

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Abderrahmane MIRA de Bejaïa
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique



Mémoire de fin de cycle

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

Option : Réseaux électriques

Thème

**Modélisation d'arc électrique dans le
disjoncteur SF6 HT**

Réalisé par :

ICHALAL Zoubir

HAFIANE Nassim

Encadré par :

- *M^{me}* : ZIDANE .F

Remerciements

Nos sincères remerciements à Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné afin de réaliser ce mémoire.

Également, nous remercions notre promotrice Madame ZIDANE F. pour son encadrement et sa disponibilité.

Aussi, nous la remercions pour ses encouragements, son indulgence, et sa

Sympathie tout le semestre et les années d'études précédentes.

Nous exprimons notre profonde reconnaissance aux membres de jury

M^{me} : ROHA. N et M^r : HÉRZINE.

Nous remercions également tous les enseignants de département d'électrotechnique de

l'université A/Rahmane MIRA de Bejaia qui ont participé à notre formation pendant tout le

cycle universitaire.

Enfin, A toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'achèvement de ce mémoire.

Dédicace

A la mémoire de ma sœur

A la mémoire de mon grand père

A mes parents

A mes frères et à mes sœurs

A tous mes amis

Je dédie ce modeste mémoire de fin d'études

ZOUBIR

Dédicace

Je dédie ce modeste mémoire de fin d'études à :

A ma mère et mon père

Mes sœurs

A mes deux frères

A tous mes amis : karim, fares, lounis palla,

Imad toutouche, sofiane , kahina, lamia

Adel, bob, djamel

A tous ceux qui me sont chers.

Nassim

SOMMAIRE

Introduction générale.....1

Chapitre 1

1.1 Introduction.....2

1.2 Généralités.....2

 1.2.1 Les appareils de connexion dans un réseau électrique3

1.3 Les disjoncteurs HT.....4

 1.3.1 Définition d'un disjoncteur HT.....4

 1.3.2 Principe de fonctionnement d'un disjoncteur.....4

 1.3.3 Le rôle des disjoncteurs HT4

 1.3.4 Description générale d'un disjoncteur HT5

 1.3.5 Classification des disjoncteurs HT.....6

 1.3.5.1 Selon la destination.....6

 1.3.5.2 Selon l'installation.....6

 1.3.5.3 Selon le type de matériel.....7

 1.3.5.4 Selon l'utilisation.....8

 1.3.5.5 Selon le milieu de coupure9

1.4 Le disjoncteur SF6 HT.....11

 1.4.1 Les raisons qui favorisent le disjoncteur SF6 à haute tension.....11

 1.4.1.1 Les propriétés et les caractéristiques du gaz SF6.....11

 1.4.1.2 Les raisons techniques.....13

 1.4.2 Conception14

 1.4.3 Description du disjoncteur SF6 à une chambre de coupure.....15

Sommaire

| | |
|---|----|
| 1.4.3.1 La colonne polaire..... | 15 |
| 1.4.3.2 Coffret d'organe de manœuvre..... | 15 |
| 1.4.3.3 Coffret d'appareillage | 16 |
| 1.4.3.4 Les câbles de liaison..... | 16 |
| 1.4.3.5 La chambre de coupure..... | 16 |
| 1.4.3.6 L'organe de commande | 17 |
| 1.4.4 Le fonctionnement du disjoncteur SF6 HT..... | 18 |
| 1.5 Contrôle des composantes et des fonctions d'un disjoncteur..... | 19 |
| 1.6 Dimensionnement des disjoncteurs | 20 |
| 1.6.1 Les critères de dimensionnement..... | 21 |
| Conclusion..... | 21 |

Chapitre 2

| | |
|---|----|
| 2.1 Introduction | 22 |
| 2.2 Nature du courant électrique | 22 |
| 2.3 L'interruption des courants électriques | 23 |
| 2.3.1 Interruption d'un courant continu | 23 |
| 2.3.2 Interruption d'un courant alternatif..... | 24 |
| 2.4 Les différents courants à couper dans un réseau HT..... | 25 |
| 2.4.1 La coupure de courants normaux de charge..... | 25 |
| 2.4.2 La coupure des courants de défaut..... | 25 |
| 2.5 Des types défauts..... | 25 |
| 2.6 Les contraintes dues à l'interruption | 27 |
| 2.7 L'arc électrique | 28 |
| 2.7.1 Le plasma..... | 28 |
| 2.7.1 La décharge électrique | 29 |

Sommaire

| | | |
|----------|--|----|
| 2.8 | Caractéristique de l'arc | 29 |
| 2.8.1 | Les caractères thermiques | 29 |
| 2.8.2 | Les avantages de l'arc électrique | 29 |
| 2.8.3 | Les inconvénients de l'arc électrique..... | 29 |
| 2.8.4 | L'arc électrique dans le disjoncteur | 30 |
| 2.8.4.1 | Le pouvoir de coupure | 30 |
| 2.8.4.2 | Le pouvoir de fermeture assigné..... | 31 |
| 2.8.4.3 | Tension transitoire de rétablissement..... | 32 |
| 2.9 | Conditions nécessaires pour réussir la coupure | 33 |
| 2.10 | Les techniques de coupure en HT | 33 |
| 2.10.1 | Coupure au passage du courant par zéro..... | 33 |
| 2.10.2 | Répartition de la coupure dans des chambres en séries..... | 34 |
| 2.11 | La coupure dans un disjoncteur SF6 à haute tension | 35 |
| 2.11.1 | Position "fermé" | 35 |
| 2.11.2 | Ouverture..... | 35 |
| 2.11.2.1 | La période d'attente..... | 36 |
| 2.11.2.2 | La période d'extinction..... | 36 |
| 2.11.2.3 | La période Post-Arc..... | 36 |
| 2.11.3 | Position "ouvert" | 37 |
| | Conclusion..... | 38 |

Chapitre 3

| | | |
|-----|---|----|
| 3.1 | Introduction | 39 |
| 3.2 | Un aperçu sur la modélisation d'arc électrique..... | 39 |

Sommaire

| | |
|---|----|
| 3.3 Représentation des modèles d'arc à boîte noire..... | 40 |
| 3.4 Les modèles de base | 40 |
| 3.4.1 Le modèle de Mayr | 40 |
| 3.4.2 Le modèle de Cassie | 42 |
| 3.4.3 Comparaison des deux modèles | 43 |
| 3.5 Les modèles d'arc améliorés | 44 |
| 3.5.1 Le modèle de Mayr modifié | 44 |
| 3.5.2 Le modèle de Habedank | 45 |
| 3.5.3 Le modèle de Schwarz | 46 |
| 3.5.4 Le modèle de KEMA | 47 |
| 3.5.5 Le modèle de Schavemaker | 49 |
| Conclusion | 51 |

Chapitre 4

| | |
|--|----|
| 4.1 Introduction | 52 |
| 4.2 Conception du modèle de Habedank..... | 52 |
| 4.2.1 Description du modèle de Habedank..... | 52 |
| 4.2.2 Mise en équation du modèle dans le Simulink..... | 53 |
| 4.2.3 Insertion du modèle dans le circuit d'essai..... | 55 |
| 4.3 Simulation avec le modèle de Habedank..... | 58 |
| 4.4 Les résultats de la simulation..... | 60 |
| Conclusion..... | 61 |
| Conclusion générale..... | 62 |

Sommaire

Liste des figures

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Fig. 1.1 Parties principale d'un disjoncteur HT | 5 |
| Fig. 1.2 : Deux générations de disjoncteurs ouverts : 245 kV ; 40 kA ; 50 Hz..... | 7 |
| Fig 1.3 : Principe des disjoncteurs auto-pneumatiques..... | 11 |
| Fig 1.4 : Conductivité thermique du SF6 et de l'azote..... | 12 |
| Fig 1.5 : Tension de claquage en fonction de la pression pour un champ non uniforme..... | 13 |
| Fig. 1.6 Structure d'un disjoncteur SF6 HT 3AP [9] | 15 |
| Fig. 1.7 : Chambre de coupure du disjoncteur SF6 HT 245 kV..... | 17 |
| Fig. 2.1: circuit LR en courant continu | 23 |
| Fig. 2.2 : Variation de la résistance en fonction du courant de coupure | 24 |
| Fig. 2.3 : Circuit R L en courant alternatif | 24 |
| Fig. 2.4 : Une coupure au passage par zéro | 25 |
| Fig. 2.5 : La forme du courant prise en considération pour le pouvoir de coupure. | 31 |
| Fig. 2.6 : tension transitoire de rétablissement..... | 33 |
| Fig. 2.7 : Oscillogramme typique de la coupure d'un courant de court-circuit | 34 |
| Fig. 2.9 : Evolution des paramètres de l'arc pendant l'ouverture | 36 |
| Fig. 2.10 : Evolution des paramètres de l'arc pendant la période Post-Arc | 37 |
| Fig. 2.11 : Les phases du processus de coupure d'un courant alternatif dans disjoncteur SF6 HT | 37 |
| Fig. 2.12 : L'évolution et la durée de l'arc dans la phase ouverture du disjoncteur | 38 |
| Fig. 3.1 : Caractéristique statique d'un arc de forte puissance..... | 43 |
| Fig. 3.2 : Le modèle de Habedank | 45 |
| Fig. 3.4 : Les courbes des courants et des tensions de l'arc calculés et mesurés..... | 50 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Fig. 4.1 : système d'équation modèle de Habedank..... | 55 |
| Fig. 4.2 : le bloc subsystem du modèle | 55 |
| Fig. 4.3 : le bloc du modèle de Habedank | 56 |
| Fig. 4.4 : modèle de Habedank intégré dans le circuit test..... | 57 |
| Fig. 4.5 : boite de dialogue du modèle Habedank | 58 |
| Fig. 4.6 : tension simulée par le modèle de Habedank..... | 59 |
| Fig. 4.7 : Courant simulée par le modèle de Habedank | 59 |
| Fig. 4.8 : courant post arc | 60 |
| Fig.4.9 : tension transitoire de rétablissement (TTR)..... | 60 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|----|
| Tableau 1.1 : Symboles normalisés pour la représentation des appareils de connexion..... | 3 |
| Tableau 1.2 : Contrôle des composants ou des fonctions d'un disjoncteur..... | 19 |
| Tableau 2.1 : Courants de court-circuit selon CEI 60909 | 27 |
| Tableau 3.1 : Comparaison entre le modèle de Mayr et le modèle de Cassie..... | 43 |

Introduction générale

Introduction générale

La demande actuelle d'énergie électrique augmente dans le monde entier. Cette énergie est transportée sur des réseaux électriques qui deviennent plus complexes, mais qui doivent toujours rester aussi sûrs. Cette sécurité est assurée par les disjoncteurs électriques haut tension.

Les disjoncteurs sont des éléments clé du réseau électrique, leur rôle repose sur une approche de sécurité. Ils consistent à interrompre le courant dans toutes les situations (normales ou anormales) et à protéger les personnes, le circuit, ainsi que tous les appareils connectés à celui-ci.

Dans ce travail on s'intéresse aux disjoncteurs haut tension et en particulier aux disjoncteurs SF6

Pour cela l'objectif poursuivi dans notre mémoire « **la modélisation de l'arc électrique dans le disjoncteur SF6 HT** » est de donner une idée sur la méthode adoptée pour résoudre le problème d'interaction arc-circuit et de la sûreté du fonctionnement de l'interruption d'un courant alternatif par le disjoncteur SF6 HT, en modélisant et simulant l'arc électrique apparu lors de la séparation des électrodes, afin de caractériser le comportement l'arc électrique, aussi ajuster et améliorer les performances du disjoncteur.

Ce mémoire est subdivisé en quatre chapitres :

Le premier est consacré au disjoncteur SF6 haute tension, où on a donné une idée générale sur les appareils de connexion HT et les disjoncteurs HT, et on a poursuivi par une idée précise sur la constitution, la description et le fonctionnement du disjoncteur SF6 haute tension.

Le deuxième est réservé aux phénomènes de coupure d'un courant alternatif en général, avec une description précise dans le cas d'un disjoncteur SF6 haute tension.

Dans le troisième, on a décrit les différents modèles d'arc électrique à boîte noire adaptés pour exprimer le comportement dynamique de l'arc, avec une idée sur leurs hypothèses et leurs évolutions dans le temps.

En fin le dernier chapitre est consacré à la simulation de l'arc électrique par le modèle de de Habedank.

Chapitre 01

Le disjoncteur SF6 haute tension

1.1 Introduction

Le développement des réseaux de transport et des réseaux industriels place les disjoncteurs haute tension dans des conditions de fonctionnement beaucoup plus sévères.

Un disjoncteur est l'appareil de protection essentiel d'un réseau à haute tension, car il est seul capable d'interrompre un courant de court-circuit et donc d'éviter que le matériel connecté sur le réseau soit endommagé par ce court-circuit.

Le disjoncteur permet de protéger la partie en aval, soit d'une façon volontaire ou involontaire suite à un défaut dans cette partie.

La technique de l'auto soufflage de gaz SF6, appliquée depuis longtemps aux appareils des réseaux de distribution à moyenne tension s'est étendue progressivement, du fait de ses avantages, aux appareils des réseaux haute tension.

1.2 Généralités

Sur un réseau électrique, l'interruption du courant s'avère quelques fois nécessaire. Que ce soit de façon volontaire comme lorsqu'il est nécessaire d'isoler une partie du réseau pour y effectuer des travaux ou de façon accidentelle, en cas de foudre, de vents violents ou de séisme par exemple, la présence du disjoncteur prend toute son importance, il permet de rapidement reconfigurer le réseau et minimise les dommages possibles, conséquences directes des excès de courant qui se développent dans ces situations. Des vies humaines et le matériel (assez coûteux) en aval peuvent donc être ainsi protégés [1].

1.2.1 Les appareils de connexion dans un réseau électrique

Les appareils de connexion dans un réseau électrique et leurs symboles sont représentés sur le tableau 1.1.

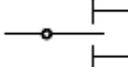
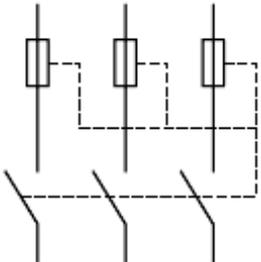
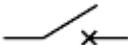
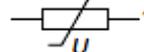
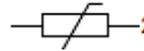
| Symboles normalisés pour la représentation des appareils de connexion | |
|---|---|
| Symbole | Désignation |
|  | Sectionneur |
|  | Sectionneur à deux directions avec position d'isolement Médiane |
|  | Interrupteur |
|  | Interrupteur-sectionneur |
|  | Contacteur |
|  | Fusible dont l'extrémité qui, après fusion, demeure sous tension est indiquée par un trait renforcé |
|  | Interrupteur triphasé à ouverture automatique par l'un quelconque des fusibles à percuteur |
|  | Disjoncteur |
|  | Parafoudre |
|  | Varistance (parasurtenseur à oxyde de zinc par exemple) :1 symbole normalisé2 symbole couramment utilisé. |
|  | |

Tableau 1.1 : Symboles normalisés pour la représentation des appareils de connexion [2].

1.3 Les disjoncteurs HT

1.3.1 Définition d'un disjoncteur HT

Selon la définition donnée par la CEI, un disjoncteur à haute tension est destiné à établir, supporter et interrompre des courants sous sa tension assignée (la tension maximale du réseau électrique qu'il protège) à la fois :

- Dans des conditions normales de service, par exemple pour connecter ou déconnecter une ligne dans un réseau électrique.
- Dans des conditions anormales spécifiées, en particulier pour éliminer un court-circuit dû à la foudre.

Grâce à ses caractéristiques, un disjoncteur est l'appareil de protection essentiel d'un réseau à haute tension, car il est le seul capable d'interrompre un courant de court-circuit et donc d'éviter que le matériel connecté sur le réseau soit endommagé par ce court-circuit.

1.3.2 Principe de fonctionnement d'un disjoncteur

Dans le disjoncteur se trouvent des électrodes, initialement en contact, parcourues par le courant du réseau. Le disjoncteur est calibré de telle sorte que lorsque le courant dépasse une valeur seuil, les électrodes s'écartent(en cas de défaut). L'ouverture du circuit entraîne la formation d'un arc électrique entre les électrodes.

L'arc étant conducteur, le courant électrique continue de circuler. Mais un soufflage énergétique de l'arc par le gaz froid fortement comprimé favorisera l'extinction de l'arc lors du passage à zéro du courant [1].

1.3.3 Le rôle des disjoncteurs HT

- Le disjoncteur électrique est l'appareil de contrôle et de sécurité clé sur un réseau électrique. Il doit laisser passer le courant électrique (conducteur) en absence de défaut (la plupart du temps) et doit être capable de l'interrompre dès l'apparition d'une anomalie sur le réseau. Il a un rôle d'isolation et de protection des autres dispositifs électriques positionnés en aval sur le réseau défaillant et des personnes pouvant se trouver à proximité de ce dernier.
- Un disjoncteur doit être fiable et efficace de manière quasi-instantanée. Il doit être capable de s'ouvrir sans aucun problème même après une longue période d'inactivité. De plus, lors du passage du courant permanent, le disjoncteur est soumis à un échauffement élevé. Il doit donc être capable de supporter cet échauffement pour ne pas détériorer ses parties internes. Il doit également avoir de bonnes propriétés

mécaniques et être capable de réaliser un grand nombre de coupures sans trop détériorer ses contacts et ses différentes pièces dans l'optique de pouvoir être utilisé de nombreuses fois sans pour autant nécessiter d'interventions extérieures[3].

1.3.4 Description générale d'un disjoncteur HT

Un disjoncteur à haute tension est composé de trois parties principales (fig. 1.1) :

1. Partie électrique active.
2. Partie commande.
3. Partie Contrôle [9].

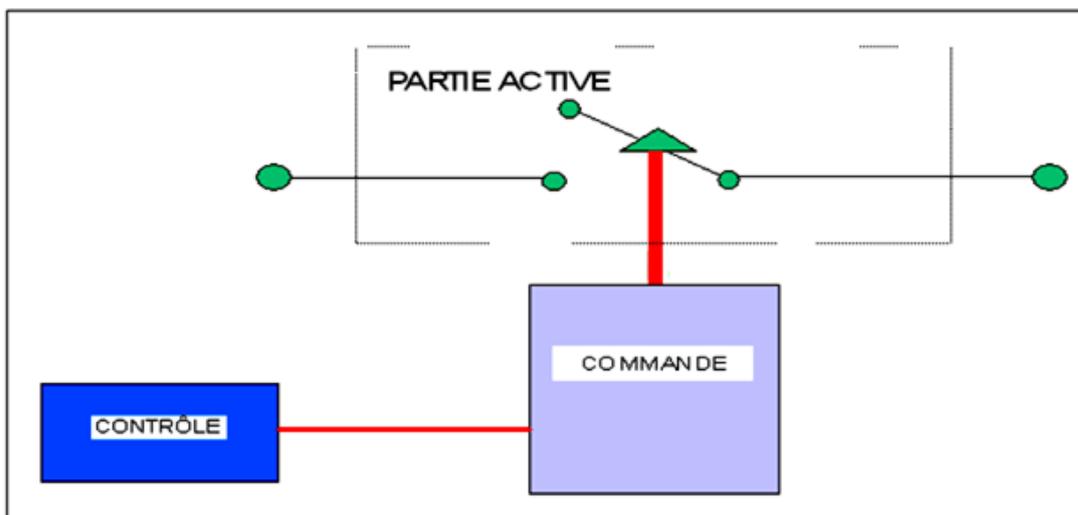


Fig. 1.1 Parties principale d'un disjoncteur HT

a. Partie électrique active

C'est la partie où le courant est établi ou interrompu dans le circuit principal, elle est constituée d'une chambre fermée contenant un contact fixe et un autre mobile dans un milieu liquide ou gazeux appelé milieu de coupure et dont l'établissement ou l'interruption du courant se réalise par la mise en contact de ces deux contacts ou leur séparation.

