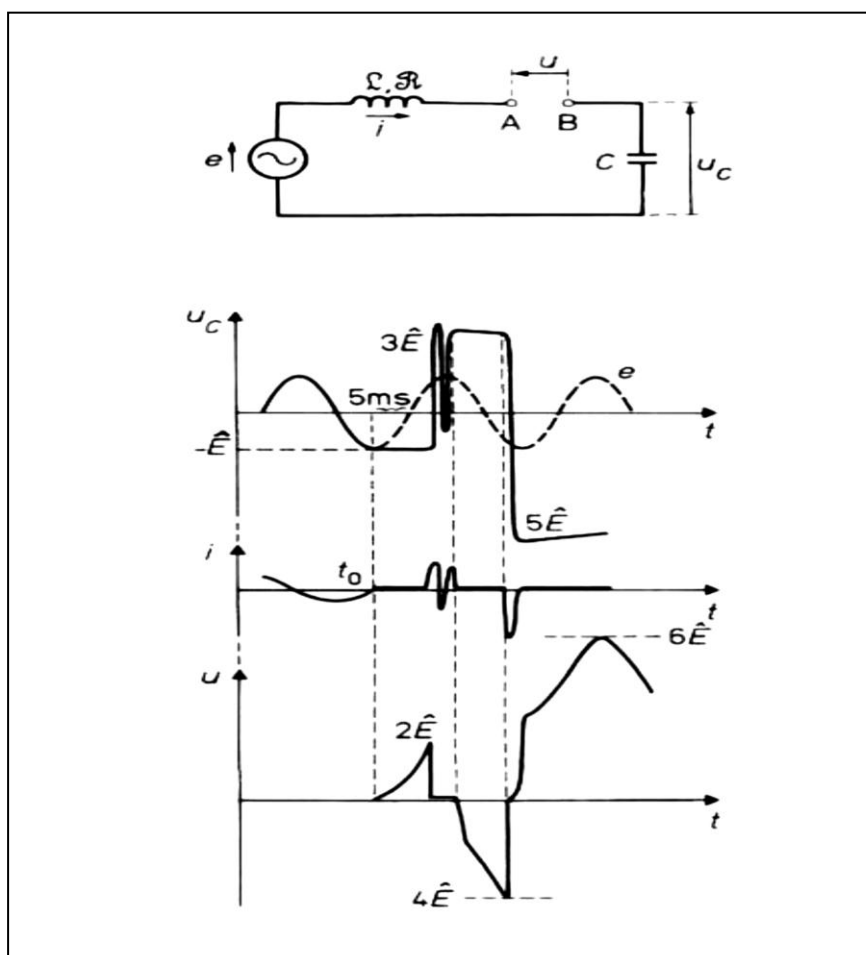


Fig. II.14 : Coupure d'un circuit capacitif

II.7.4 Coupure des courants de défaut

Dans le cas d'un court-circuit, le déphasage entre le courant et la tension est toujours très important car les réseaux sont essentiellement inductifs $0,07 \leq \cos\varphi \leq 0,15$. Lorsque le courant passe par zéro la tension du réseau est à son maximum ou presque.

En MT et en HT, le courant de court-circuit atteint quelques dizaines de milliers d'ampères, par conséquent la coupure se fait sans arrachement de courant car l'arc est très stable et comme décrit précédemment, elle se décompose en trois phases, la une période d'attente, la période d'extinction et la période post-arc [07].

II.7.5 Les défauts aux bornes aval du disjoncteur

C'est dans ces conditions que le courant de court-circuit est le plus important car il n'est limité que par les impédances situées en amont de l'appareil. Bien que ce type de défaut soit très rare, c'est celui qui est retenu pour la spécification des disjoncteurs en MT.

II.7.6 Le défaut en ligne

Ce type de défaut est plus fréquent que le précédent sur les réseaux aériens, mais en MT, les caractéristiques d'arc des disjoncteurs et des liaisons disjoncteurs/câbles/lignes font que la contrainte est inférieure à celle provoquée par un court-circuit aux bornes. Il n'existe donc pas d'essais spécifiques pour les disjoncteurs MT.

En HT ce type de court-circuit nécessite des essais particuliers pour les défauts proches car les phénomènes de réflexion d'ondes provoquent des TTR très contraignantes.

Conclusion

A travers ce deuxième chapitre, on a étudié spécialement l'interruption d'un courant alternatif et nous avons donné un aperçu sur les phénomènes qui en résultent lors de la coupure, ensuite on a analysé la coupure de quelques types de courants présentant des contraintes.

Chapitre III :
Les milieux de
coupure

III.1 Introduction

Pour couper les courants de charge ou de défaut, les constructeurs ont développé et perfectionné les appareils de coupure, disjoncteurs et contacteurs notamment, utilisant divers milieux de coupure.

Dans ce chapitre nous aborderons les techniques de coupures dans l'air, dans l'huile, dans le vide et dans l'hexafluorure de soufre (SF₆) dans le domaine de la moyenne et haute tension.

III.2 Evolution des techniques de coupure

Les techniques de coupures dans l'air et dans l'huile jouissaient en haute tension un rôle des plus considérables, mais font aujourd'hui un peu figure de techniques du passé et les deux grandes techniques de coupure actuelles sont le SF₆ et le vide. Ces techniques de coupure se sont développées simultanément en fonction des besoins à couvrir et de la disponibilité des technologies correspondantes. La figure (III.1) donne une idée sur l'évolution historique des techniques de coupure ces cents dernières années. Certaines de ces techniques sont aujourd'hui en déclin (la coupure dans l'huile) et d'autres sont en plein essor (la coupure dans le vide et dans le SF₆) [10].

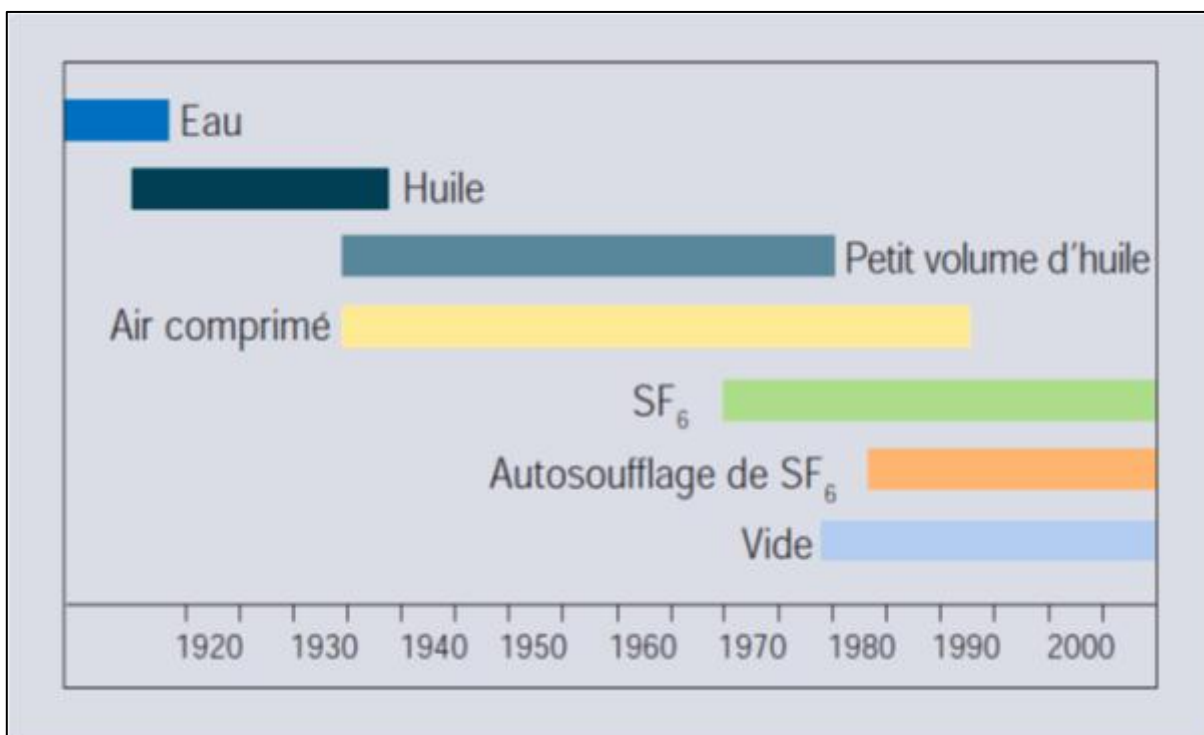


Fig. III.1: Évolution des techniques de coupure [10].

III.3 La coupure dans l'air

Les appareils utilisant la coupure dans l'air à la pression atmosphérique ont été les premiers employés. L'air à pression atmosphérique, malgré sa rigidité diélectrique relativement faible et sa constante de temps de désionisation élevée (*Fig.II.7*), peut être utilisé pour la coupure jusqu'à des tensions voisines de 20 kV. Pour cela il faut disposer d'une puissance de refroidissement suffisante et d'une tension d'arc élevée après le passage à zéro du courant pour éviter l'emballement thermique [08].

III.3.1 Mécanisme de la coupure dans l'air

Le principe retenu consiste à maintenir l'arc suffisamment court, tant que l'intensité est importante, pour limiter l'énergie dissipée, puis à l'allonger seulement à l'approche du zéro de courant. Ce principe a conduit à la création pour chaque pôle de d'appareil, une chambre de coupure. Il s'agit d'un volume situé au voisinage de l'espace inter-contacts et divisé par des plaques réfractaires (plaques à grande capacité d'accumulation d'énergie thermique), (*fig.III.2*) entre lesquelles l'arc s'étire. En pratique, lorsque le courant décroît, l'arc soumis aux efforts électromagnétiques pénètre entre ces plaques. Il s'allonge et se refroidit au contact du matériau réfractaire jusqu'à ce que sa tension d'arc devienne supérieure à celle du réseau, ainsi, la résistance d'arc augmente fortement.

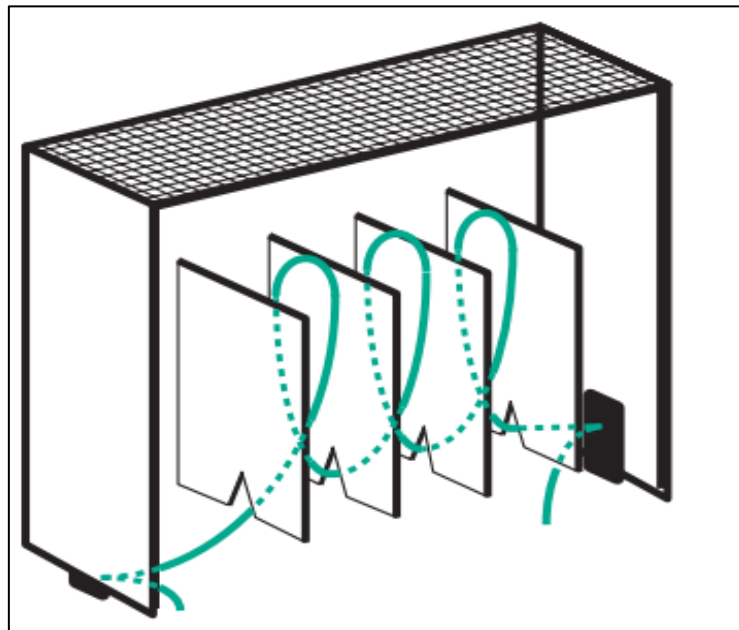


Fig.III.2 : allongement d'un arc électrique entre les plaques réfractaires en céramique d'une chambre de coupure d'un disjoncteur à coupure dans l'air [08].

Du fait de la longue constante de temps de désionisation de cette technique, l'énergie d'arc à dissiper reste élevée. En contrepartie, le risque de surtension à la coupure est quasi nul.

III.3.2 Principales caractéristiques d'un dispositif de coupure dans l'air

A des tensions dépassant 24 kV, l'air comprimé est utilisé pour améliorer la tenue diélectrique, la vitesse de refroidissement et la constante de temps de désionisation. L'arc est refroidi par des systèmes de soufflage à haute pression. Ce type d'appareil a été très utilisé dans de nombreuses applications, mais son emploi reste limité à des tensions inférieures à 24 kV.

En moyenne tension, la coupure n'est pas très utilisée pour des raisons d'encombrement et de coût. Toutefois la coupure dans l'air reste la solution la plus utilisée en basse tension grâce à sa simplicité et son endurance.

III.4 La coupure dans l'air comprimé

L'arc est refroidi par des systèmes de soufflage à haute pression (entre 20 et 40 bars). Cette technique a été utilisée pour des disjoncteurs à hautes performances ou pour des tensions élevées jusqu'à 800 kV (fig. III.3).

Cette technique a plusieurs avantages (elle réduit de manière importante les encombrements, ainsi que les coûts des appareils, la sécurité, la compacité, la fiabilité,...) et ont aujourd'hui supplanté les anciennes techniques de coupure dans l'air et dans l'huile.

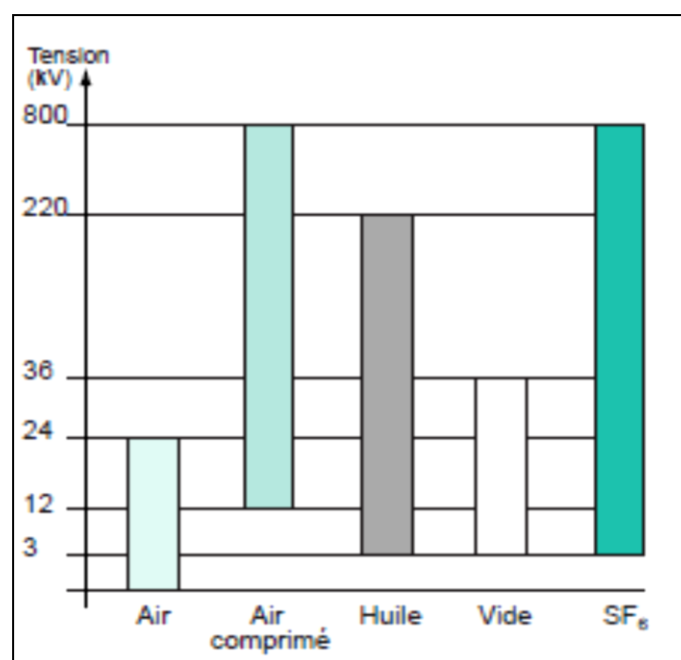


Fig.III.3 : Domaine d'utilisation des différents milieux de coupure.

III.5 La coupure dans l'huile

La coupure dans l'huile a fait son apparition lorsque, les puissances allant en croissant, il fut nécessaire d'élever la tension des réseaux. Les classiques interrupteurs à couteaux montés sur socles de marbre (fig. III.4) ne parvinrent plus à couper sous des tensions accrues et l'idée la plus simple qui vint naturellement à l'esprit consista à les plonger dans l'huile minérale que l'on utilisait déjà pour isoler les transformateurs [07].

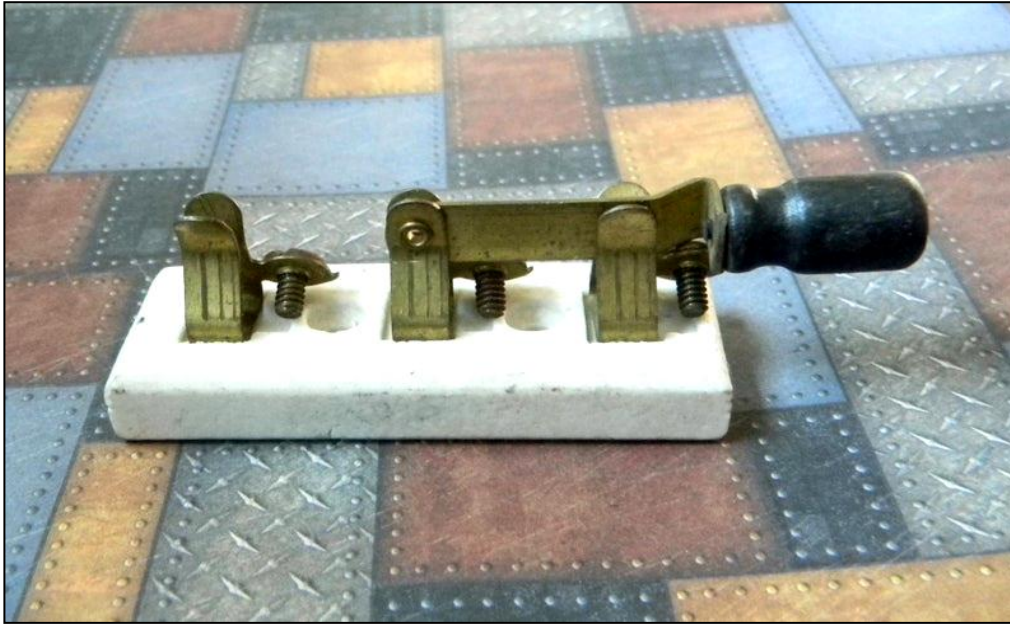


Fig.III.4 : interrupteurs à couteaux montés sur socle de marbre.

III.5.1 Principe de la coupure dans l'huile

Les contacts sont immergés dans une huile diélectrique. Lors de la séparation, l'arc provoque la décomposition de l'huile qui libère de l'hydrogène (70 %), de l'éthylène (20 %), du méthane (10%) et du carbone. Une énergie d'arc de 100 kJ produit environ 10 l de ces gaz. Ces gaz forment une bulle qui, par inertie de la masse d'huile, se trouve soumise pendant la coupure à une pression dynamique qui peut atteindre 50 à 100 bars. Quand le courant passe par zéro, le gaz se détend et souffle l'arc qui s'éteint [08].

C'est l'hydrogène obtenu par décomposition de l'huile qui sert de milieu d'extinction. C'est un bon agent extincteur grâce à ses propriétés thermiques et à sa constante de désionisation meilleure que celle de l'air, en particulier à pression élevée.

III.5.2 Différentes technologies de coupure dans l'huile

III.5.2.1 Disjoncteurs à grand volume d'huile

Dans les premiers appareils utilisant l'huile, l'arc se développait librement entre les contacts créant des bulles de gaz non confinées (*Fig. III.5*). Afin d'éviter des amorçages entre phases ou entre bornes et masse, ces bulles ne doivent en aucun cas atteindre la cuve ou se rejoindre (*Fig.III.6*).

Les appareils dimensionnés en conséquence, atteignent des dimensions extrêmement grandes. Outre l'encombrement, ces appareils ont de nombreux inconvénients tels que le manque de sécurité à cause de l'hydrogène produit qui s'accumule sous le couvercle et la maintenance élevée nécessaire pour veiller à la pureté de l'huile et au maintien de ses propriétés diélectriques. Pour parer ces inconvénients (manque de sécurité, appareils encombrants), les constructeurs ont créé les disjoncteurs à faible volume d'huile.

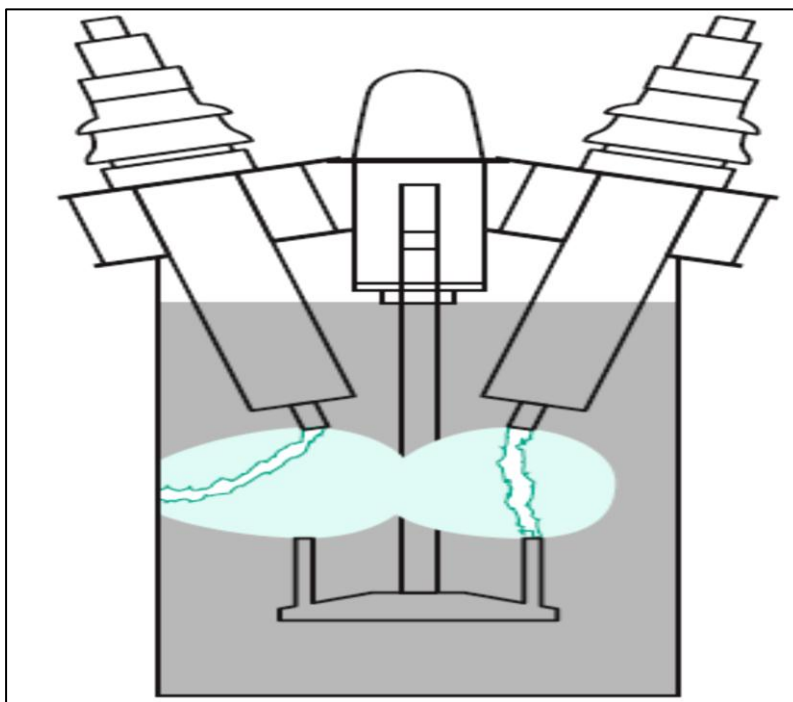


Fig. III.5 : Bulles de gaz à l'origine d'un défaut phase masse lors d'une coupure dans un disjoncteur à grand volume d'huile [02].

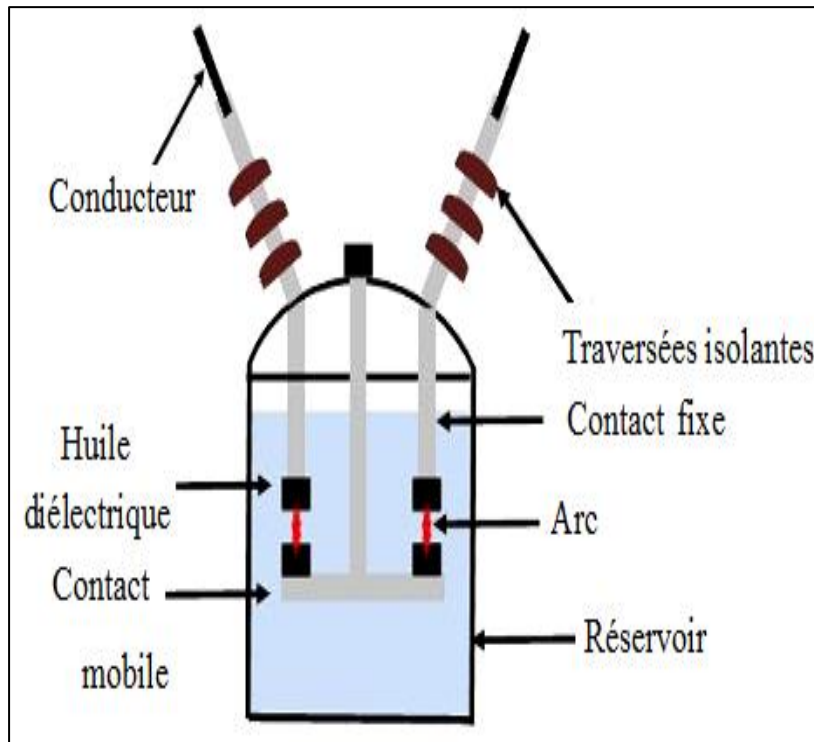


Fig. III.6 : Disjoncteurs à grand volume d'huile.