Pour un disjoncteur triphasé, chacune des phases possède au moins une partie active.

Pour des niveaux de tensions nominales élevées, la partie active peut être composée de plusieurs chambres identiques connectées en série et commandées simultanément de façon à produire un seul contact électrique, dans ce cas des condensateurs de répartition sont installés en parallèle avec chaque chambre pour la répartition de la tension afin de réduire les usures excessives des contacts au détriment des autres.

b. Partie commande

C'est la partie où est développée l'énergie nécessaire pour réaliser le déplacement du contact mobile et réussir les opérations mécaniques tant à l'ouverture qu'à la fermeture.

La commande comporte des dispositifs à accumulation d'énergie appelés les accumulateurs d'énergie, dont le rôle est d'accumuler l'énergie nécessaire pour la coupure ou la fermeture et la maintenir prête à livrer lorsqu'elle est demandée.

Trois types de commandes sont populaires dans le monde des disjoncteurs à haute tension :

- ✓ Commande pneumatique
- ✓ Commande hydraulique
- ✓ Commande mécanique à ressort

c. Partie Contrôle

C'est la partie où les commandes d'opération sont initiées à partir d'une impulsion électrique d'une durée de fraction de seconde sur une bobine dans le mécanisme de commande. Celui-ci amplifie cet ordre en une opération de la disjonction en libérant l'énergie nécessaire emmagasinée préalablement dans les accumulateurs d'énergie pour effectuer la coupure ou la fermeture.

Cette partie comprend aussi les bobines d'enclenchement et de déclenchement, le système de relaying basse tension, les divers capteurs (de pression, de fin de course, etc.) nécessaires pour effectuer la surveillance et le contrôle du fonctionnement.

1.3.5 Classification des disjoncteurs HT

1.3.5.1 Selon la destination

L'appareillage à haute tension est destiné à fonctionner dans trois types de réseaux ou d'installations principaux ;

- Réseaux de **répartition** ou de **transport** (> 52 kV) ;
- Réseaux de **distribution** (< 52 kV) ;
- **Installations industrielles** (3,6 à 24 kV) ; [4]

1.3.5.2 Selon l'installation

Selon sa possibilité d'installation, on distingue :

a. Pour l'intérieur : qui est destiné à être installé uniquement à l'intérieur d'un bâtiment, à l'abri des intempéries et de la pollution, avec une température ambiante qui n'est pas inférieure à -5 °C (éventuellement -15 °C ou -25 °C).

b. Pour l'extérieur : qui est prévu pour être installé à l'extérieur des bâtiments, et qui par suite doit être capable de fonctionner dans des conditions climatiques et atmosphériques contraignantes.

1.3.5.3 Selon le type de matériel

Deux types de matériels sont distingués :

a. Les disjoncteurs ouverts

Dont l'isolation externe est faite dans l'air



Fig. 1.2 : Deux générations de disjoncteurs ouverts : 245 kV ; 40 kA ; 50 Hz

b. Les disjoncteurs sous enveloppe métallique ou blindés

Muni d'une enveloppe métallique, reliée à la terre, qui permet d'éviter tout contact accidentel avec les pièces sous tension. Le disjoncteur fait partie d'une cellule isolée au SF6 qui comprend les différents organes nécessaires au fonctionnement du poste : disjoncteur, jeu de barres, sectionneur de jeu de barres, sectionneur de terre, transformateur de courant. Postes sous enveloppe métallique (PSEM). [4].

c. Les disjoncteurs hybrides

dits « Dead Tank », dont l'isolation des parties actives est faite dans le SF6 à l'intérieur d'une cuve métallique et dont le raccordement au réseau est fait par l'intermédiaire

de traversées isolantes. Cette disposition permet de placer les transformateurs de courant directement aux bornes du disjoncteur, en des points qui ne nécessitent pas d'isolation électrique [4].

1.3.5.4 Selon l'utilisation

On peut aussi classer l'appareillage en fonction de son utilisation [4].

a. Disjoncteurs de ligne

Comme leur nom l'indique, ils sont chargés de manœuvrer les lignes des réseaux à haute tension et, à ce titre, ils doivent posséder la plupart des performances pouvant être exigées d'un disjoncteur à haute tension. Dans des conditions normales de service, ils sont utilisés pour l'ouverture ou la fermeture des lignes. Ils doivent être capables d'effectuer ces manœuvres sans provoquer de surtensions excessives sur le réseau. En particulier, un disjoncteur de ligne doit posséder un pouvoir de coupure et de fermeture de lignes à vide.

Ces disjoncteurs doivent aussi être capables d'interrompre les défauts qui se produisent sur une ligne, ou directement à ses bornes, et qui donnent lieu à de forts courants de court-circuit [4].

b. Disjoncteurs de générateurs

Ces disjoncteurs sont connectés entre un générateur et le transformateur élévateur de tension. Ils sont généralement utilisés à la sortie des générateurs de forte puissance (100 à 1 800 MVA), pour les protéger de manière sûre, rapide et économique.

Des particularités importantes caractérisent ces disjoncteurs et font qu'ils sont notablement différents des disjoncteurs de ligne [4].

c. Disjoncteurs de réactances

Ces disjoncteurs manœuvrent quotidiennement des réactances qui sont utilisées pour le réglage de la charge réactive dans une ligne. Ils doivent être capables d'effectuer ces manœuvres sans provoquer de surtensions sur le réseau.

Dans les réseaux à très haute tension où le niveau de surtension admissible est relativement faible (1,6 pu. en 800 kV), une solution éprouvée consiste à munir le disjoncteur de parafoudres à oxyde de zinc [4].

1.3.5.5 Selon le milieu de coupure

a. Disjoncteur à huile

La coupure dans l'huile s'est imposée en haute tension après avoir été développée en moyenne tension (Haute tension A). Sous l'action de l'arc électrique, l'huile est décomposée, plusieurs types de gaz sont produits (essentiellement de l'hydrogène et de l'acétylène) lors de cette décomposition. L'énergie de l'arc est utilisée pour décomposer et évaporer l'huile, ceci permet de refroidir le milieu entre les contacts et par suite d'interrompre le courant à son passage par zéro.

Les premiers disjoncteurs à huile avaient des contacts de coupure qui étaient plongés dans de l'huile contenue dans une cuve métallique au potentiel de la terre, d'où leur nom de *Dead tank*. Ils sont appelés « disjoncteurs à gros volume d'huile ». Par la suite, dans les années 1950, les « disjoncteurs à faible volume d'huile » ont été conçus pour réduire la quantité d'huile nécessaire et surtout limiter le risque d'incendie inhérent aux disjoncteurs à gros volume d'huile. L'arc se développe dans un cylindre isolant afin de limiter sa longueur et de contrôler autant que possible l'énergie contenue dans l'arc.

Cette énergie est utilisée pour générer le soufflage par vaporisation de l'huile comme expliqué précédemment.

Inconvénients : ces disjoncteurs avaient pour principaux inconvénients de nécessiter de nombreux éléments de coupure en série (pour tenir la tension), et de nécessiter un entretien important et délicat (remplacement de l'huile usagée). Ils ont été supplantés par les disjoncteurs à SF6 qui nécessitent peu de maintenance et ont une longue durée de vie.

b. Disjoncteur à air comprimé

Le gaz contenu dans les disjoncteurs à air comprimé est maintenu sous haute pression (20 à 35 bars) à l'aide d'un compresseur. Cette haute pression permet d'assurer la tenue diélectrique et de provoquer le soufflage de l'arc pour la coupure.

Le soufflage intense exercé dans ces disjoncteurs a permis d'obtenir de très hautes performances (courant coupé jusqu'à 100 kA sous haute tension) et avec une durée d'élimination du défaut très courte permettant d'assurer une bonne stabilité des réseaux en cas de défaut.

La technique à air comprimé est la seule qui permette encore aujourd'hui d'atteindre les pouvoirs de coupure les plus élevés (275 kA sous 36 kV) qui sont exigés pour les disjoncteurs de générateurs.

Inconvénients : un défaut des disjoncteurs à air comprimé est leur bruit très important à l'ouverture. De plus, ils nécessitent un entretien périodique, en particulier de leurs compresseurs, ceci explique qu'ils ont été progressivement supplantés par une autre génération de disjoncteurs, celle des disjoncteurs à SF₆ (ou hexafluorure de soufre).

c. Disjoncteurs avec ampoules à vide

Les premières applications industrielles ont été réalisées à la fin années 1950 lorsque les difficultés technologiques de mise en œuvre furent résolues, notamment la garantie d'un vide poussé pendant au moins vingt ans, ce qui nécessite une étanchéité parfaite de l'ampoule.

Inconvénients : actuellement des disjoncteurs intégrant des ampoules à vide sont en service jusqu'à 84 kV, au

Japon, le pouvoir de coupure d'un disjoncteur à vide peut atteindre 63 kA.

d. Disjoncteur à gaz SF6 (Hexafluorure de soufre)

Historique : l'utilisation du SF₆ pour l'isolation a été brevetée aux États-Unis par Franklin Cooper de General Electric en 1938, et son utilisation pour l'interruption d'un courant a été revendiquée aussi en 1938 dans un brevet allemand par Vitaly Grosse de AEG (Allgemeine Elektrizitäts- Gesellschaft).

La première application industrielle du SF₆ pour la coupure date de 1953, elle a été faite par Westinghouse pour des interrupteurs en charge à haute tension 15 kV à 161 kV avec un pouvoir de coupure de 600 A.

La première réalisation d'un disjoncteur SF₆ haute tension a été faite en 1956 par Westinghouse mais le pouvoir de coupure était alors limité à 5 kA sous 115 kV (1000 MVA) et cet appareil devait avoir de nombreux éléments de coupure en série par pôle pour assurer les performances (six chambres de coupure en série).

e .Disjoncteur auto-pneumatique : Le principe du soufflage auto-pneumatique s'est développé au cours des années 1970 et au début des années 1980 pour répondre aux spécifications les plus exigeantes et développer des appareils de plus en plus performants

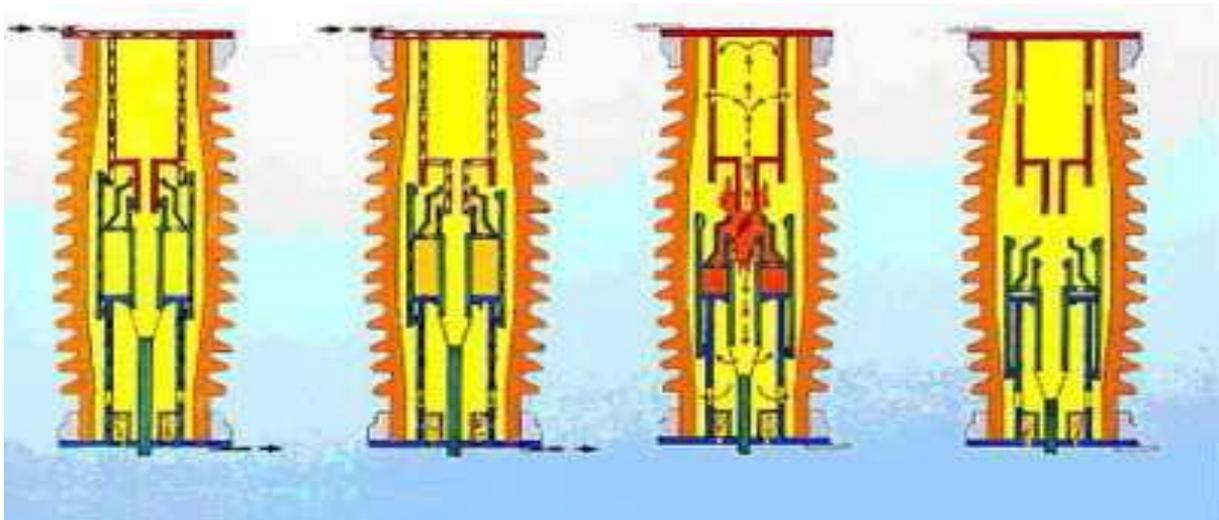


Fig 1.3 : Principe des disjoncteurs auto-pneumatiques

1.4 Le disjoncteur SF6 HT

1.4.1 Les raisons qui favorisent le disjoncteur SF6 à haute tension

Les raisons qui favorisent le disjoncteur SF6 à haute tension sont les propriétés remarquables, extinctrices de l'arc, du gaz SF6 et les caractéristiques techniques de ce disjoncteur.

1.4.1.1 Les propriétés et les caractéristiques du gaz SF6

a. Propriétés physiques : Le SF6 est l'un des gaz les plus lourds connus. Sa masse spécifique à 20°C, sous une pression de 0,1 Mpa (c'est-à-dire une atmosphère), est égale à 6,139 kg/m³, soit cinq fois plus que celle de l'air. Sa masse moléculaire est de 146,06. C'est un gaz incolore et inodore.

Le SF6 n'existe à l'état liquide que sous pression [5].

- **Chaleur spécifique :** la chaleur spécifique du SF6 rapportée à l'unité de volume est 3,7 fois plus élevée que celle de l'air. Ceci a des conséquences importantes pour la réduction des échauffements au sein de l'appareillage électrique.
- **Conductivité thermique :** 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.

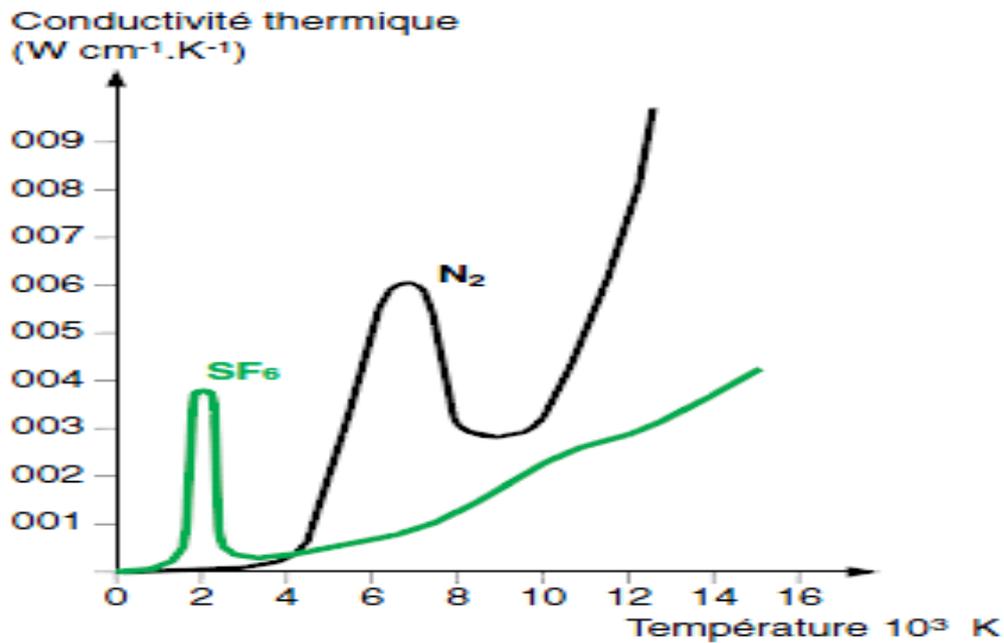


Fig 1.4 : Conductivité thermique du SF6 et de l'azote.

- **Caractéristiques électriques :** les excellentes propriétés diélectriques du SF6 sont dues au caractère électronégatif de la molécule qui possède une tendance marquée à capturer les électrons libres pour former des ions lourds et peu mobiles, ce qui rend difficile le développement d'une avalanche électronique. La rigidité diélectrique du SF6 est 2,5 fois plus élevée que celle de l'air dans les mêmes conditions [5].

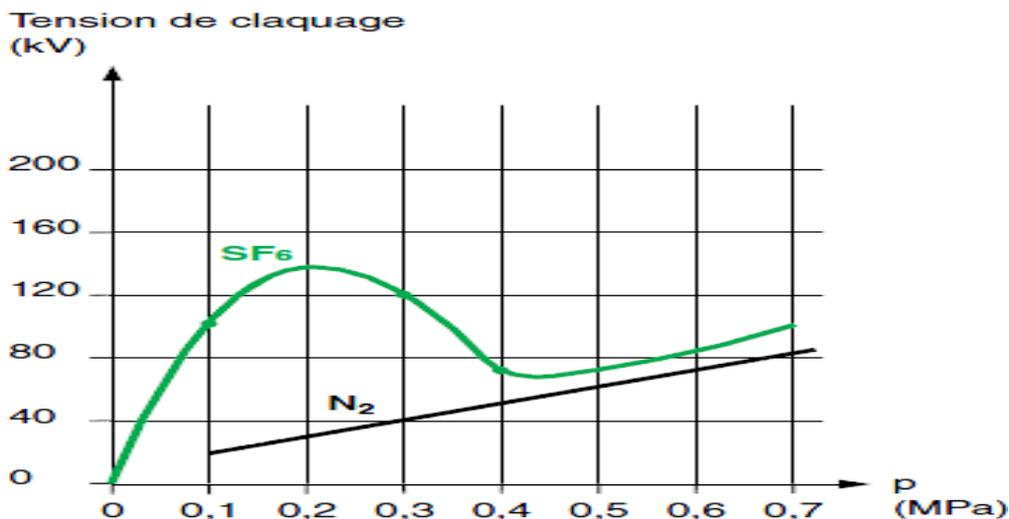


Fig 1.5 : Tension de claquage en fonction de la pression pour un champ non uniforme

b. Propriétés chimiques : L'hexafluorure de soufre correspond à la valence maximale du soufre. Sa structure moléculaire est celle d'un octaèdre dont les six sommets sont occupés par des atomes de fluor [6].

- le SF6 peut être chauffé sans décomposition jusqu'à 500 °C en l'absence de métaux catalytiques,
- le SF6 est ininflammable,
- le SF6 est insoluble dans l'eau,
- il n'est pas attaqué par les acides.

c. Propriétés diélectriques

Le SF6 a une rigidité diélectrique très élevée grâce aux propriétés très électronégatives du fluor [7] :

- la probabilité existence des électrons libres reste très faible et la rigidité diélectrique ainsi reste très forte retardée.
- il confère à son milieu une constante de temps de désionisation extrêmement faible.

1.4.1.2 Les raisons techniques

Sur le plan technique, plusieurs caractéristiques des disjoncteurs SF6 peuvent expliquer leur succès :

- La simplicité de la chambre de coupure qui ne nécessite pas des dispositifs auxiliaires pour la coupure.
- L'autonomie des appareils apportée par la technique auto pneumatique (sans compresseur de gaz).
- La possibilité d'obtenir les performances les plus élevées, jusqu'à 63 kA, avec un nombre réduit de chambres de coupure : une seule chambre est nécessaire en 245 kV, une ou deux en 420 kV et 550 kV et généralement quatre en 800 kV.
- Une courte durée d'élimination de défaut.
- Une grande endurance électrique qui permet de garantir une durée de vie d'au moins 25 ans.
- Une réduction de l'encombrement possible avec les postes sous enveloppe métallique.
- La possibilité d'équiper les chambres par des résistances de fermeture ou d'effectuer des manœuvres synchronisées afin de limiter les surtensions pendant les manœuvres en très haute tension.
- La sécurité de fonctionnement.
- Un faible niveau de bruit.

1.4.2 Conception

Les disjoncteurs SF6 HT n'ont pas de déclencheur ou de relais de protection intégrés, ils ne fonctionnent que sur réception d'un ordre électrique extérieur, manuel ou automatique et la sélectivité est obtenue par décalage des ordres [3].

L'énergie de manœuvre du disjoncteur est fournie par une source extérieure (électrique ou pneumatique), elle est stockée dans les armoires des mécanismes qui seront commandés par les signaux venant des armoires de commande ou des circuits auxiliaires de protection.

Ils comportent souvent plusieurs organes de coupure en série et parfois des éléments auxiliaires en parallèle avec leurs contacts comme des condensateurs et des résistances pour améliorer le pouvoir de coupure.

➤ Tous les disjoncteurs SF6 à HT sont basés sur la même construction principale avec quelques modifications ou différences entre eux comme :

- Le nombre de chambres de coupure ; il y a des disjoncteurs à une seule chambre ou à deux ou à trois en série.
- Le type d'organe de commande ; soit par un mécanisme à ressort ou par système hydraulique, aussi le type de commande ; chaque pôle avec un organe de commande ou un organe de commande pour les trois pôles.

Le volume des disjoncteurs selon le niveau de la tension, l'isolation et le type de poste (isolé dans l'air ou blindé) [3].

Dans les disjoncteurs SF6 à une de coupure, on trouve toujours les éléments suivants: un support isolant, organe ou mécanisme de commande, la chambre de coupure et deux prises de courant.

On donne les différents éléments constituant un disjoncteur SF6 HT de tension nominale 245 kV dans la figure suivante :

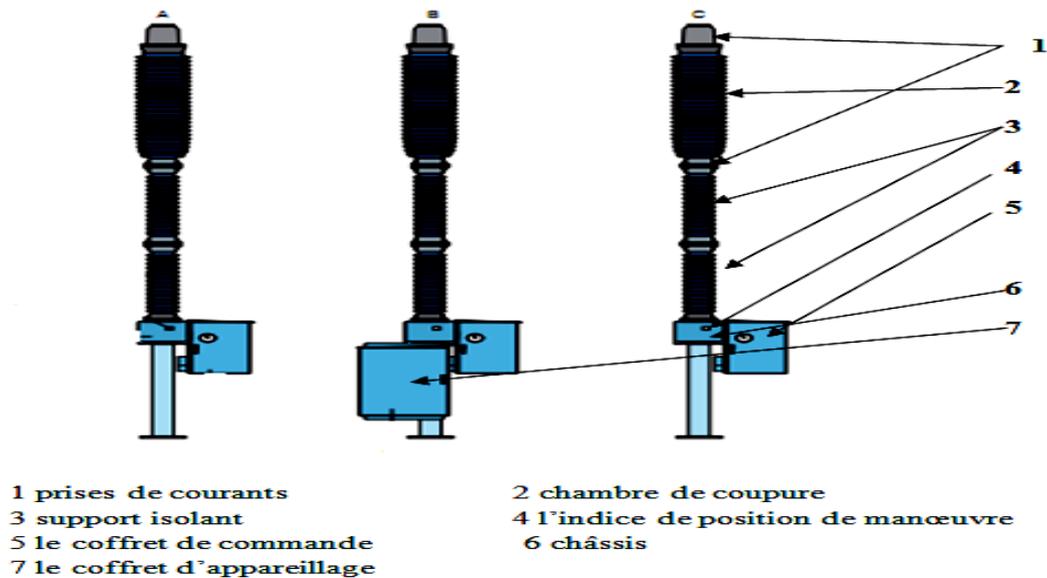


Fig. 1.6 Structure d'un disjoncteur SF6 HT 3AP [9]

1.4.3 Description du disjoncteur SF6 à une chambre de coupure

Le disjoncteur SF6 HT à une seule chambre de coupure avec mécanisme de commande à ressort pour chaque pôle est constitué principalement de trois colonnes polaires, disposées chacune sur un châssis doté d'une indication de position de commutateur, sur le côté du châssis est fixé le coffret de commande. Le coffret d'appareillage est installé sur le pôle central [8].

1.4.3.1 La colonne polaire

Les trois colonnes polaires du disjoncteur sont identiques, elles contiennent la chambre de coupure, le support d'isolation par rapport à la terre et les deux prises de courant.

Chaque colonne polaire est remplie par le gaz SF6 et équipée d'une surveillance de densité et de pression du gaz par un contrôleur [3].

1.4.3.2 Coffret d'organe de manœuvre

Dans ce coffret se trouve les moyens qui permettent de commander et de manœuvrer le disjoncteur manuellement ou automatiquement, grâce au levier de manœuvre et à l'énergie potentielle nécessaire, au mécanisme, pour manœuvrer le contact d'un pôle, cette énergie est accumulée dans les ressorts de fermeture et d'ouverture [9].

1.4.3.3 Coffret d'appareillage

Il contient tous les dispositifs nécessaires pour commander, surveiller et contrôler le disjoncteur. Dans ce coffret se trouvent des contacteurs reliés aux dispositifs de protection et aux dispositifs de commande à distance basés sur la télécommunication [10].

1.4.3.4 Les câbles de liaison

Ils servent au couplage électrique entre la commande et le mécanisme.

1.4.3.5 La chambre de coupure

Le rôle de la chambre de coupure est d'attirer et d'éteindre l'arc lors d'un court-circuit qui se développe entre les contacts pendant la coupure.

La chambre de coupure est située à l'intérieur de chaque colonne polaire des trois phases, elle a le rôle d'interrompre le passage du courant électrique ou de le rétablir (ouverture ou fermeture du circuit électrique). Elle est constituée principalement de deux éléments qui assurent la connexion et la déconnexion des contacts du disjoncteur sous l'influence de la force mécanique et la force pneumatique qui est créée grâce à la propriété thermique du gaz SF6 en donnant naissance à un soufflage dans la buse.

Le premier a une forme d'un tube creux doté d'une lame de contact d'arc et fixé à un piston où se glisse le second qui a la forme d'une tige dotée d'une lame de contact d'arc et fixé directement au coffret de commande.

La chambre de coupure est remplie par le gaz SF6 qui joue le rôle du milieu de coupure, en s'appuyant sur ses propriétés extinctrices [9].

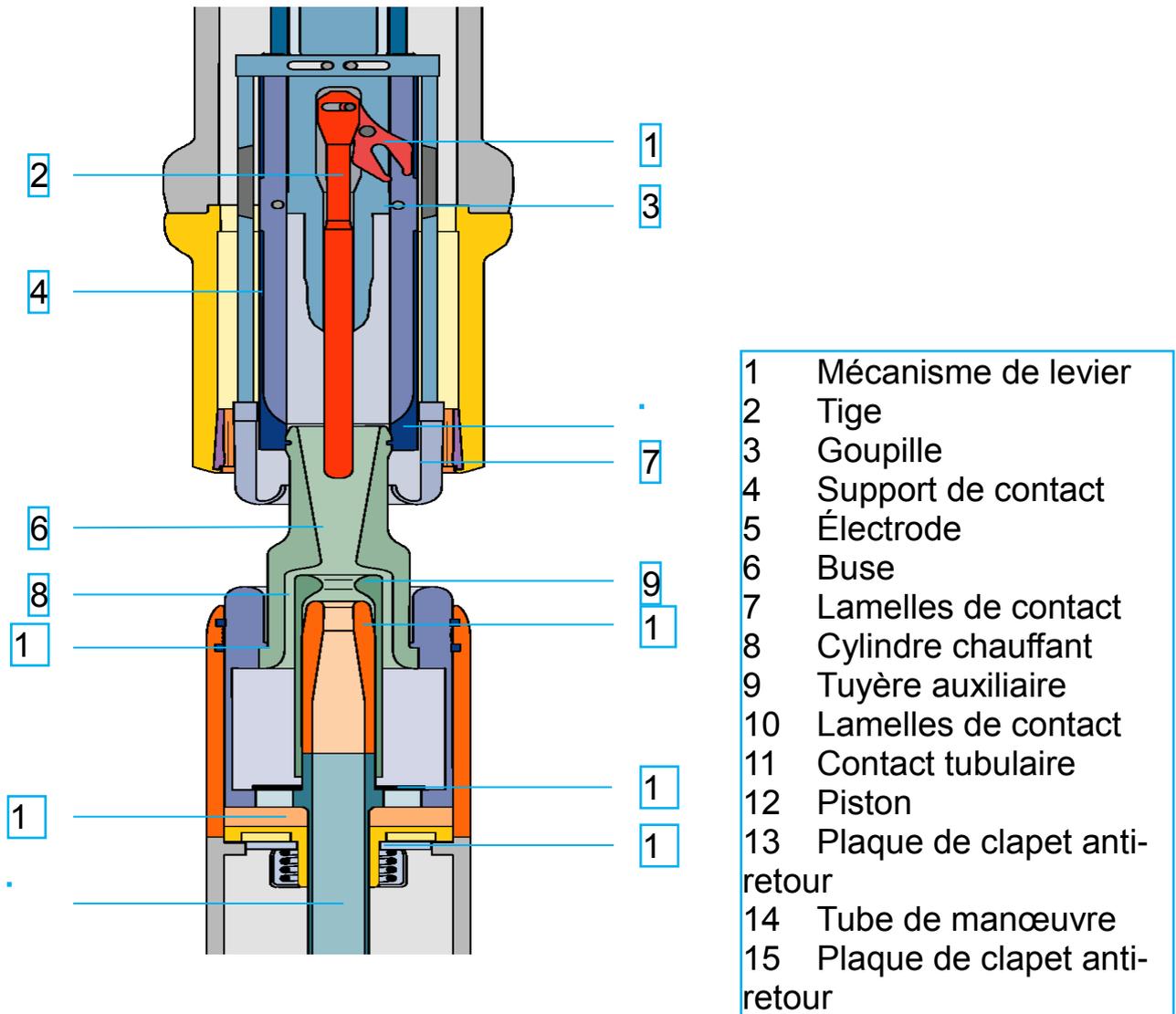


Fig. 1.7 : Chambre de coupure du disjoncteur SF6 HT 245 kV

1.4.3.6 L'organe de commande

Le fonctionnement des disjoncteurs est assuré par des organes de manœuvre qui fournissent l'énergie nécessaire pour effectuer des cycles de manœuvre tels que fermeture-ouverture, l'énergie accumulée dans le mécanisme doit assurer au moins trois cycles de manœuvre en raison de sûreté de fonctionnement [9,11].

L'organe de commande doit être capable d'assurer le cycle complet de l'appareil dans toutes les conditions normales de fonctionnement :

- en coupure ou fermeture de courants de court-circuit ;
- à haute et à basse température.

Une commande en position déclenchée, avec le ressort d'enclenchement tendu et celui de déclenchement détendu. Un moteur électrique très démultiplié et de faible consommation permet de comprimer le ressort d'enclenchement après une manœuvre de fermeture.

Enfin de compression, le moteur est maintenu sous tension à l'aide de l'accrochage d'enclenchement.

La libération de l'accrochage provoque la détente du ressort d'enclenchement, la fermeture du disjoncteur et l'armement du ressort de déclenchement. Il est alors possible d'effectuer un déclenchement du disjoncteur en libérant l'accrochage, puis d'effectuer un nouveau cycle de fermeture-ouverture.

- Les commandes à ressorts équipent maintenant les disjoncteurs à haute tension jusqu'à 550 kV pour les raisons suivantes :
 - La mise au point de nouveaux principes de coupure à faible énergie de manœuvre.
 - La réduction des masses mobiles des disjoncteurs.
 - L'optimisation de la chaîne cinématique qui relie la chambre de coupure à l'organe de manœuvre.
 - Une faible perte d'énergie interne.
 - Un nombre réduit de composants.
 - Un fonctionnement plus souple, avec un impact réduit sur la structure du disjoncteur.

1.4.4 Le fonctionnement du disjoncteur SF6 HT

Le disjoncteur peut être réglé pour fonctionner en deux régimes :

Régime 0 verrouillage de fonctionnement

Régime 1 (déclenchement -réenclenchement) dans les cas :

- Des lignes aériennes,
- Des jeux de barre,
- Des charges impédantes,

Régime 2 (déclenchement) dans les cas :

- Des lignes souterraines
- Des équipements sensibles
- La commande volontaire du disjoncteur
- Les conditions climatiques sévères

Le disjoncteur fonctionne automatiquement, suite à la présence un court-circuit dans le réseau électrique, ce dernier sera détecté par la protection située dans le coffret d'appareillage

et il va émettre un signal qui sera transmis au coffret du mécanisme de commande via un câble de liaison.

Le mécanisme de la commande va réceptionner le signal et manœuvrer le contact du disjoncteur, par un cycle de manœuvre ouverture-fermeture.

Si le défaut n'est pas éliminé, d'autres cycles seront effectués (2 à 5 cycles) selon la capacité de l'énergie accumulée dans le mécanisme.

Dans le cas où le court-circuit n'est pas fugitif, il s'agit d'un court-circuit permanent, le disjoncteur reste ouvert et un signal sera transmis par l'opérateur du réseau électrique, via le dispositif de télécommunication situé dans le coffret d'appareillage à l'aide des capteurs de surveillance.

L'opérateur du réseau électrique élimine le défaut par une intervention de maintenance et il manœuvre le disjoncteur à l'aide d'une télécommande à distance et de dispositif de télécommunication et de mécanisme de commande, la manœuvre dans ce cas sera ouverture ou fermeture.

Le disjoncteur peut fonctionner automatiquement par la protection ou volontairement à l'aide d'une télécommande [9,11].

1.5 Contrôle des composantes et des fonctions d'un disjoncteur

L'importance du rôle du disjoncteur a poussé les exploitants des réseaux électriques à installer des outils pour surveiller et contrôler les fonctions et les composantes du disjoncteur, ces outils sont donnés dans le tableau 1.3.

| Contrôle des composants ou des fonctions d'un disjoncteur | | |
|--|--------------------------------------|--|
| Composants ou fonctions | Paramètres | Moyens (exemples) |
| Chambre de coupure | Température | Thermovision, caméra infrarouge |
| | Résistance de contact | Mesure de résistance |
| | Durée d'arc | Transformateur de courant ; courbe de déplacement de contact |
| Isolation électrique | Densité du SF6, taux de fuite du SF6 | Densimètre ; mesures de pression et de température |
| | Qualité du SF6 | Chromatographie |

| | | |
|--------------------------|--|---|
| | Humidité dans le SF6 | Analyse de gaz |
| | Décharges partielles (mauvais contact, présence de particules) | Analyse des ondes UHF Émission acoustique |
| | Effet corona | Analyse spectrale |
| | Arc interne | Fibre optique fluorescente |
| Fonctionnement mécanique | Vitesse (ouverture et fermeture) | |
| | Synchronisme chambres | |
| | Durée de manœuvre | Transducteurs de position |
| | Discordance de phases | Chronométrage par microprocesseurs associés aux transducteurs de position |
| | Course, position des contacts | |
| | Intégrité mécanique, desserrages | Rayons X |
| | Nombre de manœuvres | Compteur |
| Équipement auxiliaire | Continuité du circuit (bobines) | Injection de faibles courants de surveillance |
| | Température | Thermostat |
| | Position des contacts | Contacts auxiliaires statiques autotestés |

Tableau 1.2 : Contrôle des composants ou des fonctions d'un disjoncteur

1.6 Dimensionnement des disjoncteurs

Le dimensionnement d'un disjoncteur est un travail complexe. On rappelle que le disjoncteur est le seul appareil qui possède un pouvoir de coupure en court-circuit ce qui rend son dimensionnement très délicat, car il y a davantage de contraintes à prendre en compte pour obtenir la performance de coupure et la stabilité du réseau électrique suite à son fonctionnement [11].

L'art de conception et de dimensionnement du disjoncteur consiste à donner des valeurs optimales aux différents paramètres de coupure afin d'obtenir les performances assignées à l'appareil avec un encombrement et une énergie de manœuvre aussi réduits que possible, mais suffisants pour conserver une marge de sécurité tenant compte des dérives potentielles des caractéristiques lors de la production.

1.6.1 Les critères de dimensionnement

- La modélisation d'arc électrique.
- La tension maximale à ne pas dépasser pour assurer la tenue diélectrique.
- La température limite de gaz lors de l'extinction de l'arc dans la chambre de coupure.
- Des règles empiriques obtenues en combinant des connaissances sur la physique de l'arc.
- Des règles de dimensionnement des pièces conductrices du courant permettant de ne pas dépasser les limites d'échauffement admissibles.
- Une valeur d'énergie maximale pouvant être dissipée dans la résistance lors de la fermeture.
- Déterminer la valeur de la capacité shuntée en parallèle avec la chambre de coupure pour améliorer la tenue diélectrique [11].

Dans ce domaine, comme dans d'autres domaines techniques, il n'y a pas toujours unicité de point de vue quant à la validité des critères. En fin de compte, c'est la comparaison avec les résultats expérimentaux qui permet de valider les critères de dimensionnement [11].

Conclusion

À travers ce chapitre, une description des disjoncteurs haute tension d'une manière générale et des disjoncteurs SF6 haute tension d'une manière particulière ont été donnée.

Le disjoncteur HT dans un réseau électrique est chargé d'interrompre et de rétablir la continuité du passage d'un courant électrique, cette fonction engendre des phénomènes électriques sévères.

Chapitre 02

*L'interruption des courants
alternatifs*

2.1 Introduction

L'interruption des courants électriques est une action indispensable à réaliser sur un circuit électrique afin d'assurer la sécurité des personnes et des biens en cas de défaut (fonction de sécurité automatique), mais aussi pour contrôler la distribution et l'utilisation de l'énergie électrique (commande volontaire).

Cette action est assurée par un appareil de coupure, soit dans un circuit à courant continu ou à courant alternatif, pour les deux cas elle résulte des phénomènes électriques et des contraintes sévères sur le réseau et l'appareil de coupure.

Pour expliquer les phénomènes électriques liés à la coupure d'un courant électrique (naissance d'arc, variation de résistance, échauffement thermique...) dans l'appareil de coupure, on va étudier l'interruption d'un courant continu et l'interruption d'un courant alternatif [12].

Ce chapitre fait préalablement une description de l'interruption des courants alternatifs car 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. Pour cela on emploie des appareils de déconnexion dont le choix dépend de la nature des courants à couper et du domaine d'application

2.2 Nature du courant électrique

Il existe deux grands types de courants : le courant continu et le courant alternatif. Le premier a une forme plate alors que le second est périodique (fréquence) et a la forme d'une sinusoïdale.