III.5.2.2 Disjoncteurs à faible volume d'huile

L'arc et la bulle sont confinés dans un pot de coupure isolant. La pression du gaz augmente lors du passage de l'arc dans une succession de chambres puis, quand le courant passe par zéro, se détend à travers une buse sur la zone d'arc. Celui-ci est alors énergiquement balayé, ce qui assure la restauration des propriétés diélectriques inter-contacts.

Cependant malgré la réduction du volume d'huile, cette technique présente encore certains inconvénients :

- La décomposition de l'huile n'est pas réversible.
- La dégradation de l'huile et l'usure des contacts détériorent la tenue diélectrique entraînant des coûts supplémentaires de maintenance.
- En cas de refermeture rapide le pôle reste à pression élevée et son pouvoir de coupure diminue.
- Le risque d'explosion et d'inflammation n'est pas complètement écarté.

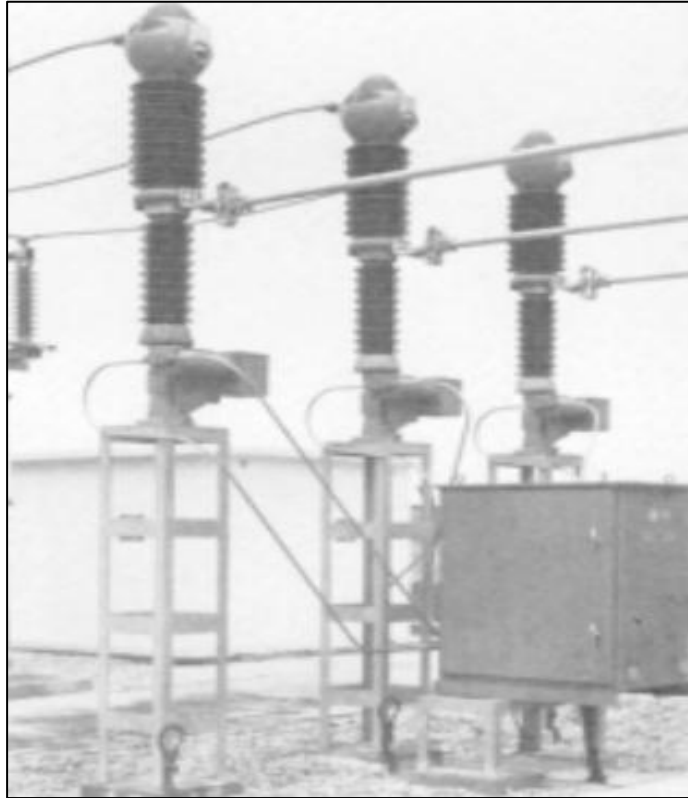


Fig. III.7 : Disjoncteurs à faible volume d'huile 72 kV. [11]

III.5.3 Les domaines d'application de la coupure dans l'huile

Cette technique de coupure a été très employée dans les réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique. Progressivement elle est supplantée par les techniques de coupure dans le vide et dans le SF₆, ces techniques qui ne présentent pas les inconvénients présentés dans les paragraphes précédents.

III.6 La coupure dans le vide

Avec le vide, nous abordons maintenant une technique tout à fait originale dont les propriétés d'interruption ont été clairement mises en évidence dès 1920 ; il a fallu pourtant attendre 1950 pour que les premiers interrupteurs fussent commercialisés et si en 1960, un grand constructeur américain proclama avec vigueur que cette technique allait connaître un développement à court terme, il faut reconnaître que cette prédiction s'est réalisée avec un grand retard [07].

III.6.1 Propriétés diélectrique dans le vide

En premier lieu, la remarquable rigidité diélectrique du vide n'est pas due, comme dans les autres milieux, aux multiples causes de ralentissement qui peuvent subir des électrons lors de collisions inélastiques avec des molécules du gaz mais, au contraire, au fait qu'il ne se produit pas de collision.

Dans un vide parfait, il n'existe donc pas de possibilité de déclencher par ionisation en cascade le mécanisme d'avalanche électronique qui entraîne la perforation diélectrique. Dans la pratique, l'imperfection des vides réels et surtout la présence des électrodes viennent tempérer cette vision idéale, mais les performances demeurent cependant spectaculaires et un intervalle d'un centimètre par exemple, dans un vide de l'ordre de 10^{-6} mm Hg, est capable de résister à une tension de crête voisine de 200kV.

Toutefois, à l'inverse des autres milieux, la tenue diélectrique du vide augmente peu avec la distance d'isolement, ce qui limite la tension applicable à chaque intervalle de coupure, indépendamment des problèmes que soulève l'inévitable production de rayons X lorsque la tension s'élève [08].

III.6.2 Le mécanisme de coupure dans le vide

Les disjoncteurs de moyenne tension utilisent des ampoules sous vide encapsulées dans des pôles de résine. L'encapsulage de l'ampoule dans la résine rend les pôles du disjoncteur particulièrement robustes et protège l'ampoule contre les chocs, les dépôts de poussière et d'humidité. L'ampoule sous vide renferme les contacts et constitue la chambre de coupure.

III.6.3 La coupure du courant dans le vide

Le disjoncteur sous vide n'a pas besoin d'un moyen de coupure et d'un isolant. En effet l'ampoule ne contient aucune matière ionisable.

Lors de l'ouverture des contacts, il y a quand même la génération d'un arc électrique, formé exclusivement par la fusion et la vaporisation du matériau des contacts. L'arc électrique reste soutenu par l'énergie extérieure tant que le courant ne s'annule pas à proximité du zéro naturel.

Au même instant, la réduction soudaine de la densité de charge transportée et la condensation rapide de la vapeur métallique, porte à un rétablissement rapide des propriétés diélectriques.

L'ampoule sous vide rétablit donc la capacité isolante et la capacité de soutenir la tension transitoire de retour en éteignant définitivement l'arc. Etant donné que dans le vide il est possible d'atteindre

une rigidité diélectrique élevée même à des distances minimales, la coupure du circuit est aussi garantie quand la séparation des contacts se produit en l'espace de quelques millisecondes avant le passage du courant par le zéro naturel.

III.6.4 Principe de coupure des ampoules

- **L'arc électrique dans le vide**

La colonne d'arc est composée de vapeurs métalliques et d'électrons provenant des électrodes à la différence des autres techniques de coupure évoquée précédemment pour lesquelles cette colonne est principalement composée du gaz inter contacts ionisé par collisions.

L'arc peut avoir deux aspects, concentré ou diffus, selon l'intensité du courant qui le traverse :

- Pour des valeurs élevées du courant (≥ 10 kA) l'arc est unique et concentré comme dans les fluides traditionnels.
- Pour des valeurs de courant inférieures à quelques milliers d'ampères, cet arc se trouve sous forme diffuse. Il est composé de plusieurs arcs séparés les uns des autres.

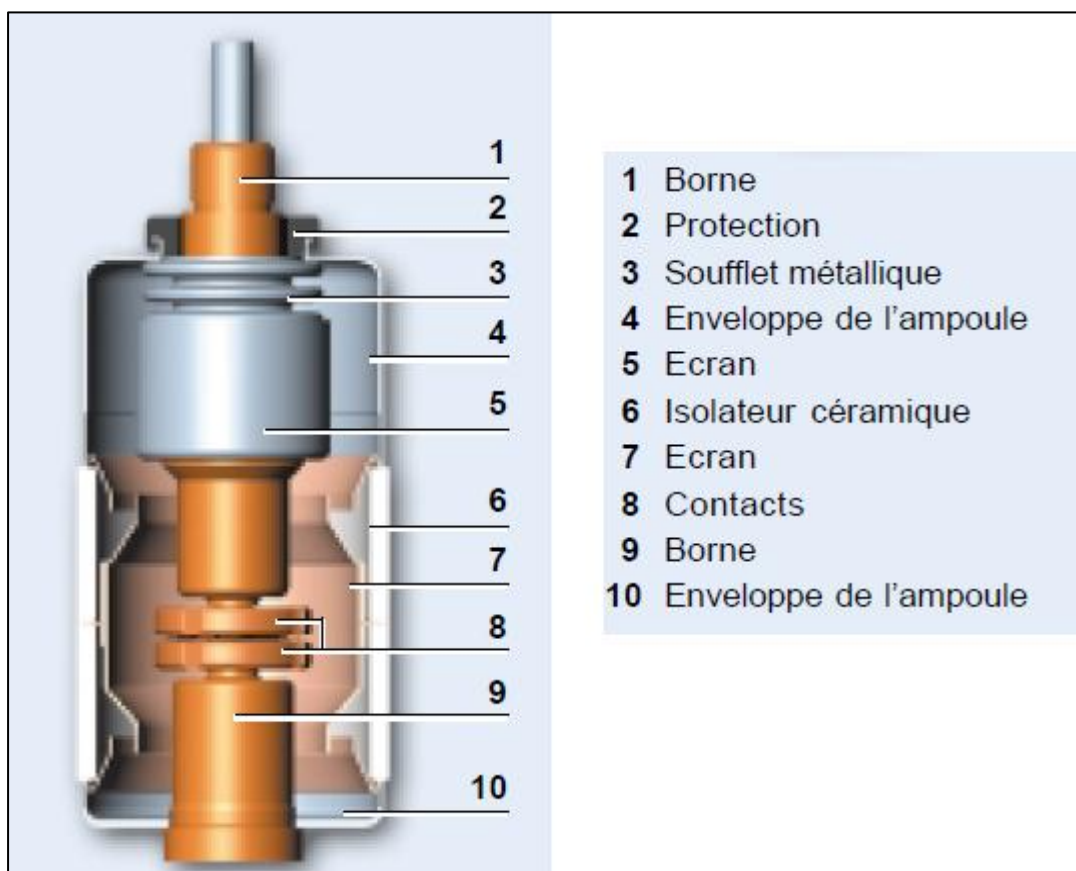


Fig. III.8 : Ampoule sous vide d'un disjoncteur à vide. [12]

III.6.5 Les domaines d'application de la coupure dans le vide

C'est en MT que cette technique est la plus employée : des disjoncteurs d'usage général sont maintenant disponibles pour les différentes applications avec tous les pouvoirs de coupure habituels (jusqu'à 63 kA). Ils sont utilisés pour la protection et la commande : [08]

- des câbles et des lignes aériennes,
- des transformateurs,
- des condensateurs en batterie unique,
- des moteurs et inductances shunt.

Ils sont particulièrement adaptés à la commande des fours à arc (haute endurance électrique) mais doivent être utilisés avec précaution pour la commande de gradins de condensateurs en parallèle. Cette technique est aussi utilisée pour les contacteurs qui requièrent une grande endurance, rarement pour les interrupteurs pour des raisons économiques.

En basse tension, l'usage de cette technique reste marginal pour des raisons de coût et d'absence de pouvoir limiteur. D'une manière générale, en BT son emploi est limité aux courants assignés compris entre 800 et 2500 A et pour des pouvoirs de coupure inférieurs à 75 kA. En HT ($U \geq 50$ kV) l'usage de cette technique reste du domaine prospectif.

III.7 Coupure dans l'hexafluorure de soufre

Le SF₆ mérite bien que nous lui accordions une attention particulière car il est véritablement devenu aujourd'hui le gaz des constructeurs d'appareillages grâce à ses nombreuses qualités chimiques et diélectriques.

III.7.1 La molécule de SF₆

Gaz de synthèse obtenu par la réaction directe du fluor sur le soufre à hautes pressions et température, l'hexafluorure de soufre se présente à la température ordinaire comme un gaz incolore et inodore qui possède une densité relative élevée par rapport à l'air, du fait de sa masse moléculaire importante (146 contre 28 et 32 pour l'azote et l'oxygène).