Dès la fin du XIX^{ème} siècle, le réseau à courant alternatif s'est imposé dans le monde et ce pour plusieurs raisons : une efficacité bien meilleure dans la transformation des niveaux de tension (transformateurs) et une génération ainsi qu'une consommation bien plus naturelle en alternatif (roue des moulins ou des turbines) qu'en continu.

Sur les réseaux électriques actuels, le courant est donc alternatif. Il a la forme d'une sinusoïdale dont la fréquence varie selon les pays et leurs normes en vigueur. Selon la fréquence du courant, l'appareillage présent sur les réseaux n'a pas tout à fait les mêmes caractéristiques. Par conséquent, comme ils ne sont pas soumis aux mêmes contraintes, les appareils de coupure n'auront donc pas non plus les mêmes capacités à couper un niveau de courant.

Précisons enfin qu'aujourd'hui, le courant continu revient petit à petit sur le devant de la scène avec le développement de centrales solaires par exemple.

Dans notre étude, nous nous intéresserons uniquement aux disjoncteurs électriques à courant alternatif haute tension [8].

2.3 L'interruption des courants électriques

2.3.1 Interruption d'un courant continu

On prend le cas le plus simple ; un circuit inductif (R, L) alimenté en courant continu (Fig. 2.1).

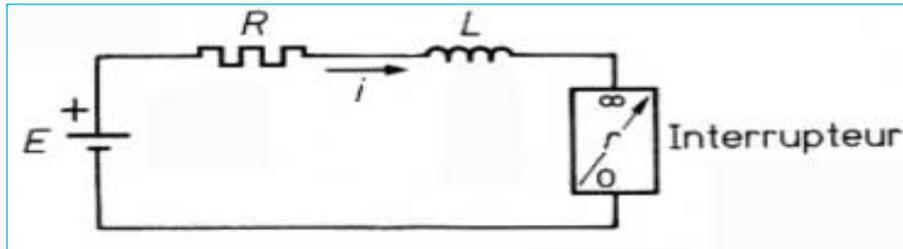


Fig. 2.1: circuit LR en courant continu [12]

- a Loi d'Ohm qui régit le circuit pendant la phase transitoire est:

$$E - Ri - L \frac{di}{dt} - ri = 0$$

- L'énergie de coupure est :

$$\int_0^T ri^2 dt = \int_0^T (E - Ri)i dt - \int_I^0 Li di$$

Avec :

T : la durée de la coupure

r : la résistance apparue lors de la coupure

E: la tension de la source

R: la résistance de circuit

L: l'inductance de circuit

i : le courant électrique

Cette énergie est constituée de deux types :

- Energie électrique qui dépend de temps :

$$\int_0^T (E - Ri)i dt$$

- Energie électromagnétique qui dépend de courant :

$$- \int_I^0 Li di = \frac{1}{2} LI^2$$

Pour réaliser l'interruption du courant parcourant ce circuit, il faut que la résistance r de l'interrupteur est supposée initialement nulle, croie et devienne infinie, en d'autres termes, il faut que sa conductance diminue puis s'annule.

Lorsque cette condition unique est réalisée, l'appareil devenu isolant n'est plus traversé par aucun courant.

La variation de la résistance de l'interrupteur en fonction de l'évolution du courant de coupure est représentée dans la (Fig. 2.2) [12].

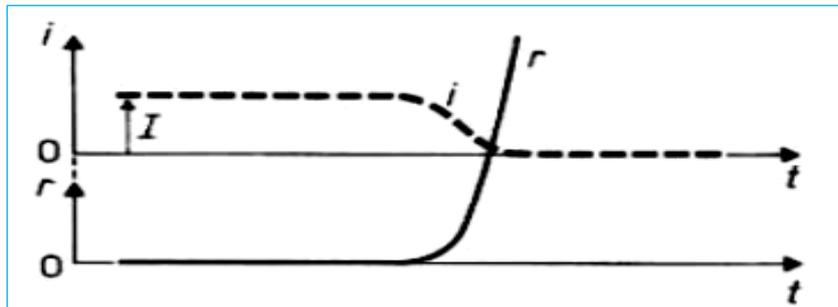


Fig. 2.2 : Variation de la résistance en fonction du courant de coupure [12].

2.3.2 Interruption d'un courant alternatif

On prend le cas le plus simple ; un circuit inductif (R, L) alimenté en courant alternatif (fig. 2.3).

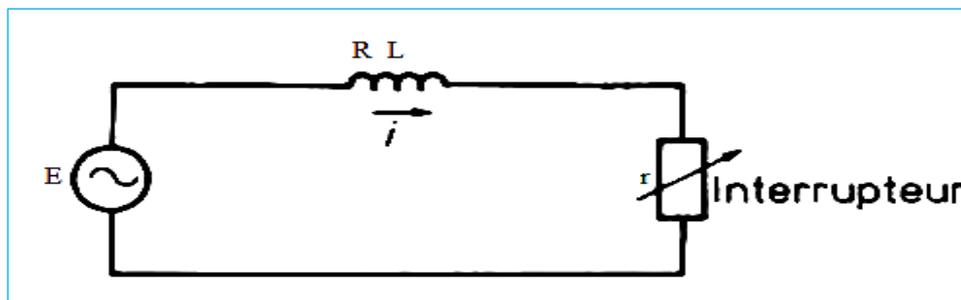


Fig. 2.3 : Circuit R L en courant alternatif [12].

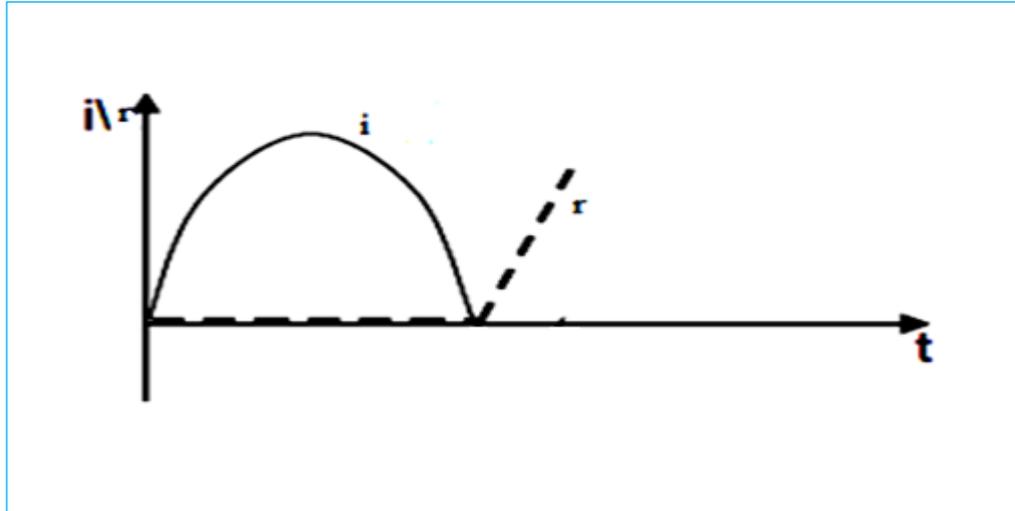


Fig. 2.4 : Une coupure au passage par zéro [12].

Pour l'interruption d'un courant alternatif, l'appareil de coupure va subir les mêmes phénomènes et contraintes du cas d'un courant continu, qui seront plus importants et sévères, mais avec la possibilité de prendre des précautions afin de les optimiser.

2.4 Les différents courants à couper dans un réseau HT

2.4.1 La coupure de courants normaux de charge

Un courant de charge de quelques ampères à quelques centaines d'ampères, faible par rapport au courant de défaut, qui sera coupé sous tension et en charge (inductive ou capacitive) pour un fonctionnement normal avec des valeurs nominales [12].

2.4.2 La coupure des courants de défaut

Un courant de défaut a une valeur plus importante par rapport au courant normal de charge, qui sera coupé sous tension et en charge pour un fonctionnement critique, avec des valeurs et contraintes sévères. Il est le résultat des anomalies dans le réseau électrique (les courts-circuits, les surtensions, les surcharges et les régimes transitoires lors des manœuvres). Cependant, les défauts les plus contraignants sont les courts circuits [12].

2.5 Des types défauts

Les défauts sont définis comme étant des événements qui contribuent à la violation des limites de conception des composants du réseau électrique du point de vue isolants, isolation galvanique, niveau de tension et de courant etc. Le court circuit est défini comme étant une connexion anormale (relativement de basse impédance) entre deux points de potentiels différents,

produite accidentellement ou intentionnellement. Le terme défaut ou court circuit est souvent utilisé pour décrire un court circuit.

Les courts circuits sont principalement caractérisés par :

— Leurs durées:

- Auto-extincteurs : lorsqu'ils disparaissent d'eux-mêmes ;
- Fugitifs : ils disparaissent après l'ouverture des disjoncteurs de protection et ne reparaisent pas lors de la remise en service ;
- Permanents : ils nécessitent la mise hors tension et l'intervention du personnel d'exploitation ;

— Leurs origines:

- 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 ou atmosphérique ;
- Ou à la suite d'une dégradation de l'isolement, consécutive à la chaleur, l'humidité ou une ambiance corrosive ;

— Leurs localisations : interne ou externe à une machine ou à un tableau électrique;

— Leurs formes:

- Monophasés (entre une phase et la terre) : 80 % des cas ;
- Biphasés (entre deux phases avec ou sans mise à la terre) : 15 % des cas, ces défauts dégénèrent souvent en défauts triphasés ;
- Triphasés (entre trois phases) : 5 % seulement d'origine, les courts circuits biphasés et triphasés sont souvent regroupés sous l'appellation de courts circuits polyphasés.

Sur les réseaux HT et THT, les courants de court circuit les plus élevés atteignent plusieurs dizaines de Kilo Ampères, par exemple, les installations du réseau français à 400 kV sont conçues pour tenir un courant de court circuit de 40 KA et même de 63 KA sur quelques sites. Dans certains pays, des valeurs de 50 KA sont courantes. Il est important de signaler que les courants de défaut sont principalement de la fréquence du réseau mais ils peuvent également contenir des composantes à haute fréquence. De telles composantes peuvent comprendre le courant dérivé d'un condensateur ou capacités parasites dans les câbles et des douilles [13].

Le tableau. 2.1, donne les formules permettant de calculer le courant initial des différents types de court-circuit en se basant sur la méthode des composantes symétriques.

| Type de Court-circuit | I_{cc} Cas general | I_{cc} Cas de défaut éloigné |
|-----------------------|--|--------------------------------------|
| Triphasé | $\frac{Un}{\sqrt{3} \cdot Zd}$ | $\frac{Un}{\sqrt{3} \cdot Zd}$ |
| Biphasé isolé | $\frac{Un}{Zi + Zd}$ | $\frac{Un}{2 \cdot Zd}$ |
| Biphasé terre | $\frac{Un \cdot \sqrt{3} \cdot Zi}{Zd \cdot Zi + Zi \cdot Zo + Zd \cdot Zo}$ | $\frac{Un \cdot \sqrt{3}}{Zd + 2Zo}$ |
| Monophasé | $\frac{Un \cdot \sqrt{3}}{Zd + Zi + Zo}$ | $\frac{Un \cdot \sqrt{3}}{2Zd + Zo}$ |

Tableau 2.1 : Courants de court-circuit selon CEI 60909.

Un La tension nominale

Zd Impédance directe

Zo Impédance homopolaire

Zi Impédance inverse

D'après le tableau, on constate que le défaut triphasé est considéré comme le défaut le plus sévère.

2.6 Les contraintes dues à l'interruption

L'action d'interruption de courant a des conséquences indésirables sur l'appareil de connexion lui-même, ce dernier est chargé de réaliser l'action d'une part et le réseau électrique d'autre part [14,15].

Ces conséquences donnent à l'interruption une difficulté pour la réaliser, la réussir et la maîtriser. Elles peuvent être résumés comment suit :

- les surtensions dans le réseau dues aux manœuvres.
- les oscillations de la tension et de courant du réseau.
- des chutes de tension supplémentaires dans le réseau.
- des pertes de puissance dans le réseau.

- un déséquilibre du réseau dans le cas où la coupure est réussie pour les deux phases et la troisième est fermée, ou un décalage de temps entre les manœuvres d'ouverture des trois phases.
- la naissance d'arc électrique entre les contacts du disjoncteur.
- la puissance dissipée dans l'arc par effet joule est importante et difficile de la refroidir.
- l'arc donne une grande vitesse de d'ionisation du milieu de coupure.
- la continuité de courant entre les contacts lors de la coupure, qui est assurée par l'arc.

2.7 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 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 [23].

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].

2.7.1 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, excitées 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 [8]. 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].

2.7.2 La décharge électrique

D'habitude une décharge électrique se crée essentiellement par les collisions des électrons avec les molécules du gaz. Il s'en suit la génération de nouveaux électrons et ions dans les avalanches de Townsend qui se développe jusqu'à l'établissement d'un état de maintenance. La décharge alors devient indépendante des sources extérieures qui produisent les charges électriques libres dans le gaz. L'efficacité des électrons comme producteurs de nouveaux ions, dépend de leur énergie et donc de leur libre parcours dans le champ électrique. Et comme les électrons dans une décharge ne sont pas mono-énergétiques on doit déduire leur fonction de distribution des énergies pour une étude quantitative [17].

2.8 Caractéristique de l'arc

Les conditions de fonctionnement auxquelles est soumis cet arc (soufflage, turbulence, déplacement sous l'effet de champs magnétiques, etc.) [12].

2.8.1 Les caractères thermiques

L'arc électrique est considéré comme un plasma thermique qui caractérisé par :

- Une température élevée
- La création d'une différence de pression dans le milieu
- L'ionisation du milieu
- La provocation des réactions (chimique et thermique) dans le milieu
- Un rayonnement important [14].

2.8.2 Les avantages de l'arc électrique

L'un des avantages major de l'arc électrique est de dissiper l'énergie le courant sous forme d'une énergie par effet joule lors de son interruption [14].

2.8.3 Les inconvénients de l'arc électrique

- La soudure des contacts d'appareil électrique de connexion

- Emission des rayons dangereux
- Dégradation rapide des appareils électriques
- L'explosion
- La complication de l'interruption d'un courant
- Pas de rupture instantanée du circuit [14].

2.8.4 L'arc électrique dans le disjoncteur

L'arc électrique est un milieu dans lequel le passage des électrons est accéléré par les tensions élevées aux bornes des électrodes. La génération et dissipation de l'énergie par effet Joule provoque une augmentation très rapide de la température. La formation du plasma conduit à la libération des électrons dans le fluide, ce qui lui confère d'excellentes propriétés de conduction électrique.

L'annulation du champ électrique entre les électrodes amène à l'annulation du courant, mais pas à la disparition du plasma. La vitesse de récupération de la rigidité diélectrique dans l'espace inter électrode dépend de la vitesse de refroidissement du gaz. Le paramètre qui décrit mieux l'extinction de l'arc électrique dans un disjoncteur est donc sa température [18].

2.8.4.1 Le pouvoir de coupure

Le courant de court-circuit est la somme de deux composantes; périodique et apériodique présentées sur la (Fig. 2.5), il faut le couper avant de perturber le réseau.

Le pouvoir de coupure assigné est la valeur la plus élevée du courant de court-circuit (le cas court-circuit triphasé car il est le plus sévère) que le disjoncteur doit être capable d'interrompre dans les conditions d'emploi et de fonctionnement fixées par la norme CEI60056.

Le pouvoir de coupure assigné en court-circuit est caractérisé par trois valeurs :

- la valeur efficace de sa composante périodique.
- le pourcentage de la composante apériodique par rapport à la composante périodique.
- la durée entre la détection du défaut et l'instant de séparation des contacts du disjoncteur [2].

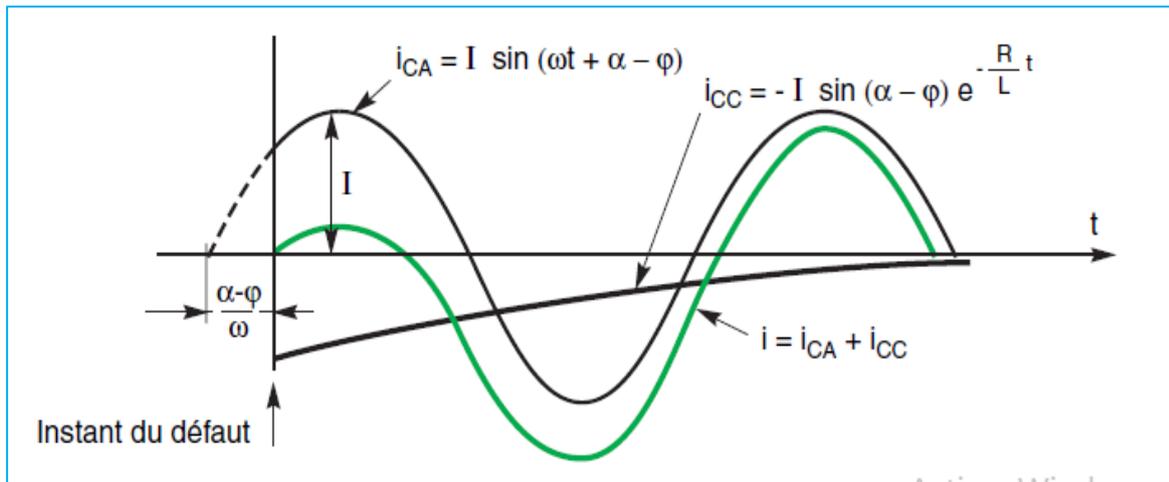


Fig. 2.5 : La forme du courant prise en considération pour le pouvoir de coupure.

2.8.4.2 Le pouvoir de fermeture assigné

Pendant une manœuvre d'établissement sous tension, l'arc s'amorce entre contacts avant même que ces contacts se touchent.

L'arc s'interrompt au moment de l'entrée en contact. L'intervalle de temps pendant lequel un arc de pré-amorçage subsiste s'appelle la durée de pré-arc.

Lors d'une fermeture sur court-circuit, le contact mobile doit vaincre la pression des gaz chauds de l'arc de pré-amorçage, l'effort de répulsion des contacts, puis l'effort de pénétration dans les contacts fixes.

L'énergie nécessaire à l'enclenchement sur court-circuit est donc toujours supérieure à celle qui est nécessaire pour l'enclenchement à vide.

Cette énergie étant en grande partie prélevée sur l'énergie cinétique des parties mobiles, cette dernière doit avoir une valeur suffisante pour que la vitesse d'entrée en contact reste suffisante. En effet, une diminution de la vitesse de fermeture entraîne une augmentation de la durée du pré-amorçage et donc de l'énergie générée par l'arc de pré-amorçage.

Le pouvoir de fermeture est égal au produit de la valeur efficace de la composante périodique du pouvoir de coupure en court-circuit par les facteurs suivants :

- 2,5 : pour une fréquence assignée de 50 Hz et la valeur normalisée de la constante de temps de 45 ms.
- 2,6 : pour une fréquence assignée de 60 Hz et la valeur normalisée de la constante de temps de 45 ms.

- 2,7 : pour toutes les valeurs de la constante de temps des applications particulières.

La norme CEI 60056 impose de vérifier le pouvoir de fermeture sur court-circuit d'un disjoncteur dans deux situations critiques qui sont censées couvrir tous les cas possibles en service :

- établir un courant totalement asymétrique, c'est-à-dire lorsque l'instant d'établissement du courant s'effectue à un zéro de tension ;
- établir un courant symétrique avec une durée de pré-amorçage maximale ; dans ce cas, l'établissement du courant doit se faire au voisinage d'une valeur crête de tension.

La vérification de l'établissement du courant totalement asymétrique peut se faire sous une tension réduite, soit en triphasé, soit en monophasé, en disposant un pôle en série avec les deux autres en parallèle. [2]

2.8.4.3 La tension transitoire de rétablissement

La tension transitoire de rétablissement est la tension électrique qui se rétablit aux bornes d'un appareillage électrique lorsqu'il interrompt un courant alternatif. C'est un paramètre qui influe fortement sur la réussite d'une coupure de courant dans un réseau à haute tension.

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 et peut atteindre la force électro cette tension transitoire de rétablissement impose la circulation d'un très faible courant entraînant une dissipation de l'énergie par effet joule.

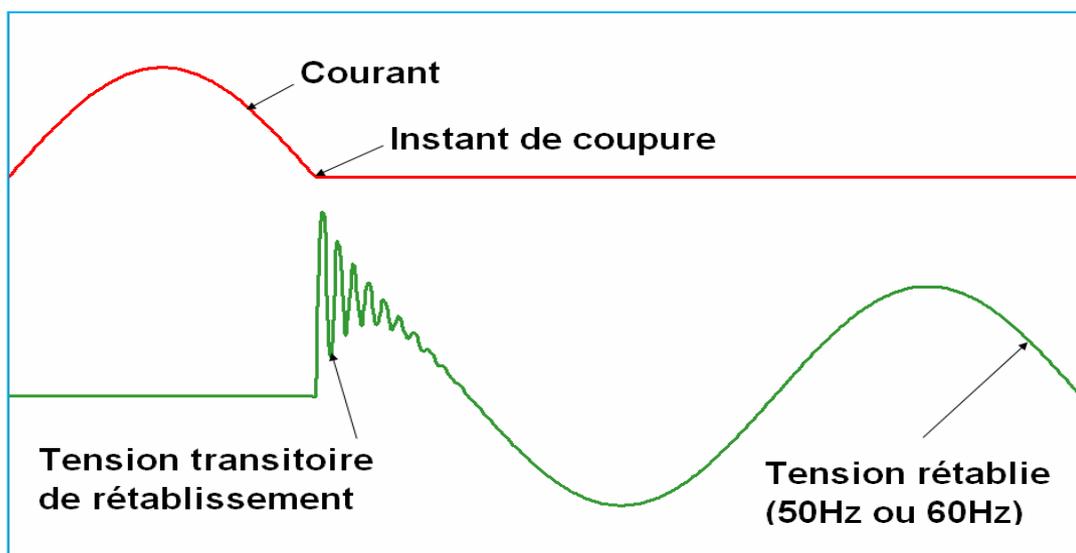


Fig. 2.6 : tension transitoire de rétablissement

2.9 Conditions nécessaires pour réussir la coupure

Tout le problème de coupure d'un courant alternatif va résider dans la vitesse d'extinction de l'arc naît entre les contacts, la perte de la conductance du courant entre les contacts et la reprise des propriétés initiales du milieu entre les contacts pour devenir rapidement isolant.

Pour cela, il faut assurer la vérification de quelques conditions par le dispositif d'interruption de courant alternatif.

- Choisir un appareil caractérisé par des valeurs assignées supérieures aux valeurs des contraintes exercées à l'endroit où il sera installé.
- Minimiser l'énergie et l'intensité de l'arc au moment de la coupure, en réalisant la coupure lors d'un passage naturel du courant par zéro.
- La coupure au passage par zéro du courant s'accompagne de surtensions au moment de l'interruption qui surviennent à cause de l'effet capacitif des circuits électriques
- Un milieu avec une conductivité thermique importante en particulier dans la phase d'extinction pour évacuer l'énergie thermique de l'arc (conductivité thermique).
- Un milieu qui retrouve ses propriétés diélectriques le plus vite possible afin d'éviter un réamorçage intempestif.
- A température élevée, un milieu qui soit un bon conducteur électrique pour réduire la résistivité de l'arc et dissiper son énergie emmagasinée (conductivité électrique).
- A température faible, un milieu qui soit un bon isolant électrique pour faciliter le rétablissement de la tension.
- Un milieu qui ne va pas engendrer des réactions indésirables, lors de la présence d'un arc électrique (développer des rayons dangereux, explosion ...) [15,20].

2.10 Les techniques de coupure en HT

Dès que l'on dépasse quelques centaines de volts et quelques dizaines d'ampères, la séparation des contacts dans l'air ne suffit pas pour (couper) le courant. Lorsque les contacts se séparent, le courant continue à passer par un arc.

Après avoir caractérisé les courants à couper et les différentes contraintes sur un plan théorique, il faut exploiter quelques techniques, qui vont nous permettre de réussir et d'optimiser l'interruption du courant alternatif à haute tension [19].

2.10.1 Coupure au passage du courant par zéro

Avec la décroissance du courant, la température du noyau d'arc diminue, de ce fait, la conductivité électrique commence aussi à diminuer.

A l'approche du zéro de courant, les échanges thermiques entre la gaine de l'arc et son noyau deviennent très importants. Celui-ci disparaît entraînant la disparition de la conductivité.

Après un passage du courant par zéro l'arc sera éliminé, il faut l'empêcher de se rallumer. Pour cela, il sera obligé de renouveler continuellement le milieu isolant entre les contacts

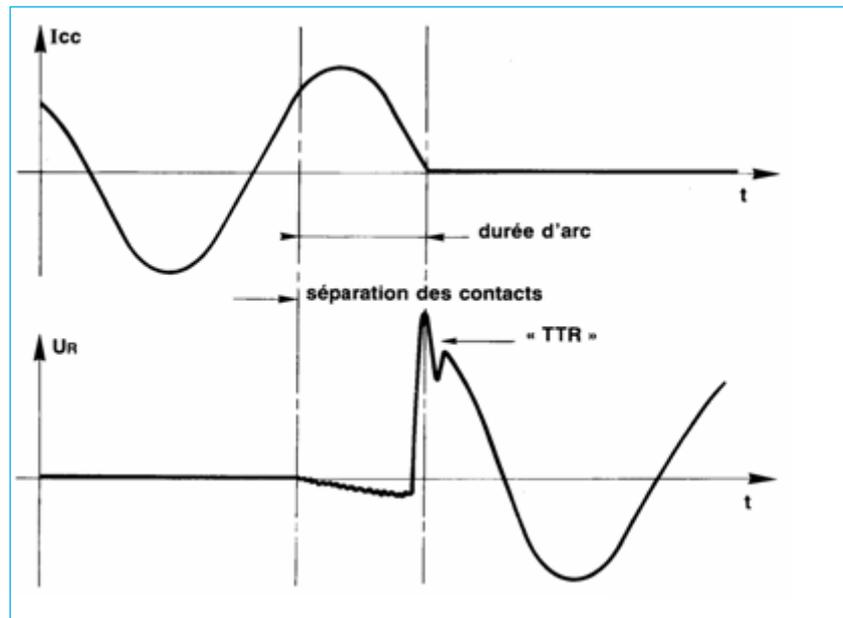


Fig. 2.7 : Oscillogramme typique de la coupure d'un courant de court-circuit [4].

Il est quasiment impossible de séparer les contacts très exactement au zéro naturel de courant, du fait de l'incertitude d'appareil mesure-commande et il est aussi impossible d'accorder aux contacts une vitesse suffisante, pour une coupure au même moment du passage par zéro. Par conséquent la coupure est réalisable au voisinage du passage par zéro, afin de réduire l'intensité de l'arc et l'énergie de coupure.

2.10.2 Répartition de la coupure dans des chambres en séries

Ce n'est pas économique de développer un modèle de chambre de coupure pour chaque combinaison des valeurs de tensions, de courant permanent et de courant de court-circuit. De plus, il faudrait pour vérifier leurs performances de coupure, des moyens d'essais considérables, voire irréalisables. Les constructeurs ont donc été conduits à concevoir des éléments de base et à les combiner pour répondre aux besoins.

Il est possible, en particulier, d'assembler des chambres de coupure en série dans chaque pôle à condition que :

- Leurs manœuvres soient simultanées (à quelques millisecondes près).
- La tension soit répartie judicieusement entre elles.

Cette technique est utilisée lorsque la capacité naturelle de la chambre de coupure est insuffisante à supporter la tension, on peut assembler des chambres de coupure en série et ajouter des condensateurs (pilotes) en parallèle avec les chambres.

2.11 La coupure dans un disjoncteur SF6 à haute tension

La coupure sera effectuée dans la chambre de coupure du disjoncteur, apparemment ce principe simple cache tout un ensemble de phénomènes physiques délicats et très complexes, qui surviennent lors de l'apparition de l'arc.

Trois phases du processus de coupure d'un courant alternatif sont à noter [12] :

2.11.1 Position "fermé"

Lorsque le disjoncteur est en condition normale, le circuit étant fermé, le courant circule à travers ses contacts.

2.11.2 Ouverture

Lors d'un déclenchement du disjoncteur, la partie mobile se déplace vers le bas, entraînant la séparation des contacts. Le courant passe alors par une autre série de contacts, appelés "contacts d'arc". Quand la partie mobile a fait une course suffisante, les contacts d'arc se séparent, ce qui provoque l'amorçage d'un arc entre ces contacts. Les contacts d'arc sont réalisés avec des matériaux à base de tungstène de manière à pouvoir supporter sans dommage les effets de l'arc électrique.

Cette phase se fait en trois périodes:

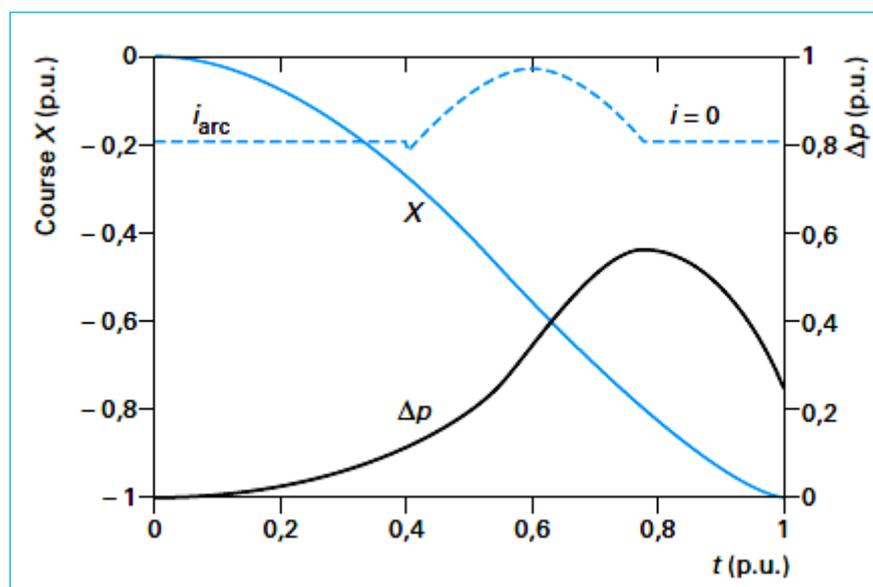


Fig. 2.9 : Evolution des paramètres de l'arc pendant l'ouverture [12].

2.11.2.1 La période d'attente

Période entre l'ouverture des contacts et le zéro du courant où l'arc électrique est constitué d'une colonne de plasma composée d'ions et d'électrons. Cette colonne est conductrice sous l'effet d'une température élevée due à l'énergie dissipée par l'arc. La tension entre les deux contacts s'appelle la tension d'arc et c'est une composante très importante dans le choix du milieu de coupure, car elle définit la valeur de l'énergie dissipée [7].

2.11.2.2 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 lorsque la puissance de refroidissement développée par le disjoncteur et exercée sur l'arc électrique est suffisante (la puissance de refroidissement est supérieure à l'énergie fournie à l'arc par effet Joule).

Ce processus va lui permettre aussi de régénérer l'isolation diélectrique entre les contacts d'arc [7].

2.11.2.3 La période Post-Arc

Pour que la coupure soit réussie, il faut que la vitesse de régénération diélectrique soit plus rapide que l'évolution de la tension transitoire de rétablissement TTR, sinon on assiste à un phénomène de réallumage ou réamorçage de l'arc [7].

La figure (Fig. 2.10) présente Evolution des paramètres de l'arc pendant la période Post-Arc

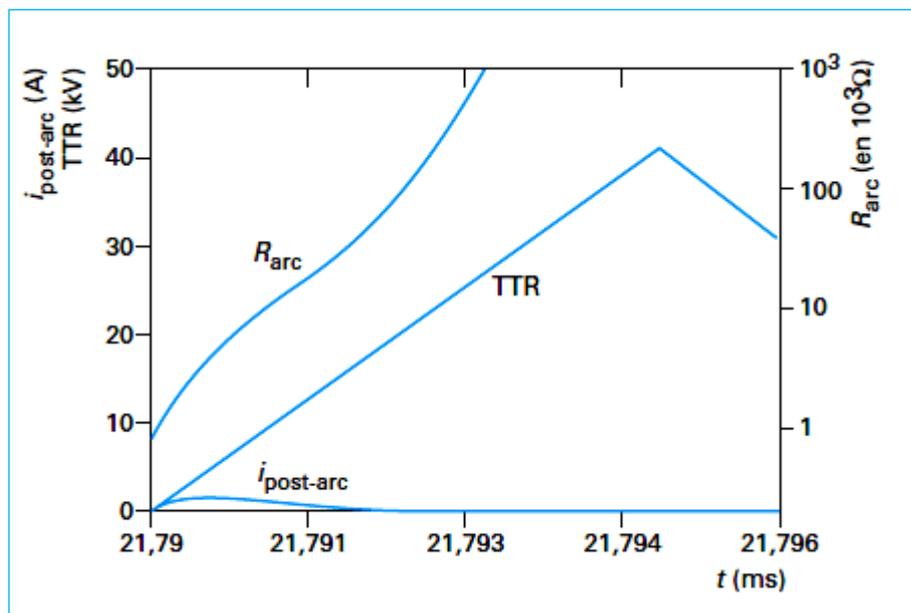


Fig. 2.10 : Evolution des paramètres de l'arc pendant la période Post-Arc [4].

2.11.3 Position "ouvert" Après l'extinction de l'arc, le disjoncteur est complètement ouvert, et la tenue diélectrique entre les contacts est suffisante afin d'éviter que l'arc se rallume.

La figure (Fig. 2.11) montre la phase intermédiaire entre les deux états qui présente le processus de coupure d'un courant

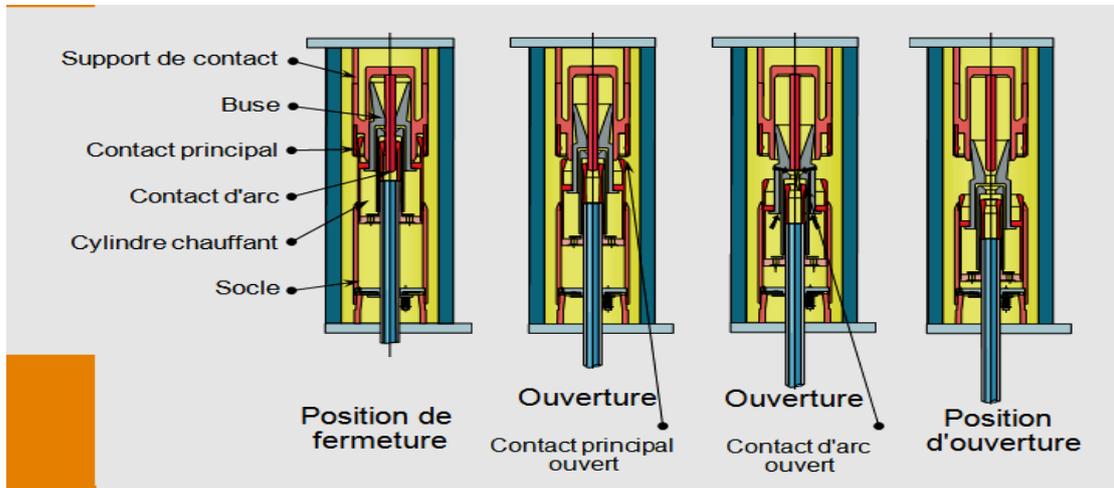


Fig. 2.11 : Les phases du processus de coupure d'un courant alternatif dans disjoncteur SF6 HT [21]

- La figure (Fig. 2.12) montre la durée de coupure d'un courant alternatif qui varie selon la fréquence de courant, elle varie entre la réception d'un signal d'ouverture des contacts et l'extinction finale de l'arc

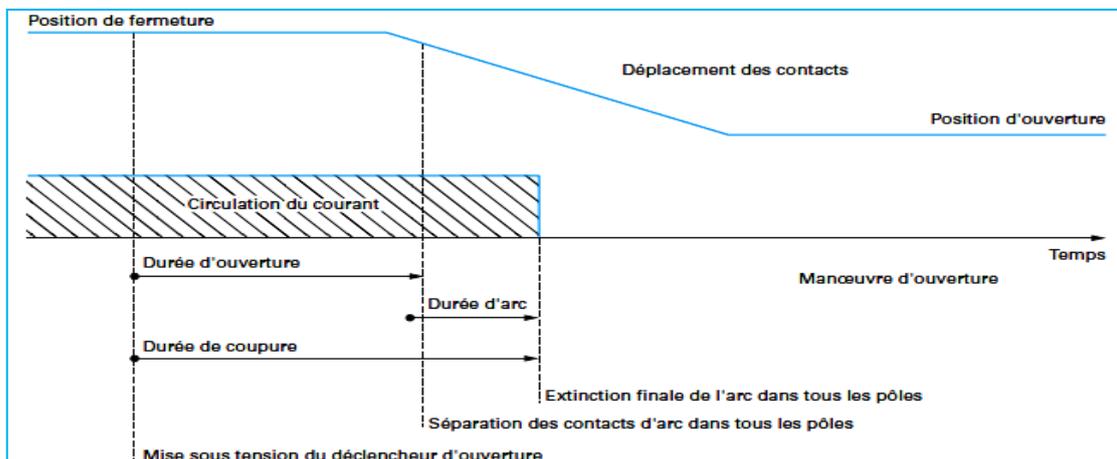


Fig. 2.12 : L'évolution et la durée de l'arc dans la phase d'ouverture du disjoncteur [2]

Conclusion

Pour réussir l'interruption d'un courant et améliorer les performances de fonctionnement d'un disjoncteur, il faut maîtriser les phénomènes électriques liés à la coupure du courant électrique.

Les tâches les plus difficiles à maîtriser sont l'extinction de l'arc électrique et le rétablissement de la tenue diélectrique entre les contacts.