La molécule, parfaitement symétrique, comporte en son centre un atome de soufre dont les six électrons de valence, qui constituent les liaisons libres, sont utilisés par six atomes de fluor pour compléter leur couche électronique périphérique. Ces six atomes de fluor se trouvent disposés autour de l'atome de soufre aux six sommets d'un octaèdre régulier (*fig.III.9*). Cet édifice, dont toutes les liaisons chimiques sont saturées, se révèle de ce fait particulièrement inerte chimiquement et présente une grande stabilité concrétisée par une énergie de formation élevée (1 096 kJ/mol) [07].

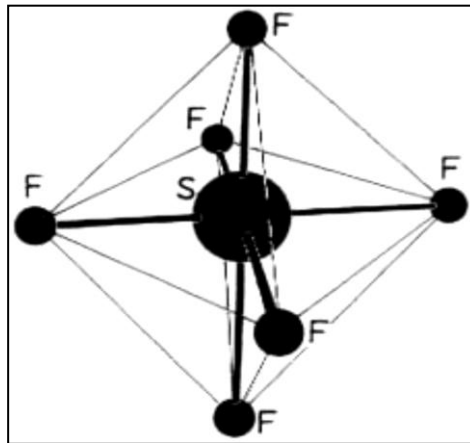


Fig.III.9: La molécule de SF₆. [07].

III.7.2 Propriétés diélectrique de SF₆

La première des qualités de SF₆, pour un constructeur d'appareillages, se manifeste dans le domaine de la rigidité diélectrique. La figure (III.10) montre qu'à pressions égales, la rigidité du SF₆ est supérieure à celle de l'air et pour une pression de 5 bars, sa rigidité est supérieure à celles de la plupart des milieux connus. Il doit cet avantage à la dimension élevée de sa molécule et aux multiples mécanismes de collisions inélastiques qui lui permettent de ralentir efficacement les quelques électrons libres, toujours présents, que le champ électrique tend à accélérer et qui constituent les germes de la décharge.

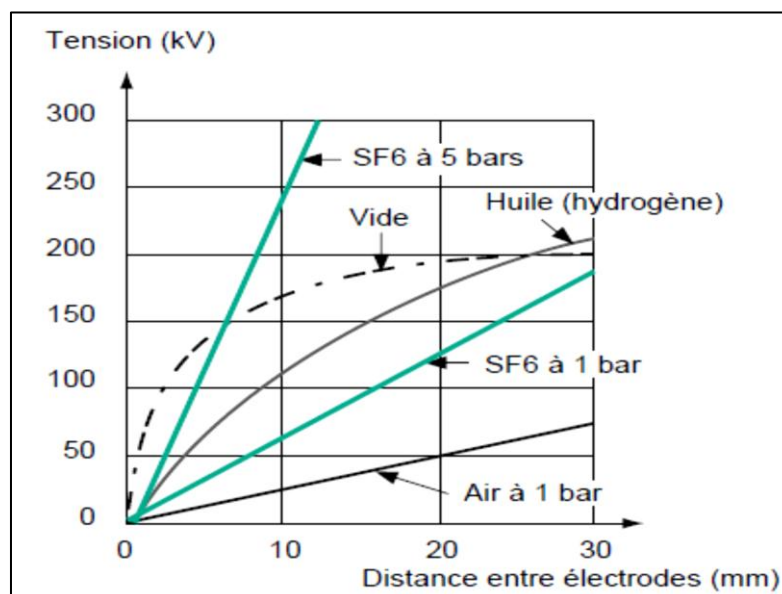


Fig.III.10 : Evolutions de la tension de claquage du SF₆ en fonction de la distance entre les contacts et en fonction de la de la pression.

III.7.3 Conductivité thermique du SF₆

La conductivité thermique du SF₆ est inférieure à celle de l'air, mais son coefficient global de transfert de chaleur, tenant compte en particulier de la convection, est excellent, voisin de celui des gaz comme l'hydrogène ou l'hélium et plus élevé que celui de l'air.

À haute température, la courbe de conductivité thermique du SF₆ (Fig. III.11) souligne l'une des qualités remarquables de ce gaz concernant l'extinction de l'arc par refroidissement thermique. Le pic de conductivité thermique correspond à la température de dissociation de la molécule de SF₆ (2100 à 2500 K) qui s'accompagne, lors de la reformation de la molécule à la périphérie de l'arc, d'une absorption importante de chaleur favorisant les échanges rapides de chaleur du milieu chaud vers le milieu froid [13].

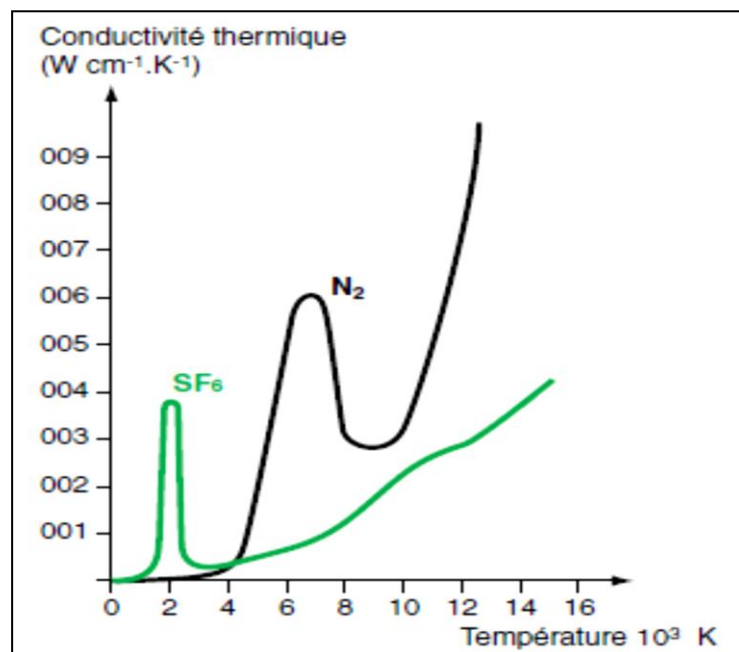


Fig. III.11: Conductivité thermique du SF₆ et de l'azote [13].

III.7.4 Constante de temps d'arc dans le SF₆

Contrairement à ce que l'on observe avec les gaz précédemment employés (N₂, O₂, H₂), la constante de temps de désionisation de SF₆ décroît sans cesse lorsque le courant diminue, au voisinage du zéro de courant (fig.II.7).

III.7.5 Principe de fonctionnement du disjoncteur à gaz SF₆

Dans les conditions normales de fonctionnement, les contacts du disjoncteur sont fermés. Quand un défaut a lieu, dans le réseau électrique, les contacts sont séparées, et il y'a apparition de l'arc électrique entre eux. Le déplacement du contact mobile est synchronisé avec la valve qui fait pénétrer du gaz SF₆ sous pression dans la chambre de coupure. Le gaz SF₆ absorbe les électrons libres dans le canal d'arc et forme des ions lourds de faible mobilité. Ces ions font augmenter la rigidité diélectrique du gaz et par conséquent l'arc s'éteint [14].



Fig.III.12 : Disjoncteur à cuve sous tension pour un pouvoir de coupure de 40 kA sous 170 kV.

III.7.6 Inconvénients de la technique de coupure dans le gaz SF₆

- Le SF₆ se liquéfie à des pressions élevées ce qui lui fait perdre de ses qualités.
- D'un point de vue environnemental, le SF₆ est l'un des gaz à effet de serre fluorés référencés comme les plus nocifs. L'exploitant des appareillages de connexion à haute tension est responsable du respect de la législation et doit mettre en place des mesures de récupération du SF₆ lors de toute intervention de maintenance, de démontage d'un appareil, par un personnel certifié, en vue de son recyclage, de sa régénération ou de son incinération [14].

III.7.7 Les techniques de coupure de demain

Dans tous les types de disjoncteurs, la maîtrise de l'arc électrique a donné lieu à de nombreuses études et découvertes au cours des cent dernières années. L'industrie électrique fait largement appel à l'électronique de puissance et pour l'appliquer aux disjoncteurs, ses performances doivent être considérablement améliorées. Si l'état de l'art dans le domaine des semi-conducteurs de puissance permet, en théorie du moins, de concevoir des disjoncteurs, la solution serait extrêmement complexe. Un disjoncteur 100 % électronique ne serait-t-il pas d'ailleurs plus compétitif sur le marché actuel.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné un aperçu sur les différentes techniques de coupure en précisant leurs principales caractéristiques, leurs avantages et leurs inconvénients.

Pour la MT, où toutes les techniques peuvent être utilisées, celles dans le vide et dans le SF6 ont des performances comparables, mais en THT, la technique de coupure dans le SF6 est pratiquement la seule mise en œuvre.

*Chapitre IV : Simulation de
la coupure d'un courant de
défaut proche en ligne -
utilisation du modèle de
Schwarz -*

IV.1 Introduction

Les modèles d'arc ont été initialement conçus et développés pour une meilleure compréhension du processus d'interruption de courant par les disjoncteurs à haute tension et d'être en mesure de modéliser le comportement dynamique de l'arc électrique dans la chambre de coupure.

Les modèles d'arc à boîte noire sont basés sur des données observées. Le circuit extérieur voit l'arc comme une résistance (ou une conductance) qui varie avec le temps et avec d'autres variables physiques. Le modèle de Schwarz est parmi les modèles d'arc à boîte noire les plus utilisés par les chercheurs.

Pour démontrer la capacité de coupure et d'établissement du courant par les disjoncteurs à haute tension, des essais sont exigés dans les laboratoires, grande puissance. Parmi ces essais, l'essai de coupure du défaut proche en ligne qui se produit sur une ligne à quelques centaines de mètres ou quelques kilomètres en aval du disjoncteur.

Dans ce chapitre on va faire la simulation de la coupure d'un défaut proche en ligne par un disjoncteur SF6 HT, en utilisant le modèle de Schwarz. Ce travail est composé de trois étapes :

- 1/Conception du disjoncteur dans le Simulink de MATLAB en utilisant le modèle de Schwarz.
- 2/Conception du circuit d'essai dans le Simulink de MATLAB.
- 3/La simulation de la coupure d'un défaut proche en ligne.

IV.2 Essais d'un défaut proche en ligne

Dans le cas d'un défaut kilométrique, le défaut se produit sur la ligne de transmission à quelques centaines de mètres ou quelques kilomètres en aval du disjoncteur, d'où le nom de défaut kilométrique qui est parfois donné à ce type de défaut. Il est considéré comme l'un des défauts les plus sévères à interrompre par un disjoncteur. La figure (IV.1) représente une situation typique du défaut proche en ligne monophasé :

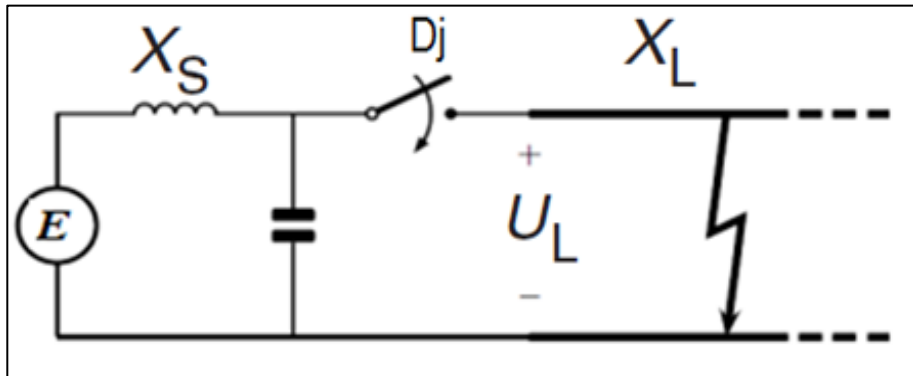


Fig. IV.1 : situation typique du défaut proche en ligne [15].