Chapitre 03

Les modèles d'arc à boîte noire

3.1 Introduction

La réussite de l'interruption d'un courant par le disjoncteur SF6 HT réside principalement dans la capacité du disjoncteur à éteindre l'arc électrique développé lors de l'interruption d'un courant et sa capacité à inhiber son apparition après l'extinction.

La modélisation de l'arc a été l'objet de recherche et de travail de plusieurs scientifiques, pour bien décrire le comportement dynamique de l'arc dans les disjoncteurs HT par un modèle d'équation mathématique afin de maîtriser l'interruption des courants de défauts.

3.2 Un aperçu sur la modélisation d'arc électrique

Plusieurs hypothèses ont été supposées sur le comportement de l'arc afin de lui donner un modèle mathématique décrivant son évolution par phénomène physique, qu'on peut les classer en trois types :

- **Les modèles diélectriques et thermiques** : ces modèles sont basés sur la description de l'évolution de l'arc par rapport à la variation en fonction du temps de :

- ses dimensions (section, longueur).
- sa température.
- la vitesse d'ionisation du milieu environ gazeux.
- la pression et le volume du milieu environ gazeux.
- l'influence de rayonnement lumineux émit par l'arc sur le gaz environ.

- **Les modèles empiriques** : sont des équations mathématiques qui décrivent l'évolution dynamique de l'arc sans un sens physique, ils sont basés sur une très longue expérience dans le domaine et la réalisation d'un grand nombre des essais expérimentaux.

- **Les modèles à boîte noire** : ce sont des modèles qui décrivent l'arc comme une composante électrique non linéaire variable en fonction de temps et en fonction de plusieurs paramètres tels que:

- le courant de l'arc.
- la tension de l'arc.
- la puissance électrique.
- la conductance et la résistance du milieu environ.

3.3 Représentation des modèles d'arc à boîte noire

Les modèles d'arc à boîte noire sont exprimés mathématiquement par une formule de la résistance ou de la conductance variable avec le temps, en fonction du courant et de la tension de l'arc et de plusieurs paramètres.

La majorité de ces modèles sont représentés par une équation différentielle du premier ordre de la forme :

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{P} - 1 \right) \quad (3-1)$$

g : la conductance de l'arc.

u : la tension de l'arc.

i : le courant de l'arc.

Tau : la constante de temps de désionisation.

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

Pour ces modèles (Tau et P) sont décrits comme des paramètres indépendants du modèle d'arc à boîte noire.

3.4 Les modèles de base

Historiquement les modèles d'arc à boîte noire avaient une base physique, les premières descriptions du comportement de l'arc ont été données par le modèle Cassie (1939) et par le modèle de Mayr (1943).

3.4.1 Le modèle de Mayr

Mayr supposa que l'arc est assimilable à un cylindre de rayon constant et de température variable et que l'évacuation d'énergie est due à la conduction thermique.

Ce modèle repose sur un nombre limité d'hypothèses.

- **Première hypothèse**

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

$$g = F(w) \quad (3-2)$$

Cela signifie qu'à une valeur w de l'énergie, il ne correspond qu'une seule valeur de la conductance g. Ce n'est pas tout à fait exact mais il n'y a pas une différence

fondamentale entre la réalité et cette hypothèse qui est nécessaire au traitement analytique du problème.

En dérivant les deux membres de la relation (3-2) par rapport au temps nous aurons:

$$\frac{dg}{dt} = F \cdot (w) \cdot \frac{dw}{dt} \quad (3-3)$$

La puissance fournie à l'arc par effet Joule est (ri^2). La puissance cédée par l'arc au milieu environnant est (P), on l'appelle aussi puissance de refroidissement.

A chaque instant l'une et l'autre peuvent varier, la puissance accumulée dans l'arc est donc ($ri^2 - P$).

Pendant l'intervalle de temps dt , $(ri^2 - P) \cdot dt$ correspond à la variation d'énergie dw dans l'arc, d'où:

$$\frac{dw}{dt} = ri^2 - P \quad (3-4)$$

L'équation (3-3) devient:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{F'(w)}{F(w)} (ri^2 - P) \quad (3-5)$$

- **Deuxième hypothèse**

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

$$F(w) = g = K \cdot e^{\frac{w}{w_0}} \quad (3-6)$$

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.

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

$$F(w)' = \frac{1}{w_0} K \cdot e^{\frac{w}{w_0}} \quad (3-7)$$

D'où

$$\frac{F'(w)}{F(w)} = \frac{1}{w_0} \quad (3-8)$$

- **Troisième hypothèse**

La puissance de refroidissement est supposée constante et égale à P_0 et compte tenu de la relation (3-8), la relation (3-5) devient:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{w_0} (ri^2 - P_0) = \frac{P_0}{w_0} \left(\frac{ri^2}{P_0} - 1 \right) \quad (3-9)$$

Soit $\tau = \frac{w_0}{P_0}$, la constante de temps de désionisation, l'équation (3-9) sera:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ri^2}{P_0} - 1 \right) = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{P_0} - 1 \right) \quad (3-10)$$

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

D'après la relation (3-9), il devait exister une variation linéaire de $\left(\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} \right)$ en fonction de la puissance fournie à l'arc (ui) 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 [24].

3.4.2 Le modèle de Cassie

Ce modèle fut apparu en 1939, Cassie supposa que le plasma de l'arc est un cylindre de rayon variable et de température constante et que les pertes d'énergie ne sont dues qu'à la convection et sont proportionnelles à la section de l'arc. Cassie a déduit l'équation suivante:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u^2}{U_0^2} - 1 \right) \quad (3-11)$$

U_0 : la tension statique de l'arc, elle est indépendante de l'intensité du courant (Fig. 3.1)

La courbe $\left(\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt}\right)$ en fonction de (u^2) devrait être une droite (Tau , U_0)

constantes dont l'intersection avec les axes permettrait de déterminer (Tau et U_0).

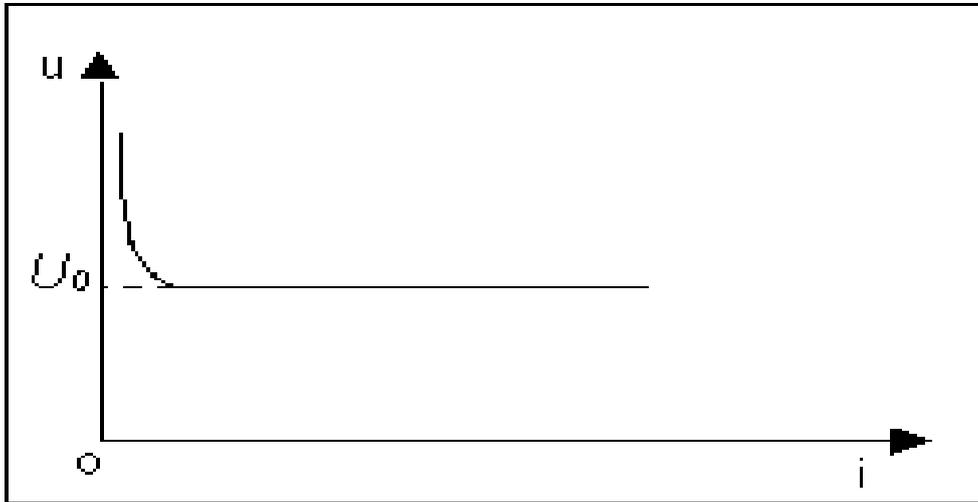


Fig. 3.1 : Caractéristique statique d'un arc de forte puissance.

Ce modèle présente des écarts assez importants avec les résultats expérimentaux, car les pertes ne sont pas uniquement dues à la convection et que l'hypothèse d'une température constante est loin d'être vérifiée [24].

Pour des valeurs élevées du courant, la tension de l'arc reste sensiblement constante et égale à (U_0), elle prend une forme hyperbolique aux faibles courants, pour cette raison on dit que ce modèle s'applique aux régions de l'arc à fortes intensités.

3.4.3 Comparaison des deux modèles

| Les critères | Modèle de Mayr | Modèle de Cassie |
|----------------------|---|---|
| Conductance de l'arc | Par variation du degré d'ionisation | Par variation du diamètre de l'arc |
| Pertes de chaleur | Par conduction thermique | Par convection thermique |
| Expression dynamique | $\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\text{Tau}} \left(\frac{ui}{Po} - 1 \right)$ | $\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\text{Tau}} \left(\frac{u^2}{U_0^2} - 1 \right)$ |
| Adaptation | Régions des courants faibles | Régions des courants forts |

Tableau 3.1 : Comparaison entre le modèle de Mayr et le modèle de Cassie.

On peut observer que:

- Chacun des deux modèles est décrit par deux paramètres seulement.
- Les deux modèles donnent une description qualitative du comportement de l'arc et ne peuvent pas être utilisés pour des représentations quantitatives.

Par conséquent un grand nombre de modifications de ces équations a été formulé, plus de paramètres ont été introduits dans les équations de ces modèles, leur donnant ainsi une forme plus générale et rendant les paramètres plus adaptatifs [25].

3.5 Les modèles d'arc améliorés

Suivant les modifications proposées, les modèles de l'arc peuvent être divisés en plusieurs groupes:

- Combinaison des équations de Cassie et de Mayr.
- Description de l'arc par plus de deux constantes.
- Les paramètres de l'arc sont considérés comme des fonctions.
- Division de l'arc en plusieurs parties en série.
- Les modèles stochastiques.

Tous ces modèles gardent l'idée de base de la description du comportement de l'arc en utilisant les paramètres Tau et P avec différentes interprétations physiques [25]. Les modèles d'arc améliorés les plus utilisés sont les suivants :

3.5.1 Le modèle de Mayr modifié

C'est une version très répandue de l'équation de Mayr modifiée, la puissance de refroidissement est en fonction du courant de l'arc [25, 26, 27, 28].

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\text{Tau}} \left(\frac{ui}{P_0 + U_0 |i|} - 1 \right) \quad (3-12)$$

La puissance de refroidissement peut être trouvée aussi avec la pression de remplissage (p) qui dépend du disjoncteur:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\text{Tau}} \left(\frac{ui}{p(P_0 + U_0 |i|)} - 1 \right) \quad (2-13)$$

g la conductance de l'arc.

- u la tension de l'arc.
- i le courant de l'arc.
- Tau la constante de temps de l'arc.
- p la pression de remplissage du disjoncteur.
- P₀ la puissance de refroidissement.
- U₀ le pourcentage constant de la caractéristique u-i de l'état statique (Figure 3.1).

Les paramètres indépendants de ce modèle sont (Tau, P₀ et U₀).

3.5.2 Le modèle de Habedank

L'arc est considéré comme une entité physique formée par deux composants en série, l'un est décrit par l'équation de Mayr et l'autre par l'équation de Cassie (Fig. 3.2) [27, 28].

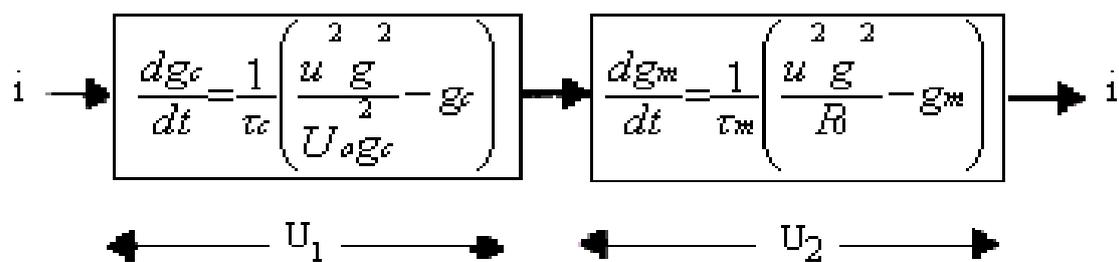


Fig. 3.2 : Le modèle de Habedank

Les équations du modèle sont :

$$\frac{dg_c}{dt} = \frac{1}{\text{Tau}_c} \left(\frac{u^2}{g^2} - \frac{g_c}{U_0} \right) \quad (3-14)$$

Et

$$\frac{dg_m}{dt} = \frac{1}{\text{Tau}_m} \left(\frac{u^2}{g^2} - \frac{g_m}{P_0} \right) \quad (3-15)$$

Avec

$$\frac{1}{g} = \frac{1}{g_c} + \frac{1}{g_m}$$

- g la conductance totale de l'arc
 u la tension totale de l'arc
 i le courant de l'arc
 U₀ le pourcentage constant de la caractéristique u-i de l'état statique (Fig. 3.1).
 g_c la conductance de l'arc décrite par l'équation de Cassie.
 Tau_c la constante de temps de Cassie.
 P₀ la puissance de refroidissement de l'état statique de Mayr.
 g_m la conductance de l'arc décrite par l'équation de Mayr.
 Tau_m la constante de temps de Mayr.

Chaque équation contient deux paramètres, donc ce modèle à quatre paramètres indépendants à déterminer (Tau_c, U₀, Tau_m et P₀).

3.5.3 Le modèle de Schwarz

C'est le modèle le plus utilisé et rencontré dans la littérature scientifique [31,32,33,34]. La constante de temps et la puissance de refroidissement dépendent de la conductance de l'arc:

$$Tau = Tau_0 \cdot g^\alpha$$

$$P = P_0 \cdot g^\beta$$

L'équation de ce modèle est :

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{Tau_0 g^\alpha} \left(\frac{ui}{P_0 g^\beta} - 1 \right) \quad (3-16)$$

- g la conductance de l'arc
 u la tension de l'arc
 i le courant de l'arc.
 Tau₀ la constante de temps de l'arc
 P la puissance de refroidissement
 α le paramètre qui influe sur τ en fonction de g
 β le paramètre qui influe sur P en fonction de g .

Avec (α et β) sont tous les deux, des paramètres expérimentaux constants.

Pour $\alpha=0$ et $\beta=1$ on aura le modèle de Cassie :

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\text{Tau}} \left(\frac{ui}{P} - 1 \right) = \frac{1}{\text{Tau}_0} \left(\frac{ui}{P_0 \cdot g} - 1 \right) = \frac{1}{\text{Tau}_0} \left(\frac{u^2}{P_0} - 1 \right) \quad (3-17)$$

L'expression de la variation de(g) en fonction de (u^2).

Pour $\alpha=0$ et $\beta=0$ on aura le modèle de Mayr :

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\text{Tau}_0} \left(\frac{ui}{P_0} - 1 \right) \quad (3-18)$$

L'expression de la variation de(g) en fonction de (ui) la puissance fournit à l'arc par effet de Joule.

Les quatre paramètres indépendants de ce modèle sont (Tau_0 , α , P_0 et β), ils varient suivant le disjoncteur et les conditions du circuit.

3.5.4 Le modèle de KEMA

C'est un modèle très récent constitué de trois sous-modèles en série. Les processus lents de l'arc sont représentés par un modèle hybride de Cassie-Mayr, les processus rapides sont décrits par un modèle de Mayr pur, tandis que les processus intermédiaires suivent un modèle presque Mayr. (Figure 3-3) [35, 36].

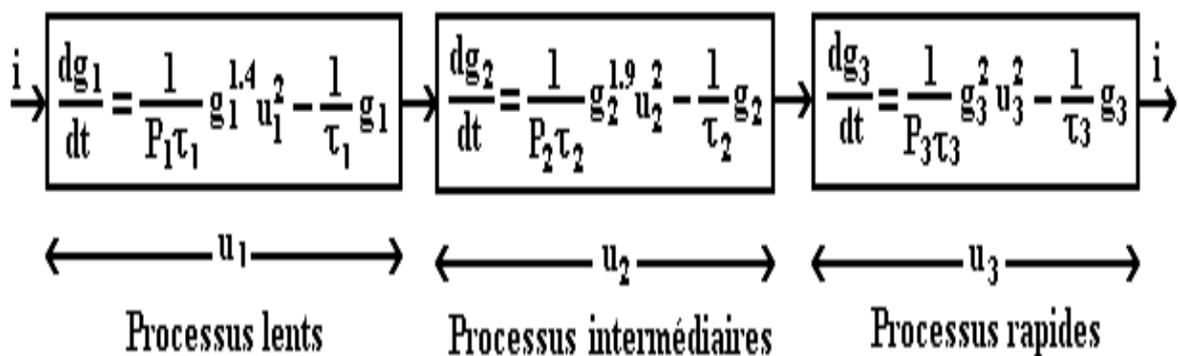


Fig. 3.3 : Le modèle de KEMA

Chaque sous-modèle est décrit par une équation différentielle du premier ordre :

$$\frac{dg_j}{dt} = \frac{1}{P_j \text{Tau}_j} \cdot g_j^{\lambda_j} u_j^2 - \frac{1}{\text{Tau}_j} \cdot g_j \quad (3-19)$$

Pour $j=1, 3$

g_j la conductance partielle de la $j^{\text{ème}}$ portion de l'arc.

P_j la puissance de refroidissement de la $j^{\text{ème}}$ portion de l'arc.

Tau_j la constante de temps de la $j^{\text{ème}}$ portion de l'arc.

u_j la tension partielle de la $j^{\text{ème}}$ portion de l'arc.

i le courant de l'arc

λ_j la commande Cassie-Mayr, de la $j^{\text{ème}}$ portion de l'arc.

Choix des sous-modèles

En se basant sur les résultats des mesures d'un grand nombre de tests :

- Le premier sous-modèle a été choisi de type Cassie-Mayr ($\lambda_1 = 1.4$)
- Le deuxième sous-modèle a été choisi presque du type Mayr ($\lambda_2 = 1.9$)
- Le troisième sous-modèle a été choisi du type Mayr pur ($\lambda_3 = 2$)

La conductance totale g de l'arc est :

$$\frac{1}{g} = \sum_{j=1}^3 \frac{1}{g_j} = \frac{1}{g_1} + \frac{1}{g_2} + \frac{1}{g_3} \quad (3-20)$$

La tension u de l'arc est :

$$u = \sum_{j=1}^3 u_j = u_1 + u_2 + u_3 \quad (3-21)$$

Le courant i est commun aux trois portions de l'arc :

$$i = g u = \frac{g_1 g_2 g_3}{g_2 g_3 + g_1 g_3 + g_1 g_2} \cdot u \quad (3-22)$$

Les paramètres du modèle

Pour un disjoncteur donné, il existe une relation fixe entre quelques paramètres :

$$Tau_2 = \frac{Tau_1}{k_1} \quad Tau_3 = \frac{Tau_2}{k_2} \quad P_3 = \frac{P_2}{k_3}$$

(k_1, k_2, k_3) sont des paramètres constants propres à chaque disjoncteur.

Les paramètres $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ sont constants dans tous les tests.

D'où les paramètres indépendants du modèle sont $(Tau_1, P_1$ et $P_2)$.

3.5.5 Le modèle de Schavemaker

C'est le modèle le plus récent, avec le paramètre Tau constant et la puissance de refroidissement en fonction de la puissance électrique d'entrée [33, 37, 38]:

$$P = P_0 + P_1 ui$$

P_0 la puissance de refroidissement liée à la conception du disjoncteur

P_1 la constante qui régularise l'influence de la puissance électrique d'entrée sur la puissance de refroidissement.

L'équation du modèle est alors:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\text{Tau}} \left(\frac{ui}{P_0 + P_1 ui} - 1 \right) \quad (3-23)$$

Les paramètres indépendants de ce modèle sont (Tau, P_0 et P_1).