La longueur de la ligne détermine l'amplitude du courant de court-circuit proche en ligne, la réactance de la ligne X_L augmente avec la longueur de la ligne, donc plus la longueur de la ligne est longue, plus le courant de court-circuit est réduit. La longueur de la ligne est exprimée en pourcentage qui indique la réduction du courant de court-circuit à comparer avec le cas où la ligne est absente (défaut aux bornes) [15].

C représente la capacité du circuit en amont du disjoncteur.

$$\text{Défaut proche en ligne (\%)} = \frac{X_S}{X_S + X_L} \tag{IV.1}$$

Par exemple un défaut proche en ligne à 90% indique que la ligne réduit la valeur maximale du courant de court-circuit de 10% par rapport au courant de défaut aux bornes.

$$U_L = L_{\text{ligne}} \frac{di}{dt} \tag{IV.2}$$

La figure suivante montre l'influence de la longueur de la ligne sur le courant et sur la TTR

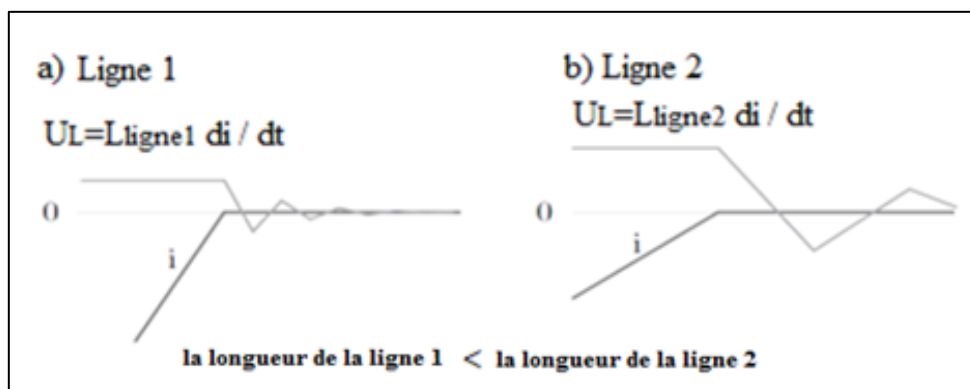


Fig. IV.2 : L'effet de la longueur de la ligne sur le courant et sur la TTR [15].

Chapitre IV Simulation de la coupure d'un courant de défaut proche en ligne - utilisation du modèle de Schwarz -

Les ondes électromagnétiques prennent beaucoup de temps à voyager dans des lignes longues, ce qui fait augmenter le niveau de la TTR, en contrepartie une ligne longue réduit le courant de court-circuit, ces effets contradictoires, obligent des essais de défaut proche en ligne.

Il n'est pas pratique d'utiliser des lignes réelles pour des buts d'essais de court-circuit car cela entraîne des équipements volumineux et chers, c'est pourquoi le laboratoire, grande puissance de KEMA utilise des lignes artificielles construites par des éléments oscillants [16].

Pour simuler la coupure d'un défaut proche en ligne, on utilise le circuit d'essai de la figure(IV.3), c'est une version simplifiée du circuit d'essai utilisé par KEMA.

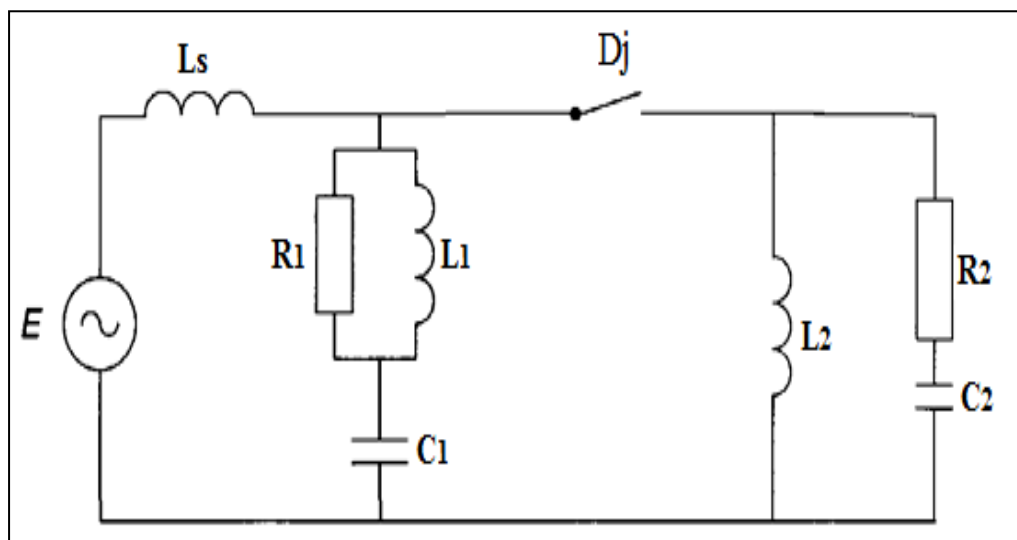


Fig. IV.3 : une version simplifiée du circuit d'essai utilisé par KEMA [16].

- **Circuit côté source :**

Le circuit d'essai utilisé pour représenter le système de puissance côté source (à gauche du disjoncteur) est représenté sur la figure (IV.4).

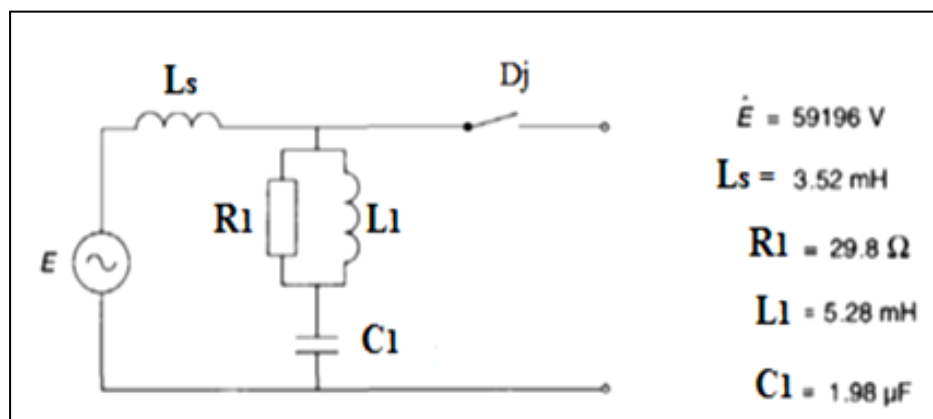


Fig. VI.4 : circuit côté source. [16]

E la tension du réseau

L_s inductance du circuit côté source.

- **Circuit à droite du disjoncteur**

Le circuit à droite du disjoncteur représente la ligne artificielle.

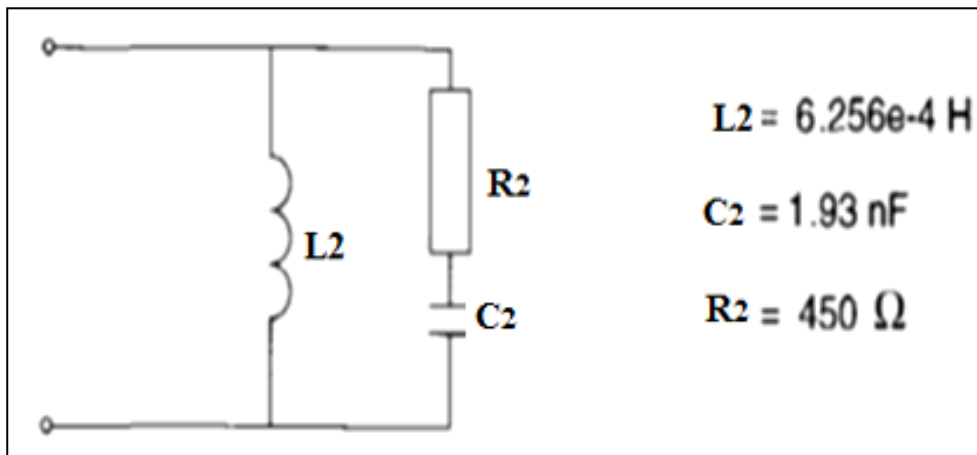


Fig. IV.5 : circuit à droite du disjoncteur. [16]

IV.3 Description du modèle de Schwarz

Le modèle de Schwarz décrit l'évolution dynamique de l'arc par une équation mathématique donnant la variation de la conductance électrique dans le temps en fonction du courant et la tension de l'arc [17].

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln(g)}{dt} = \frac{1}{\tau_0 g^a} \left(\frac{ui}{P_0 g^b} - 1 \right) \quad (\text{IV.1})$$

La constante de temps et la puissance de refroidissement sont des fonctions de la conductance de l'arc :

$$\tau = \tau_0 g^a \quad (\text{IV.2})$$

$$P = P_0 g^b \quad (\text{IV.3})$$

Chapitre IV Simulation de la coupure d'un courant de défaut proche en ligne - utilisation du modèle de Schwarz -

Avec :

g : la conductance de l'arc.

u : la tension de l'arc ;

i : le courant de l'arc ;

τ : la constante de temps de l'arc ;

P : la puissance de refroidissement ;

P_0 : la puissance de refroidissement constante ;

a : le paramètre qui influe sur τ en fonction de g .

b : le paramètre qui influe sur P en fonction de g .

IV.4 Implantation du modèle de Schwarz dans le Simulink de MATLAB

$$x_1 = \frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln(g)}{dt} = \frac{u(2)}{g^a \tau_0} \left(\frac{ui}{P_0 g^b} - 1 \right) \quad (\text{IV.4})$$

Les entrées du modèle :

$u(1)$: C'est la première entrée et égale à la tension u de l'arc.

$u(3)$: C'est la deuxième entrée et représente la séparation de contact du disjoncteur.

Lorsque :

✓ $U(2)=0 \Rightarrow$ (les contacts sont fermés)

✓ $U(2)=1 \Rightarrow$ (les contacts s'ouvrent)

La sortie du modèle :

$$y = i = u.g \quad (\text{IV.5})$$

La variable d'état :

$U(3)$ est la variable d'état de l'équation différentielle,

$$u(3) = \ln g$$

Chapitre IV Simulation de la coupure d'un courant de défaut proche en ligne - utilisation du modèle de Schwarz -

$$e^{u(3)} = e^{lng} \Rightarrow g = e^{u(3)}$$

La sortie peut être écrite :

$$y=i=u \cdot g \Rightarrow i=u(1) * e^{u(3)}$$

$$\frac{du(3)}{dt} = \frac{u(2)}{\tau[e^{u(3)}]^\alpha} * \left[\frac{[u(1)]^2 * [e^{u(3)}]}{P * [e^{u(3)}]^\beta} - 1 \right] \tag{IV.6}$$

$$u(3) = \int_0^t \frac{du(3)}{dt} dt = \int_0^t \frac{u(2)}{\tau[e^{u(3)}]^\alpha} * \left[\frac{[u(1)]^2 * [e^{u(3)}]}{P * [e^{u(3)}]^\beta} - 1 \right] dt$$

La conductance g du modèle d'arc de Schwarz est limité à 10^{-10} afin d'éviter les erreurs de calcul [18].

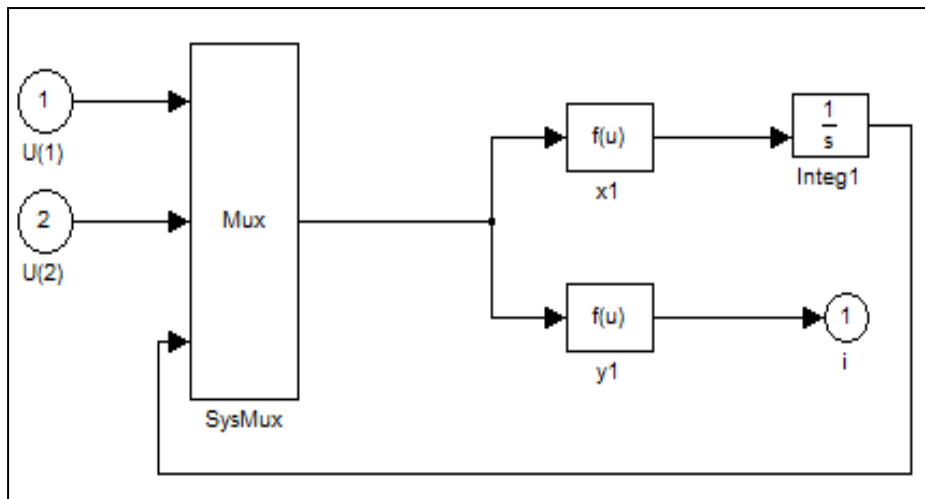


Fig. IV.6 : Système d'équation de modèle Schwarz

On crée un sous-système avec deux entrées et une sortie, comme le montre la figure (IV.7)

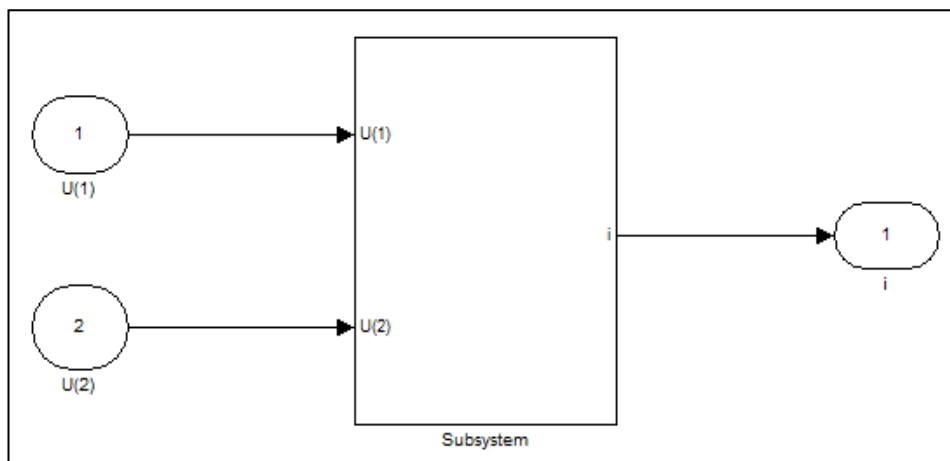


Fig. IV.7 : Le bloc subsystem du modèle.

Chapitre IV Simulation de la coupure d'un courant de défaut proche en ligne - utilisation du modèle de Schwarz -

On ajoute au sous-système ci-dessus les blocs de Simulink suivants (Fig.IV.8):

- **Voltage measurement** : pour mesurer la tension de l'arc.
- **Controlled current source**: Ce bloc convertit le signal d'entrée Simulink en une source de courant équivalent. Le courant généré est entraîné par le signal d'entrée du bloc.
- **Hit crossing** : Ce bloc est utilisé pour détecter le zéro du courant, en ajustant le pas, le bloc assure que la simulation trouve le point de passage du courant par zéro. Ceci est important pour la coupure.
- **Step** : Ce bloc est utilisé pour contrôler l'état des contacts du disjoncteur, Soit les contacts sont fermés ou ouverts.

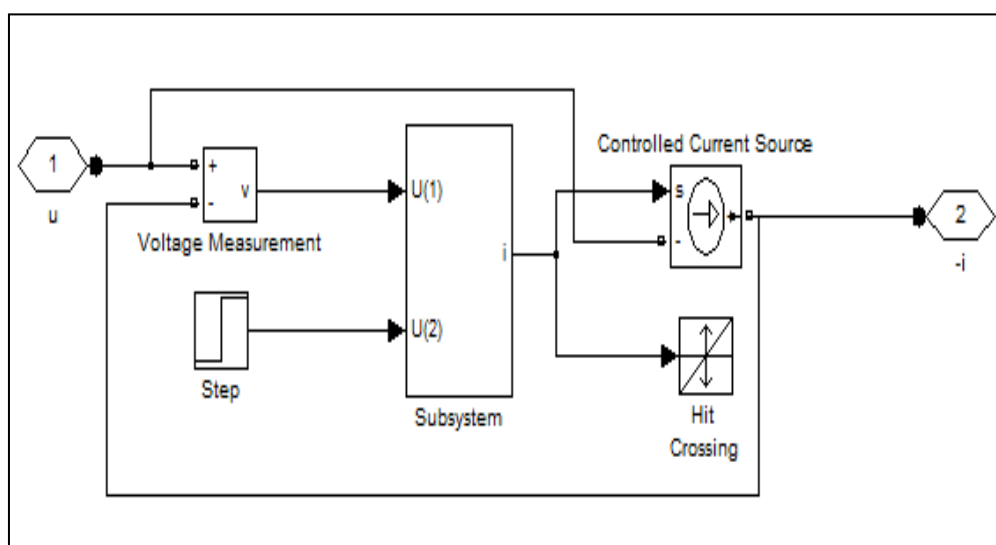


Fig. IV.8 : Le bloc du modèle de Schwarz.

Après avoir terminé cette étape, on a créé un sous-système qu'on a nommé «Schwarz arc model» fig. (IV.4) et qu'on a inséré dans le circuit d'essai fig. (IV.9).

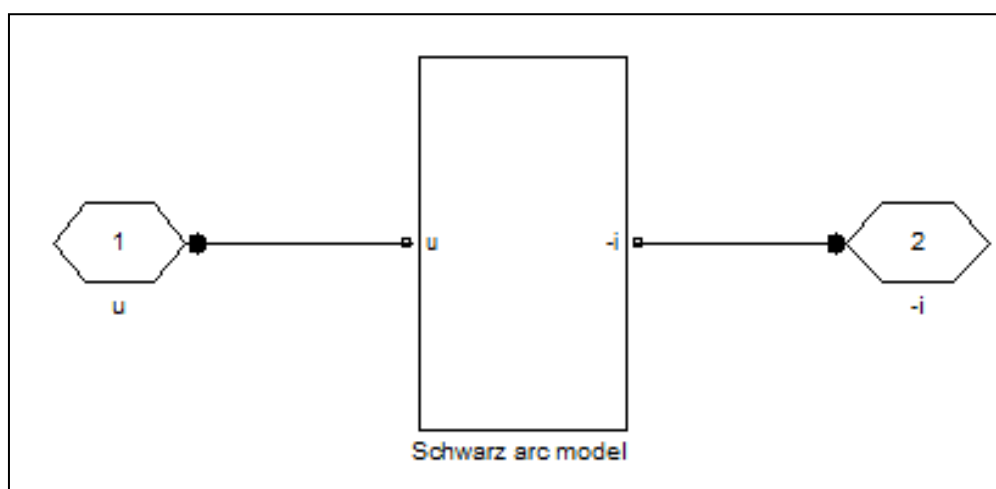


Fig. IV.9 : Subsystem de modèle de Schwarz.

Chapitre IV Simulation de la coupure d'un courant de défaut proche en ligne - utilisation du modèle de Schwarz -

Avec Edit Blok on édite les paramètres de notre modèle.

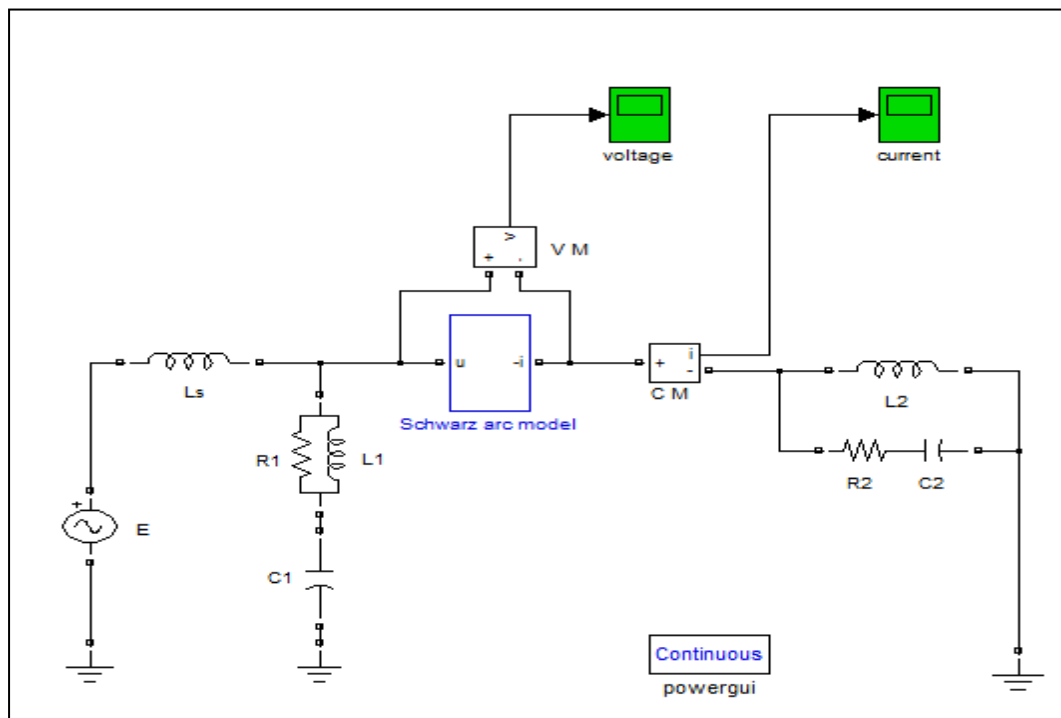


Fig. IV.10: Modèle de Schwarz inséré dans le circuit d'essai.

La figure (IV.10) représente le circuit d'essai

Les paramètres du circuit d'essai sont :

$E = 59196$ V (amplitudes maximales) phase 90° , la fréquence 60 Hz.

$L_S = 3.52 \cdot 10^{-3}$ H.

$R_1 = 29.8 \Omega$.

$L_1 = 5.28 \cdot 10^{-3}$ H.

$C_1 = 1.98 \mu\text{F}$.

$R_2 = 450 \Omega$.

$L_2 = 6.256 \cdot 10^{-4}$ H.

$C_2 = 1.93$ nF.

IV.5 Simulations numériques

On ouvre la boîte de dialogue du modèle et on introduit les paramètres du modèle de Schwarz comme le montre la figure (IV.11) [19].

Chapitre IV Simulation de la coupure d'un courant de défaut proche en ligne - utilisation du modèle de Schwarz -

$$\tau = 11\mu\text{s} ;$$

$$P = 2000000 \text{ W} ;$$

$$a = 0.59 ;$$

$$b = 0,523 ;$$

L'instant de séparation des contacts qu'on a choisi égale à $t = 0.001$ [s] et la valeur initiale de la conductance d'arc $g_0 = 10^4$ [S].

Une fois toutes les données sont introduites, on peut lancer la simulation.