Correction facultative du modèle dans le domaine des courants forts

Après avoir déterminé les paramètres du modèle décrit par l'équation (3-23), les courants et les tensions sont calculés en utilisant l'équation (3-23), puis ils sont comparés avec les tensions et les courants mesurés (Fig. 3.4).

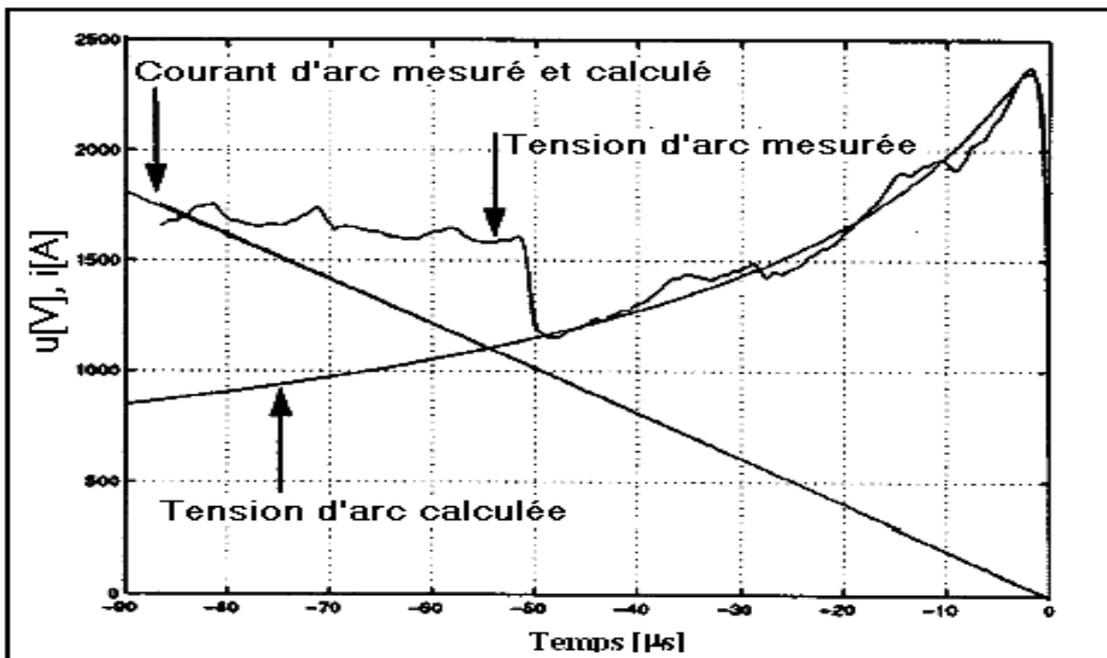


Fig. 3.4 : Les courbes des courants et des tensions de l'arc calculés et mesurés [37].

Le nouveau modèle d'arc reproduit bien les courants et les tensions mesurés, sauf dans le domaine des courants forts où les tensions d'arc calculées sont plus faibles que celles mesurées, cela a été amélioré de la manière suivante:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\text{Tau}} \left(\frac{ui}{\max(U_0 |i|, P_0 + P_1 ui)} - 1 \right) \quad (3-24)$$

U_0 la tension constante de l'arc dans le domaine des courants forts (Fig. 3-1).

➤ **Domaine des courants forts**

L'équation (3-21) sera réduite à:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\text{Tau}} \left(\frac{u}{U_0} - 1 \right) \quad (3-25)$$

Cette équation montre une claire conformité avec le modèle d'arc de Cassie qui a prouvé sa validité dans le domaine des courants forts.

➤ **Domaine des courants faibles**

• **Avant le zéro du courant**

Les équations (3-22) et (3-23) seront réduites à:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\text{Tau}} \left(\frac{ui}{P_0} - 1 \right) \quad (3-26)$$

C'est exactement le modèle de Mayr qui a prouvé sa validité dans la région du zéro du courant.

• **Après le zéro du courant**

Le modèle de Mayr est retrouvé car on considère après l'extinction de l'arc que la constante P_1 est nulle.

Conclusion

Tous les modèles d'arc à boîte noire ont pour origine de deux modèles de base de Cassie et de Mayr. Les modèles d'arc à boîte noire améliorés cités dans ce chapitre ont prouvé relativement leur efficacité dans les domaines des courants faibles et dans les domaines des courants forts, cependant les modèles les plus récents de Schavemaker et KEMA sont une véritable innovation, ils sont appréciés par tous les chercheurs dans le domaine de la modélisation des disjoncteurs SF6 haute tension, car ils expriment bien la dynamique de l'arc suite à l'introduction des paramètres indépendants propres à chaque domaine de courant d'arc.

Chapitre 04

*Simulation numérique avec le
modèle de Habedank*

4.1 Introduction

Les modèles d'Arc ont été initialement développés pour la meilleure compréhension du processus d'interruption de courant dans les disjoncteurs haute tension et d'être en mesure de concevoir l'interruption dans les chambres de coupure.

Il est bien connu que les deux modèles de Cassie et Mayr ont été développés et conçus en se basant sur les comportements physiques de l'arc, mais par la suite des modifications et des améliorations mathématiques ont été portées sur ces deux modèles pour donner les modèles d'arcs améliorés.

Dans le présent chapitre on a choisi le modèle de Habedank, pour modéliser l'arc électrique dans le disjoncteur SF6 haute tension.

La modélisation d'arc avec ce modèle nous aide à maîtriser les phénomènes d'interruption d'un courant alternatif, décrite dans la partie théorique.

Ce travail est constitué de trois étapes :

La première étape est la conception d'un interrupteur basée sur les équations du modèle de Habedank.

La deuxième étape est la simulation du comportement dynamique de l'arc en utilisant l'interrupteur qu'on a conçu .

La troisième étape est une interprétation des résultats obtenue

4.2 Conception du modèle

4.2.1 Description du modèle de Habedank

Le modèle d'arc de Habedank est une connexion en série d'un modèle d'arc Cassie et Mayr. Il est adapté pour des arcs avec des courants élevés et pour des courants proches de zéro. Il comporte deux équations différentielles, l'une de Cassie et l'autre de Mayr et une équation algébrique.

Équation de Cassie :

$$\frac{1}{g_1} \cdot \frac{dg_1}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left[\frac{u_1^2}{u_0^2} - 1 \right] \Leftrightarrow \frac{dg_1}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left[\frac{u_1^2 \cdot g_1}{u_0^2} - g_1 \right] \quad (4.1)$$

Équation de Mayr :

$$\frac{1}{g_2} \cdot \frac{dg_2}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \left[\frac{u_2 \cdot i}{p_0} - 1 \right] \Leftrightarrow \frac{dg_2}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \left[\frac{u_2 \cdot g_2 \cdot i}{p_0} - g_2 \right] \quad (4.2)$$

Sachant que:

$$u = u_1 + u_2$$

$$i = i_1 = i_2 \Rightarrow i = g_1 \cdot u_1 = g_2 \cdot u_2 = g \cdot u$$

g est la conductance totale

$$\frac{1}{g} = \frac{1}{g_1} + \frac{1}{g_2} \Rightarrow g = \frac{g_1 \cdot g_2}{g_1 + g_2} \quad (4.3)$$

4.2.2 Mise en équation du modèle dans le Simulink

$$(1) \Rightarrow \frac{dg_1}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left[\frac{u_1^2 \cdot g_1}{u_0^2} \cdot \frac{g_1}{g_1} - g_1 \right] \quad (4.4)$$

$$\frac{dg_1}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left[\frac{u_1^2 \cdot g_1^2}{u_0^2 \cdot g_1} - g_1 \right] \quad (4.5)$$

$$\text{Avec } u_1^2 \cdot g_1^2 = i^2 = g^2 \cdot u^2$$

$$\frac{dg_1}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left[\frac{g^2 \cdot u^2}{u_0^2 \cdot g_1} - g_1 \right] \quad \text{Cassie}$$

$$(2) \Rightarrow \frac{dg_2}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \left[\frac{i^2}{p_0} - g_2 \right] = \frac{1}{\tau_m} \left[\frac{u^2 \cdot g^2}{p_0} - g_2 \right] \quad \text{Mayr}$$

Où g_1 et g_2 sont la conductance de la partie du Cassie et Mayr de l'arc, respectivement. Au courant élevé, la plupart des enjeux de chute de tension placée dans la partie Cassie.

Ce modèle a deux entrées : $\begin{cases} -\text{la tension } U \rightarrow U(1) \\ -\text{l'état des contacts } U(2) \end{cases}$

Si $U(2)=0$ les contacts sont fermés

Sinon $U(2)=1$ les contacts sont ouverts

Ce modèle a une seule sortie : $y=i$

Les variables d'état sont : $\begin{cases} -g_1 \rightarrow U(3) \\ -g_2 \rightarrow U(4) \end{cases}$

Les valeurs initiales des variables d'état sont :

$$x_0 = g(0)$$

Comme $g_1 > g$

Et $g_2 > g$

$$g_1(0) = g_2(0) = 2x_0$$

Par exemple :

Pour $g_1 = g_2$

$$(3) \Rightarrow g = \frac{g_1^2}{2g_1} = \frac{g_1}{2} \quad (4.6)$$

$$g_1(0) = g_2(0) = 2g(0) = 2x_0$$

Utilisation de l'intégration : pour trouver g_1 et g_2 on fait les intégrales suivantes.

$$x_1 = f(U) = \frac{dg_1}{dt} \quad (4.7)$$

$$x_2 = f(U) = \frac{dg_2}{dt} \quad (4.8)$$

$$\int_{t=0}^t \frac{dg_1}{dt} = g_1(t) - g_1(0) \quad \text{Avec } g_1(0) = 2x_0$$

$$\int_{t=0}^t \frac{dg_2}{dt} = g_2(t) - g_2(0) \quad \text{Avec } g_2(0) = 2x_0$$

On construit le modèle de Habedank en insérant les équations de Mayr et Cassie ainsi que l'équation du courant dans le système d'équation du modèle de Habedank

La figure (Fig. 4.1) montre la mise en équation du modèle de Habedank dans le Simulink de Matlab

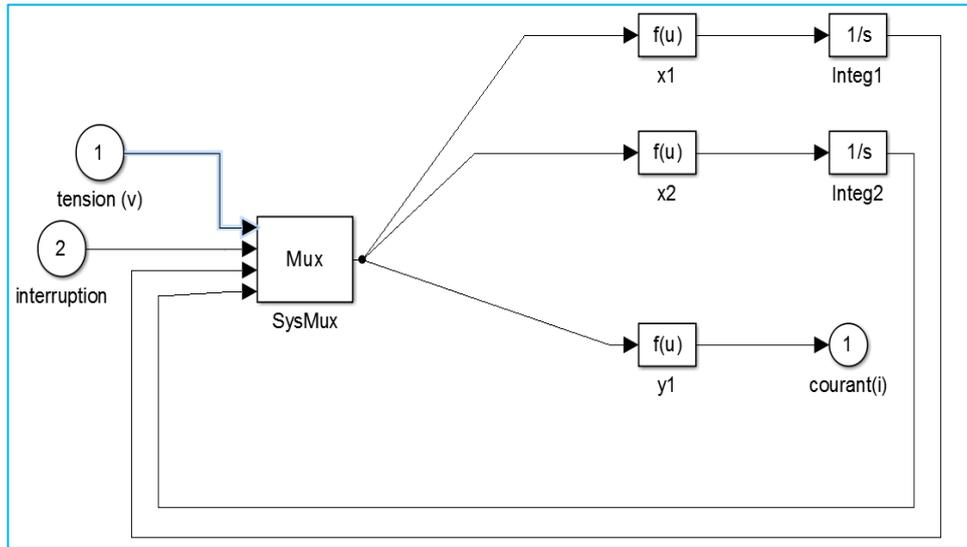


Fig. 4.1 : système d'équation modèle de Habedank

Puis on crée le sous-système de ce système d'équation que montre la figure (Fig. 4.2) avec deux entrées et une sortie.

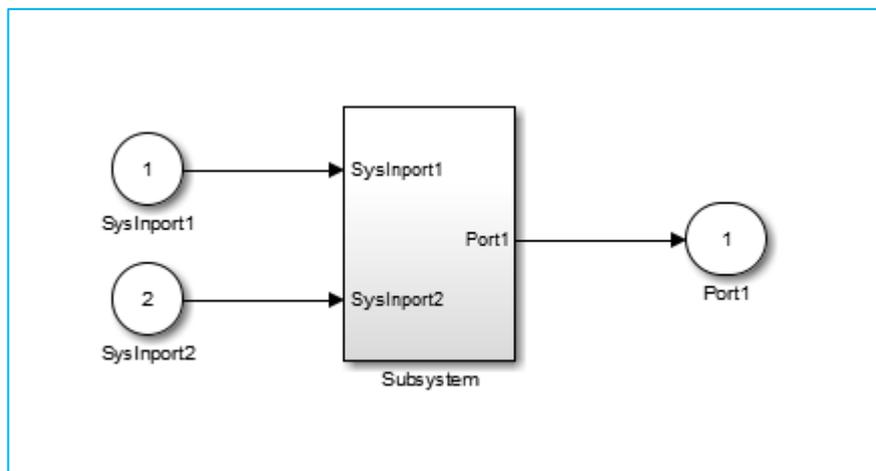


Fig. 4.2 : le bloc subsystem du modèle

4.2.3 Insertion du modèle dans le circuit d'essai

Pour insérer notre interrupteur dans le circuit d'essai il est nécessaire de lui ajouter les blocs de simulink comme le montre la figure (fig. 4.3) tel que :

- **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 :** Le bloc Simulink « Hit crossing » pour détecter le zéro du courant. En ajustant le pas, le bloc assure que la simulation trouve le point de passage à zéro. Ceci est important pour le coupe-circuit, lors du passage par zéro de la tension et du courant.
- **Step :** Le bloc Simulink est utilisé pour contrôler la séparation des contacts du disjoncteur. Une étape est réalisée à partir d'une valeur zéro à un dans le temps de séparation des contacts spécifiée.

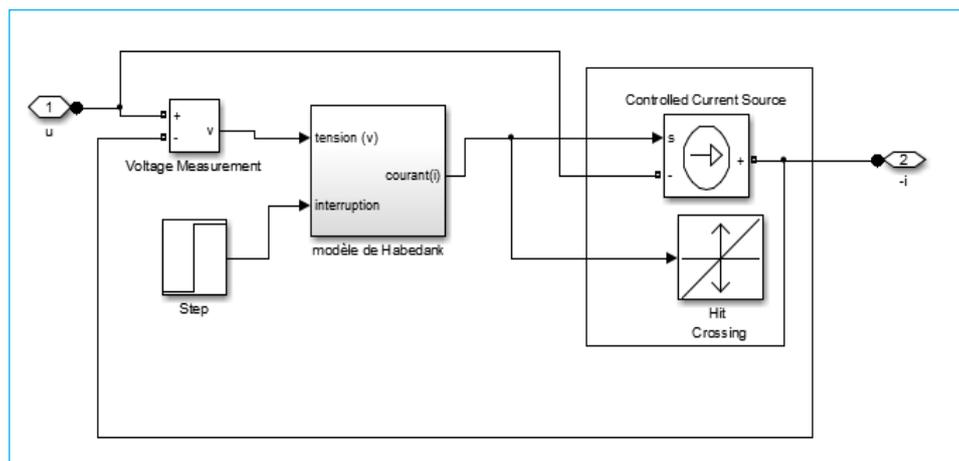


Fig. 4.3 : le bloc du modèle de Habedank

Après avoir terminé cette étape on crée un sous-système qui est le modèle de Habedank

Et qu'on a inséré dans le circuit d'essai (**fig. 4.4**)

Avec Edit Blok on introduit les paramètres du modèle et note il est prêt pour effectuer des simulations.

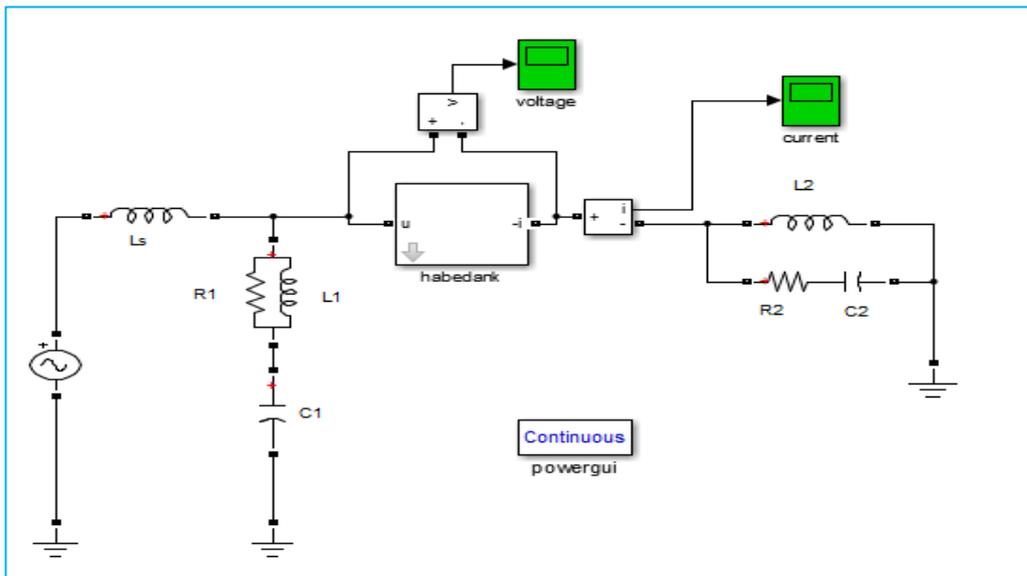


Fig. 4.4 : modèle de Habedank intégré dans le circuit test

La figure (Fig. 4.4) représente le circuit test du système électrique, des éléments passifs, les éléments générateurs de signaux, ampèremètres et voltmètres qui sont nécessaires au moment de la collecte des données et des graphiques, leur analyse, la tension alternative est le modèle d'entrée.

Les paramètres du circuit d'essai sont :

$E_{\text{sys}t} = 59196 \text{ v}$ (amplitudes maximales) phase 90° , et sa fréquence 60 Hz.

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

$R_1 = 29.8 \ \Omega$

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

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

$R_2 = 450 \ \Omega$

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

$C_1 = 1.93 \text{ nF}$

4.3 Simulation avec le modèle de Habedank

On ouvre la boîte de dialogue du modèle et on introduit les paramètres du modèle de Habedank que montre la figure (fig. 4.5) extrait des courbes mesurées de la tension et du courant de l'arc $Tau_c = 1.2 [\mu s]$, $Tau_m = 0.3 [\mu s]$, $P = 30900 [W]$, ainsi que l'instant de séparation de contact qu'on a choisi à $t = 0.02[s]$, la valeur initiale de la conductance d'arc $g(0) = 10^4 [S]$, ensuite on lance la simulation .