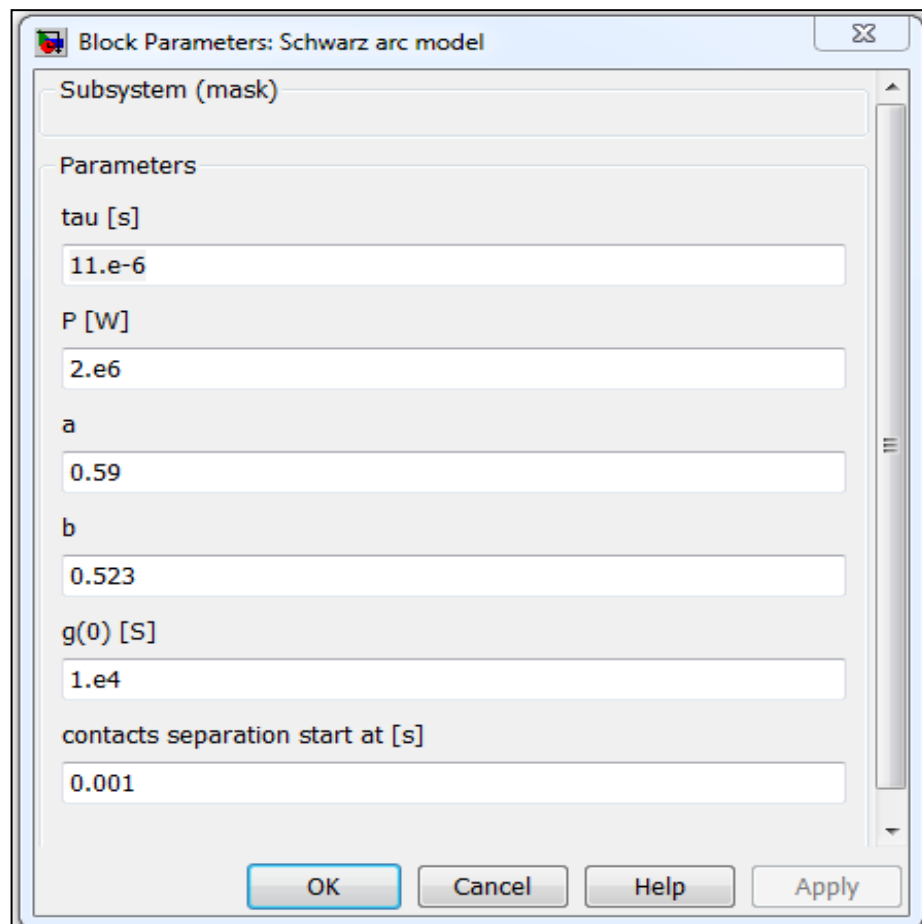


Fig. IV.11: Boite de dialogue du modèle Schwarz.

IV.6 Les résultats de la simulation

Les figures (IV.12, IV.13) représentent respectivement la tension et le courant simulés de l'arc.

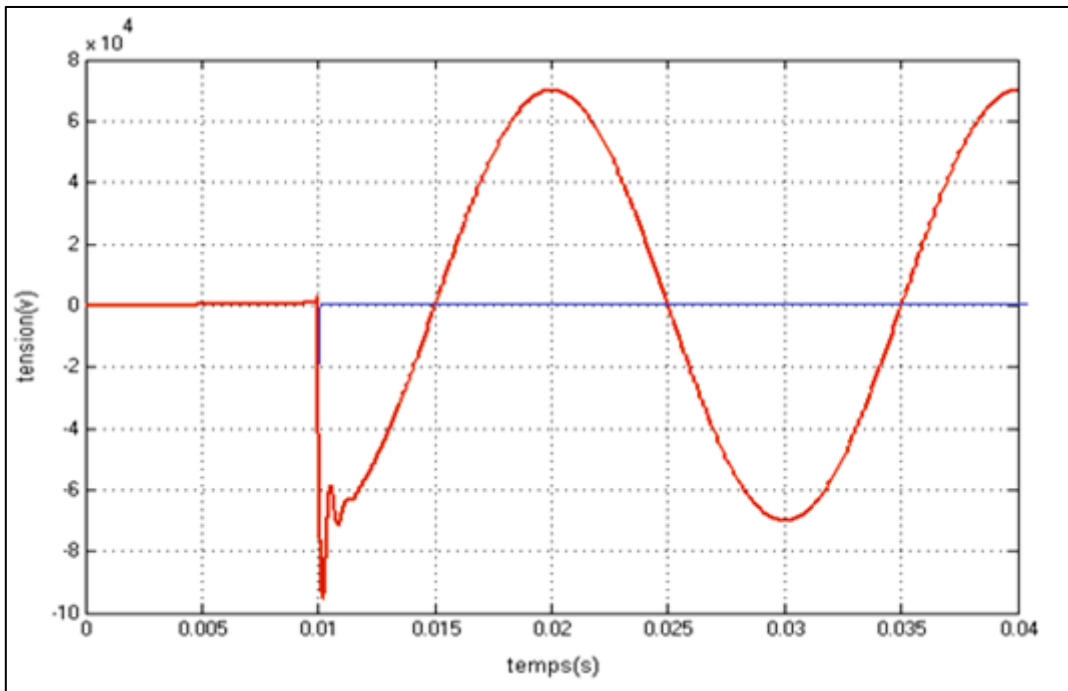


Fig. IV.12: Tension simulée par le modèle de Schwarz.

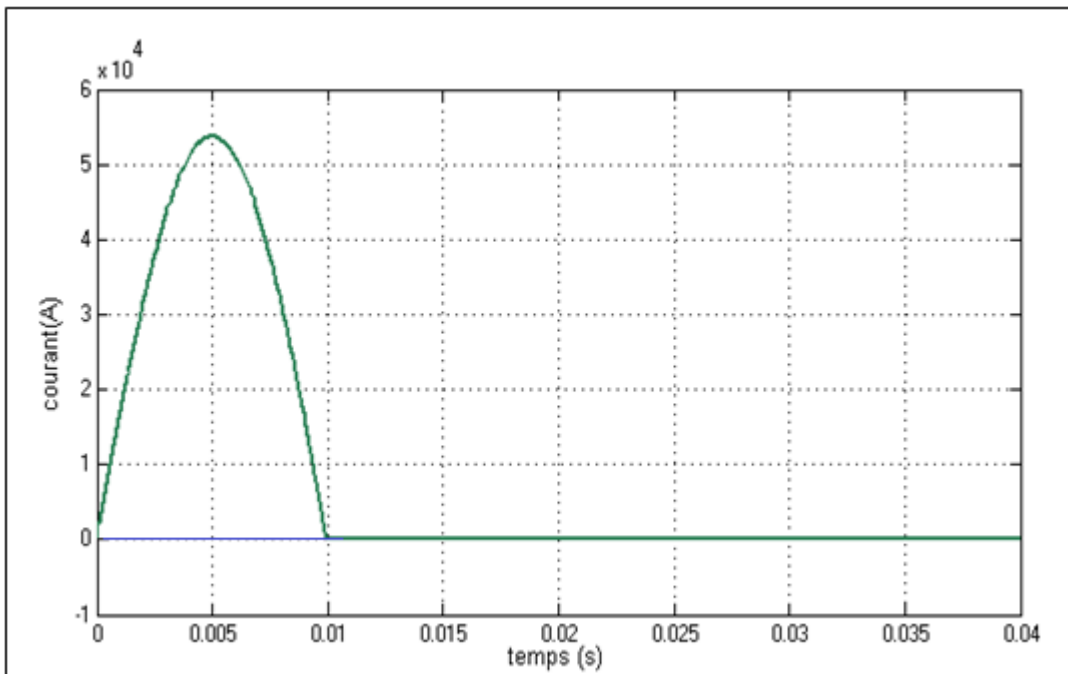


Fig. IV.13: Courant simulée par le modèle de Schwarz.

Chapitre IV Simulation de la coupure d'un courant de défaut proche en ligne - utilisation du modèle de Schwarz -

En faisant un agrandissement au voisinage du zéro du courant, on observe :

- ✓ Un faible courant post-Arc de : -0.2 A

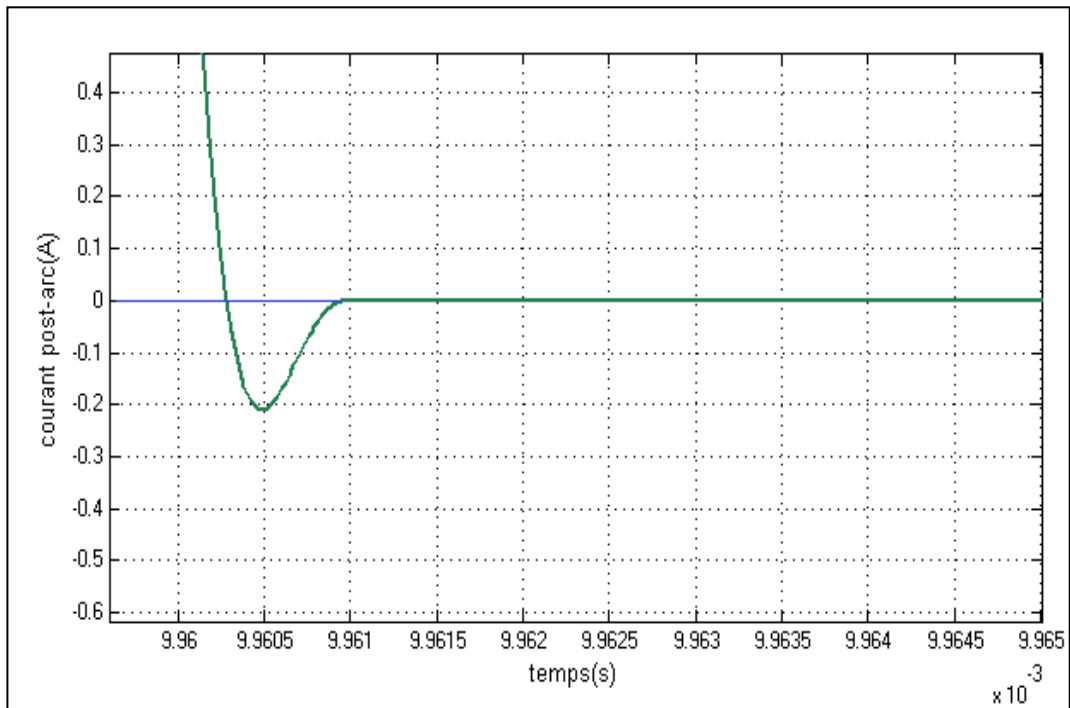


Fig. IV.14: Courant post arc.

- Une TTR maximale de : -97kV.
- Un pic d'extinction de : 9.855kV.

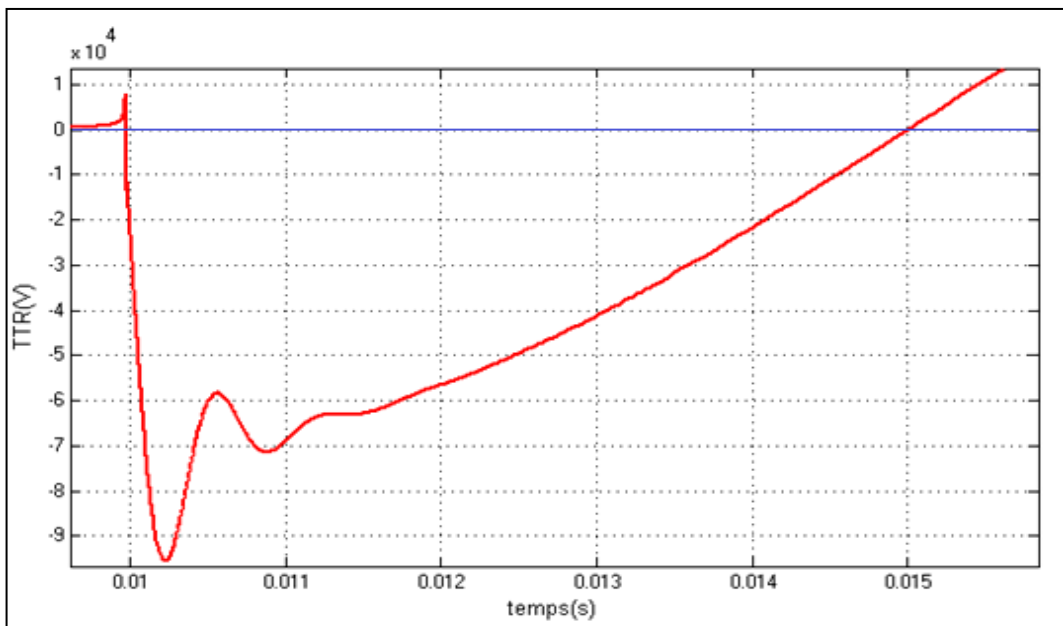


Fig. VI.15 : Tension transitoire de rétablissement (TTR).

Chapitre IV Simulation de la coupure d'un courant de défaut proche en ligne - utilisation du modèle de Schwarz -

Ce modèle donne une interruption réussie, car le courant s'annule après son passage par zéro et la tension transitoire de rétablissement (TTR) s'amortie.

Conclusion

A travers ce chapitre, on a fait la simulation d'un défaut proche en ligne, en utilisant le modèle de Schwarz pour représenter le disjoncteur SF6 HT et plus précisément la conductance non linéaire de l'arc électrique dans le disjoncteur SF6 HT. On a observé les phénomènes de coupure décrits au chapitre 2 et on a constaté que la simulation de la coupure ou de rétablissement du courant est une aide appréciable à la compréhension des phénomènes de coupure.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail effectué dans ce mémoire, contribue à l'étude de processus de coupure d'un courant de court-circuit en haute tension.

D'abord, une étude du régime transitoire lors du rétablissement du courant dans trois cas différents d'un circuit est présentée, nous avons vu aussi les différents courants de court-circuit qui peuvent avoir lieu sur les réseaux électriques MT et HT on ajoutant les calculs de ces courants de court-circuit en utilisant la méthode des composantes symétriques. Ensuite nous avons mis le point sur le processus de coupure d'un courant alternatif on décrivant les phénomènes physiques qui peuvent être présent lors de la coupure des courants électriques particulièrement dans les réseaux MT et HT nous avons fait aussi une description de la coupure de quelques courants spéciaux.

Après nous avons présenté les techniques de coupures dans l'air, dans l'huile, dans le vide et dans l'hexafluorure de soufre (SF₆) utilisés dans le domaine de la moyenne et haute tension.

A base du modèle d'arc de Schwarz, nous avons conçu «un disjoncteur » dans le Simulink de Matlab puis on l'a utilisé pour reproduire le processus de la coupure d'un défaut proche en ligne dans un réseau haute tension.

D'après la simulation nous avons observé les phénomènes de coupure décrits au chapitre 2 et nous avons constaté que la simulation de la coupure ou de rétablissement du courant est une aide appréciable à la compréhension des phénomènes de coupure.

Annexes

1. Les efforts électrodynamiques

Nous savons que la circulation de courants dans des conducteurs parallèles induit dans ces conducteurs des forces électromagnétiques proportionnelles au produit des courants circulant dans les deux conducteurs. En cas de court-circuit dans une configuration de ligne ou de poste en conducteurs souples, on mesure alors des surtensions mécaniques (traction et flexion) appelées efforts électrodynamiques au niveau des supports et des isolateurs d'ancrage. On observe également des mouvements de conducteurs très importants. Ces efforts pouvant être considérables comme indique la figure (1) [20].

La force électrodynamique exercée sur un élément du conducteur est donnée par la relation:

$$dF = i dl B \quad (1)$$

I : le courant parcouru dans l'élément du conducteur.

B : Champ d'induction provenant d'autre courant.

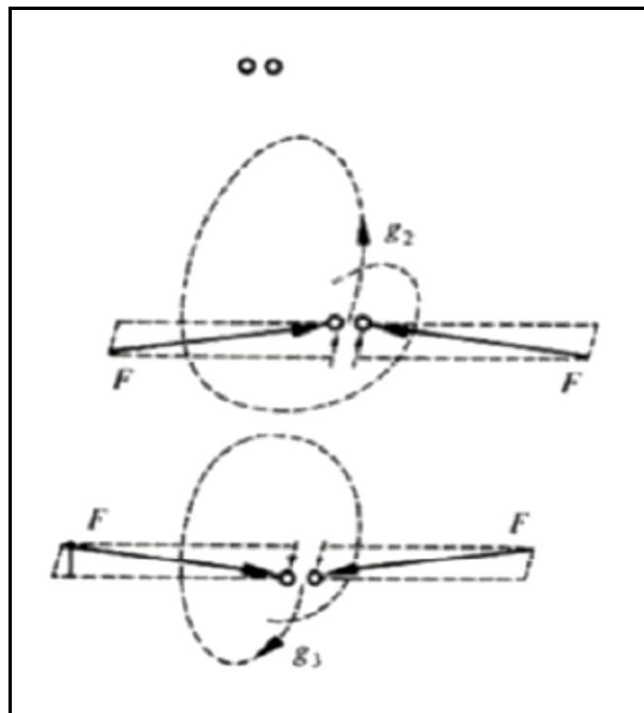


Fig.1 : force électrodynamique lors d'un court -circuit biphasé.

2. L'arc électrique

Lorsque les contacts du disjoncteur se séparent, le processus d'interruption est lancé, un arc électrique de très haute température est toujours produit et le milieu entre les contacts devient conducteur dans lequel l'interruption du courant va se produire. Avec les modernes disjoncteurs à haute tension, l'arc est soufflé avec du gaz. L'arc électrique est un canal de plasma entre les contacts du disjoncteur formés après une décharge gazeuse dans le milieu d'extinction [21].

Lors de la coupure, l'appareil doit absorber toute l'énergie électromagnétique stockée dans le réseau et supporter une importante surtension. Cette puissance, et la surtension qui l'accompagne, sont à l'origine de la naissance d'un arc électrique à l'endroit de la coupure [22].

2.1. Le plasma

Il peut arriver sous certaines conditions que les particules d'un gaz gagnent suffisamment d'énergie pour se mettre à conduire un courant électrique. Dans ce cas, le gaz devient conducteur et les particules qui le constituent peuvent être chargées et interagir les unes avec les autres. Ces particules peuvent être de différentes natures (électrons, ions positifs ou négatifs, atomes ou molécules, et elles peuvent se trouver dans différents états (standard ou excité) : on dit alors que le gaz est ionisé.

Depuis 1928, le plasma a été défini comme le quatrième état de la matière, où le milieu est partiellement ou totalement ionisé et généralement globalement neutre. Il est constitué d'un mélange d'ions, d'électrons et d'espèces neutres, excités ou non, où les températures sont supérieures à 300°C à la pression atmosphérique, pour ça on peut considérer le plasma conducteur d'électricité. Le plasma possède une grande viscosité et un coefficient d'échanges thermiques élevé d'électrons et qui est globalement neutre. Cette dernière propriété (neutralité du milieu) est une condition nécessaire que doit avoir un état pour pouvoir être qualifié de plasma.

Autrement dit, un mélange gazeux composé d'électrons, d'ions et d'éléments neutres, dans des états fondamentaux ou excités ne sera pas considéré comme plasma si au total, il n'a pas le même nombre de charges positives que négatives.

L'arc qui se crée dans le boîtier d'un disjoncteur est dans sa globalité un plasma thermique. Il est formé de particules provenant du gaz, de vapeurs métalliques venant des électrodes et de vapeurs plastiques venant des parois latérales du disjoncteur. Sa température est estimée expérimentalement à 15000 K [22].

BIBLIOGRAPHIE

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [01] Lou van der Sluis «**Transients in Power Systems**», Université de technologie de Delft, Pays-Bas, 2001.
- [02] ART.065191 Schneider Electric - Cahier technique édition février 2008.
- [03] METZ-NOBLAT Calcul des courants de court-circuit Cahier technique no 158,édition octobre 2000.
- [04] BE Electra- <http://electra.afrikblog.com>. 01/03/2010.
- [05] BENOIT DE METZ-NOBLAT Analyse des réseaux triphasés en régime perturbé à l'aide des composantes symétriques Cahier technique n° 18.
- [06] DENIS DUFOURNET(**Appareillage électrique d'interruption HT partie2**) dossier Techniques de l'Ingénieur d4692 Document délivré le 09/05/2012.p 5-6.
- [07] YVES PELENC « **Appareillage électrique d'interruption à haute tension » Interruption des circuits alimentés en courant continu »** dossier Techniques de l'Ingénieur D4 700 Document délivré le 09/05/2012, P 14-15- 16-29-29-30-34....36.
- [08] SERGE THEOLEYRE « **Les techniques de coupure en MT** », Cahier technique n° 193 édition septembre 1998.
- [09] F.LATRI « **Modélisation de l'arc électrique dans les disjoncteurs SF6 HT** » mémoire de magister Sétif, 2005.
- [10] Fritz Pinnekamp « le disjoncteur », revue ABB 1/2007.
- [11] J. PASTEAU «**Introduction à l'appareillage très haute tension** », Cahier technique n° 127 édition juin 1984.
- [12] Disjoncteurs de moyenne tension sous vide 12 ... 24 kV - 630 ... 2500 A - 16 ... 31,5 kA VD4 ABB.
- [13] D. Koch «**Propriétés et utilisations du SF6 dans les appareils MT et HT**», Cahier technique n° 188 édition février 2003.
- [14]https://www.durelec-transformateurs.com /Guide_DURELEC_SF6.
- [15] Ezra Petrus Antonius VAN LANEN, The current interruption process in vacuum analysis of the currents and voltages of current-zero measurements.
- [16] P. Schavemaker, «Digital testing of high-voltage SF6 circuit breakers» Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, 2002.

BIBLIOGRAPHIE

- [17] Schwarz, J. «Dynamisches Verhalten eines Gasbeblasenen, Turbulenzbestimmten Schaltlichtbogens», *ETZ-A*, Bd. 92 (1971), pp. 389-391.
- [18] « **Electric Arc model for High Voltage Circuit Breakers Based on MATLAB/SIMULINK**» International journal of science, spirituality, business and technology (IJSSBT), Vol. 1, No.2, february 2013 ISSN (Print) 2277—7261.
- [19] M.T. Glinkowski, K. Takanashi, “Parameter Optimization of Cassie-Mayer Equation for SF6 Arc Modeling”, Proceedings of North American Power Symposium, November 1996, Boston, MA.
- [20] L.ROBERT; LAROCCA " Personnel protection devices for us appliances" IEEE Transaction on industrie application Vol,1-2 1992.
- [21] « **Electric Arc model for High Voltage Circuit Breakers Based on MATLAB/SIMULINK**» International journal of science, spirituality, business and technology (IJSSBT), Vol. 1, No.2, february 2013 ISSN (Print) 2277—7261.
- [22] Mme LAURE REYNARD « **Modélisation tridimensionnelle de l’amorçage de l’arc électrique dans un disjoncteur basse-tension** » Thèse doctorat à l’école centrale de Lyon. Février 2006.