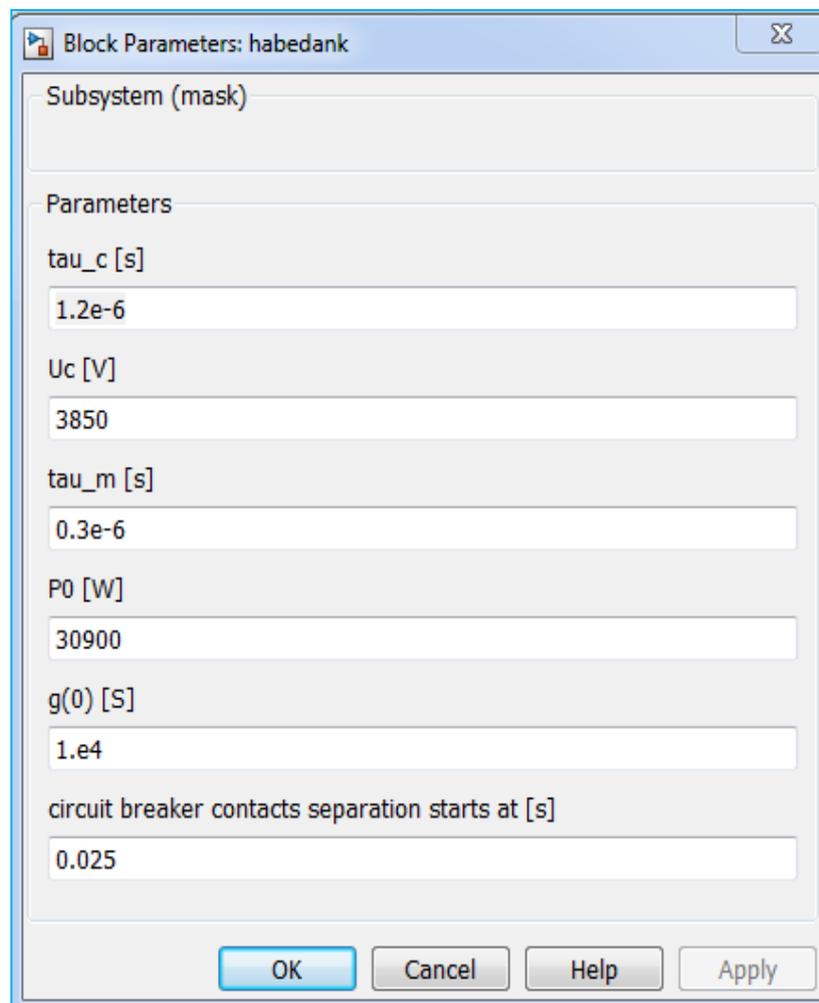


Fig. 4.5 : boîte de dialogue du modèle Habedank

4.4 Les résultats de la simulation

Les figures (4.6) et (4.7) représentent respectivement la tension et le courant simulés de l'arc.

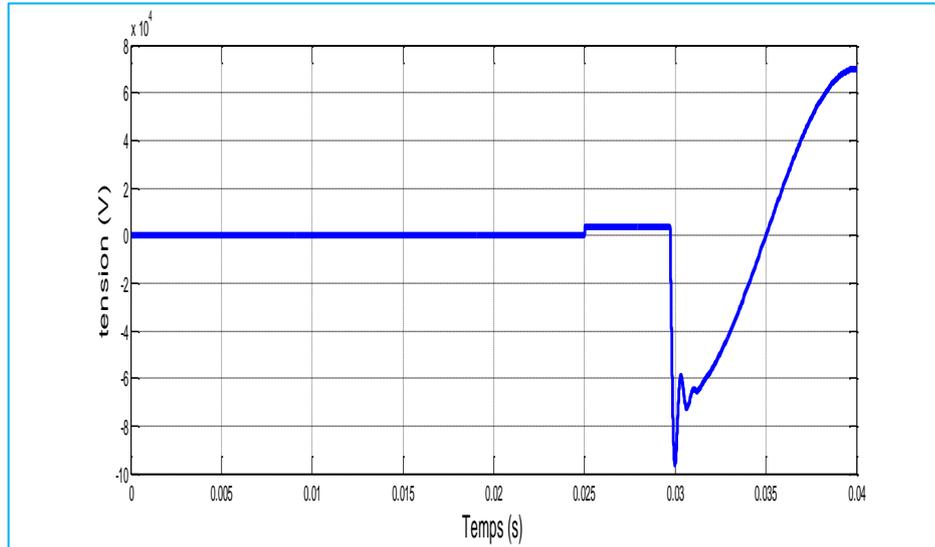


Fig. 4.6 : tension simulée par le modèle de Habedank

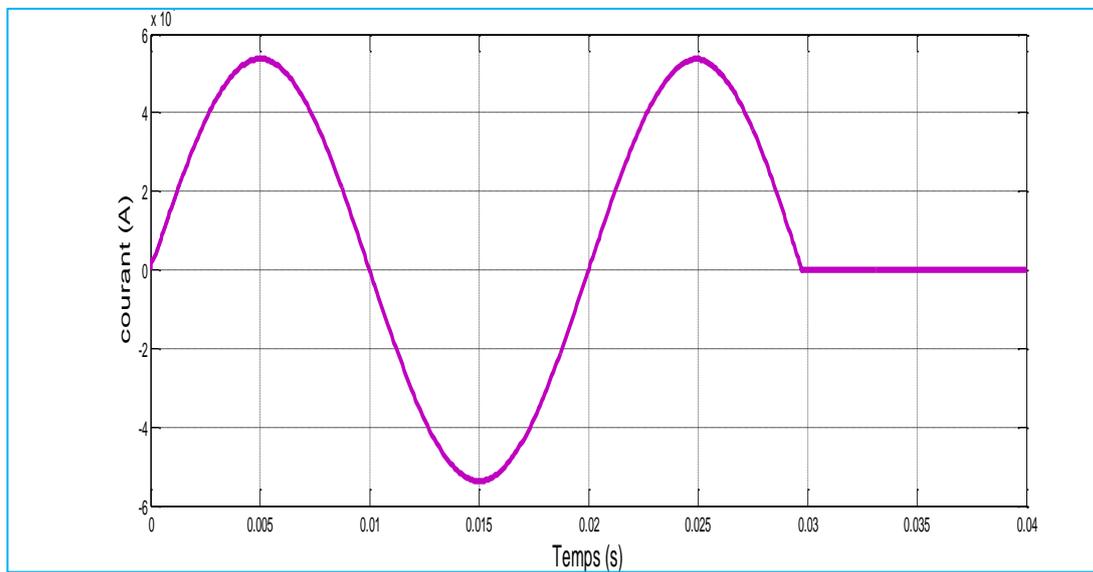


Fig. 4.7 : Courant simulée par le modèle de Habedank

En faisant un zoom au voisinage du zéro du courant, on observera :

- Un faible courant poste arc de : -0.47 A

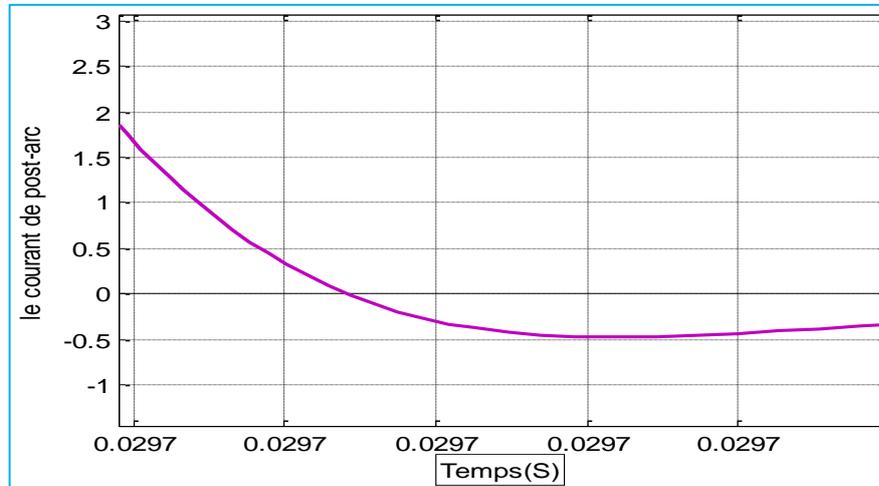


Fig. 4.8 : courant post arc

Et si on fait un zoom sur l'allure de la tension on remarquera

- Une TTR maximale de : -96.4 k v

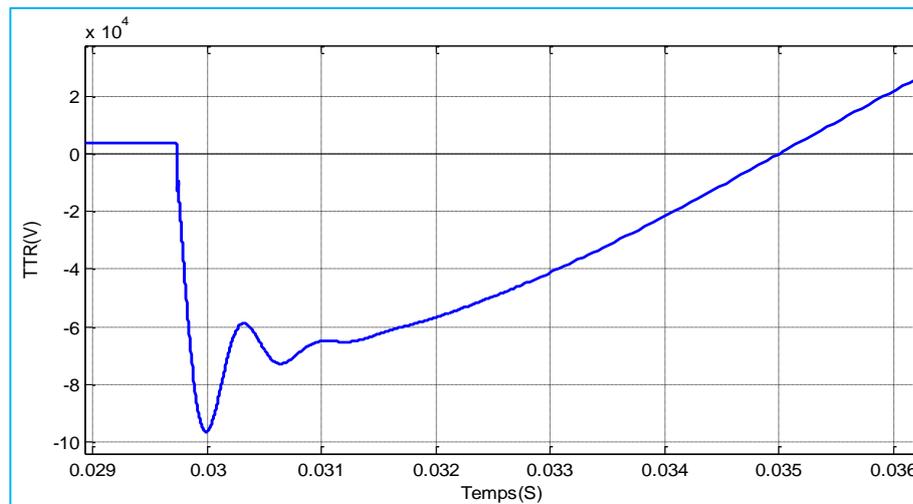


Fig.4.9 : tension transitoire de rétablissement (TTR)

Ce modèle donne une interruption réussie, comme ça été le cas durant l'essai réel, car le courant s'annule après son passage par zéro et la tension transitoire de rétablissement (TTR) s'amortie.

Bien que, d'après la littérature ce modèle ne reproduit pas parfaitement la tension et le courant mesuré et la tension c'est pour quoi d'autres modèles plus récents ont été élaborés comme le modèle de Kema et de Shavemaker.

Conclusion

À travers ce chapitre on peut conclure que, l'arc électrique est un phénomène important pour la coupure des courants alternatifs dans les disjoncteurs HT. Le modèle de Habedank est utilisé. Ce modèle traduit le comportement de l'arc électrique dans le disjoncteur HT comme ça été le cas au laboratoire mais en comparant (d'après la littérature) les courbes de tension et de courant mesuré et les courbes obtenues avec simulation avec ce modèle ne les reproduit pas parfaitement c'est pour quoi d'autre modèles ont été élaborés.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Le disjoncteur SF6 haute tension est installé dans un réseau électrique HT pour protéger ses différentes composantes qui le constitue lors d'un court-circuit, en séparant la partie affectée par se défaut. Ce disjoncteur est caractérisé par son pouvoir de coupure du courant (la séparation d'une partie) et de fermeture ou rétablir le courant (réalimentation d'une partie) en charge et sous tension, pour les plus sévères des cas, les courts circuits triphasés connus par leurs grandes valeurs d'intensité électrique.

Le phénomène d'interruption d'un courant par le disjoncteur SF6 HT engendre l'apparition d'un arc électrique sévère dans sa chambre de coupure, que le disjoncteur est chargé de maîtriser et d'éteindre pour réussir l'interruption et le fonctionnement.

L'arc électrique est un phénomène important qui détermine le fonctionnement du disjoncteur à haute tension. L'utilisation d'outils de modélisation et de simulation peut contribuer à améliorer ces dispositifs. Le type de modèle à appliquer peut varier selon l'objet de la simulation. La modélisation à boîte noire est suffisante pour étudier l'interaction arc-circuit.

La modélisation et la simulation de l'arc électrique par le modèle d'arc à boîte noire de Habedank, nous ont permis de donner une description assez précise sur le comportement dynamique du courant et de la tension de l'arc électrique, qui seront pris en considération afin de déterminer pour un emplacement donné dans le réseau électrique:

- Le dimensionnement de la chambre de coupure afin d'assurer la bonne isolation.
- Le choix des différentes techniques afin d'optimiser et de réussir la coupure.
- La valeur de la tenue diélectrique en tension, qu'il faut qu'elle soit supérieure au $\max(u_{arc})$.
- La nécessité d'inclure le comportement électrique des disjoncteurs comme des éléments de réseaux électriques afin de mieux appréhender leur rôle et leur comportement.
- L'amélioration de la capacité d'interruption des disjoncteurs.
- Le couplage entre les expériences et la modélisation, afin de diminuer le nombre de test pour l'amélioration et la validation du disjoncteur.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ENOH SERGE DIDIER EBY « **Simulation numérique du transfert radiatif dans les arcs de disjoncteurs à SF6** ». mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de maîtres sciences appliquées Mars 1997.
 - [2] Denis DUFOURNET « **Appareillage électrique d'interruption HT (partie 1)** » DOSSIER Techniques de l'Ingénieur d4690 Document délivré le 09/05/2012. P4-5-6-15.
 - [3] Sylvain NICHELE « **modélisation physique et simulations numériques des écoulements dans les disjoncteurs électriques haute tension** » thèse représentée pour obtenir le titre de docteur de l'université de Provence octobre 2011.
 - [4] Denis DUFOURNET « **Appareillage électrique d'interruption HT (partie 2)** » DOSSIER Techniques de l'Ingénieur d4692 Document délivré le 09/05/2012.p 5-6.
 - [5] D. KOCH. « **Propriétés et utilisations du SF6 dans les appareils MT et HT** ». Cahier technique n° 188, édition février 2003, p6-7-8
 - [6] S. Théoleyre,(**Les techniques de coupure en MT**), **Cahier technique no 188**, édition septembre 1998,
 - [7] Serge THEOLEYRE « **Les techniques de coupure en MT** », Cahier technique n° 193 édition septembre 1998. P6-7-8-9---16-24-25.
 - [9] « **Disjoncteur 3AP1 FI tension nominale 245kV N°35078683** », instruction de service pour SONELGAZ. Siemens AG2003.
 - [10] zensol@zensol.com Disjoncteurs Haute tension.htm.
 - [11] Denis DUFOURNET « **Appareillage électrique d'interruption HT (partie 3)**» DOSSIER Techniques de l'Ingénieur d4694 Document délivré le 09/05/2012, P2-8-9.
 - [12] 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.
 - [13] T. AMRANE « **Coordination orientée objet de la protection des réseaux électriques** » en vue de l'obtention du diplôme Doctorat de l'université de Batna promotion 2010.
 - [14] Yann Cressault « **Propriétés des appareils de coupure** » Laboratoire LAPLACE.
-

- [15] Mr BOUCHAHDANE Mohamed « **Etude des équipements de protection de la nouvelle ligne 400 kV en Algérie** ». Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de magister Juillet (2009), UMC.
 - [16] Daoui Hafsa « **Contribution à l'étude du comportement fluide de plasma lors de l'interaction des torches à plasma avec les métaux** » mémoire en vue de l'obtention du diplôme de magister, université de Ouargla novembre 2008.
 - [17] Zeghichi Leyla « **Etude D'une Décharge Electrique par la Méthode De Monte Carlo** » mémoire Présenté pour obtenir le diplôme de magister à l'université de Batna. Avril 2010.
 - [18] Dannet RANDRIANARIVAO « **modélisation des écoulements dans un disjoncteur haute tension** » Thèse doctorat de l'université de Toulouse septembre 2012.
 - [19] « J. PASTEAU « **Introduction à l'appareillage très haute tension** », Cahier technique n° 127 édition juin 1984 Schneider Electrique, p11.
 - [20] « R.P.P Smeets et V. Kertész “**Evaluation of high voltage circuit breaker performance with a validated arc model**”, IEE Proc. Gener. Transm. Distrib. Vol. 147, N°2, March 2000, pp: 121-125.
 - [21] « **Disjoncteur 3AP1 FI tension nominale 245kV N°35078683** », instruction de service pour SONELGAZ. Siemens AG2003.
 - [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
 - [23] « **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.
 - [24] S. Vaquié, “**L'arc électrique**“, CNRS Éditions, Paris, 2000, pp : 188-189.
 - [25] J.A. Martinez-Velasco, “**Modeling of circuit breakers using the type-94 component**“, EEUG News February 1997, pp 55-66.
 - [26] L. van der Sluis and W.R Rutgers, “**The comparison of Tests Circuits with Arc Models**“, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 15 Issue: 2 1994 pp 137-142.
-

- [27] L. van der Sluis, W.R Rutgers, C.G.A. Koreman “ **A physical arc model for the simulation of current zero behaviour of high-voltage circuit breakers**“, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 7 Issue: 2, April 1992 pp 1016-1022.
 - [28] J.A. Martinez-Velasco, “ **Circuit Breaker Representation for TRV Calculations**”, EEUG News Aug-Nov 1998, pp 77-87.
 - [29] H. Knobloch, U. Habedank, A.G Siemens, “ **Arc resistance at current zero: a tool to describe the breaking capacity of SF₆ circuit breakers at short-line faults**”, High Voltage Engineering Symposium, 22-27 August 1999 Conference Publication N° 467 ,IEE 1999, pp 205-208.
 - [30] U. Habedank and A.G Siemens, “ **Application of a New Arc Model for the Evaluation Short-circuit breaking Tests**”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, N° 4, October 1993, pp: 1921-1925.
 - [31] C. Guilloux, V. Therme, P.G. Scarpa, “ **Measurement of the post-arc current of HV circuit breakers: application to short circuit tests with ITRV**”, IEEE Trans. 1993, PWRD-8, (3), pp 1148-1153.
 - [32] B. Blez, C. Guilloux, “ **Post-arc current in high Voltage SF₆ circuit-breakers when breaking at up to 63 KA**”, IEEE Trans, 1989, PWRD-4, (2), pp 1056-1062.
 - [33] H. A Darwish and N. Elkalashy, “ **Comparison of Universal Circuit Breaker Arc Representation with EMTP Built-in Model**”, International Conference on Power Systems Transients, IPST 2003, New Orleans, USA, pp1-6.
 - [34] L. R Orama and B. R. Medina, “ **Numerical Arc Model Parameter Extraction for SF₆ Circuit Breaker Simulations**”, International Conference on Power Systems Transients, IPST 2003, New Orleans, USA, pp1-5.
 - [35] R.P.P Smeets, S. Nishiwaki, “ **Performance Evaluation of High Voltage Circuit Breakers By Means of Current Zero Analysis**”, IEEE trans., 2002, pp 424-429.
 - [36] R. P.P Smeets and V. Kertész, “ **Evaluation of high voltage circuit breaker performance with a validated arc model**”, IEE Proc. Gener. Transm. Distrib. Vol. 147, N°2, March 2000, pp: 121-125.
 - [37] P. H Schavemaker and L. van der Sluis, “ **An improved Mayr-Type arc model based on current-zero measurement**”, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 15 Issue: 2, April 2000 pages: 580-584.
-

- [38] P. H Schavemaker and L. van der Sluis, “**Quantification of the interrupting performance of high-voltage circuit breakers**”, IEE Proc. Sei. Meas. Technol., Vol. 149 N° 4, July 2002 pp 153-157.