

CHAPITRE III

LIMITATION DE COURANT DE DÉFAUT

III.1.Introduction

Les défauts sur les réseaux électriques provoquent des perturbations affectant leur fonctionnement et la qualité d'alimentation de la clientèle. Le limiteur à base d'un supraconducteur est une protection protège les réseaux contre les effets de ces défauts. Un défaut est une situation anormale, dans la majorité des cas c'est un court de circuit. Le but du limiteur de courant est de protéger les biens et de limiter les dégâts d'équipements en limitant le courant de défaut afin de maîtriser la situation anormale et de nous permettre d'isoler l'ouvrage en défaut du reste du réseau avec un grand degré de fiabilité et le plus vite possible. Quand un défaut a lieu, le limiteur supraconducteur doit détecter le courant de défaut et l'limiter le plus vite possible pour isoler uniquement si c'est possible l'élément en défaut ou un ensemble minimal d'élément.

Plusieurs types de limiteurs existent selon la spécificité de la ligne sur laquelle ils sont installés et les performances recherchées.

Nous présentons dans ce chapitre les limiteurs de courants de défaut et leur importance dans les réseaux électriques par les matériaux supraconducteurs.

III.2.Limitation de courant dans les réseaux électriques

III.2.1.Les réseaux et les courants de court-circuit

Les réseaux électriques sont conçus et construits de façon à réaliser le meilleur compromis entre coût et risque de défaillance. Ce risque n'est donc pas nul et les incidents ou défauts viennent perturber le fonctionnement du réseau et affecter la qualité d'alimentation de la clientèle. Les conséquences des défauts de court de circuit sont variables et dépendent fortement de l'intensité du courant de défaut. Il apparaît donc intéressant d'introduire sur le réseau des appareils capables de réduire le courant de court-circuit I_{CC} sans pour autant modifier le courant nominal: ce sont des limiteurs de courant.

III.2.1.1.Les différents réseaux et leurs niveaux de tension

Dans les pays dotés d'un système électrique développé, le réseau est structuré en quatre niveaux en fonction de la tension nominale efficace entre phases U_n .

H.T.B : tension nominale supérieure à 50 kV. Avant 1989, ce niveau était partagé en deux niveaux distincts auxquels il est encore fait référence. Il s'agit de la Très Haute Tension (THT) pour les réseaux transportant l'énergie des gros centres de production vers les régions consommatrices. Ces réseaux sont interconnectés. Viennent ensuite les réseaux de répartition à Haute Tension (HT) qui

assurent à l'échelle régionale la desserte des points de livraison à la distribution.

H.T.A : $1 \text{ kV} < U_n < 50 \text{ kV}$. Ce niveau couvre les réseaux d'alimentation de la clientèle, dénommé réseau moyenne tension (MT) avant 1989.

B.T.B : $500 \text{ V} < U_n < 1 \text{ kV}$. C'est le réseau basse tension (BT).

B.T.A : $50 \text{ V} < U_n < 500 \text{ V}$. C'est la basse tension terminale (BTT) avec 400 V entre phases. Bien que ces dénominations soient officielles, nous utiliserons souvent les anciennes appellations (HT, MT.) car elles restent très employées dans le milieu de l'électrotechnique. La représente schématiquement l'agencement des différents niveaux de tension pour le transport et la distribution de l'électricité. (Figure III.), [18].

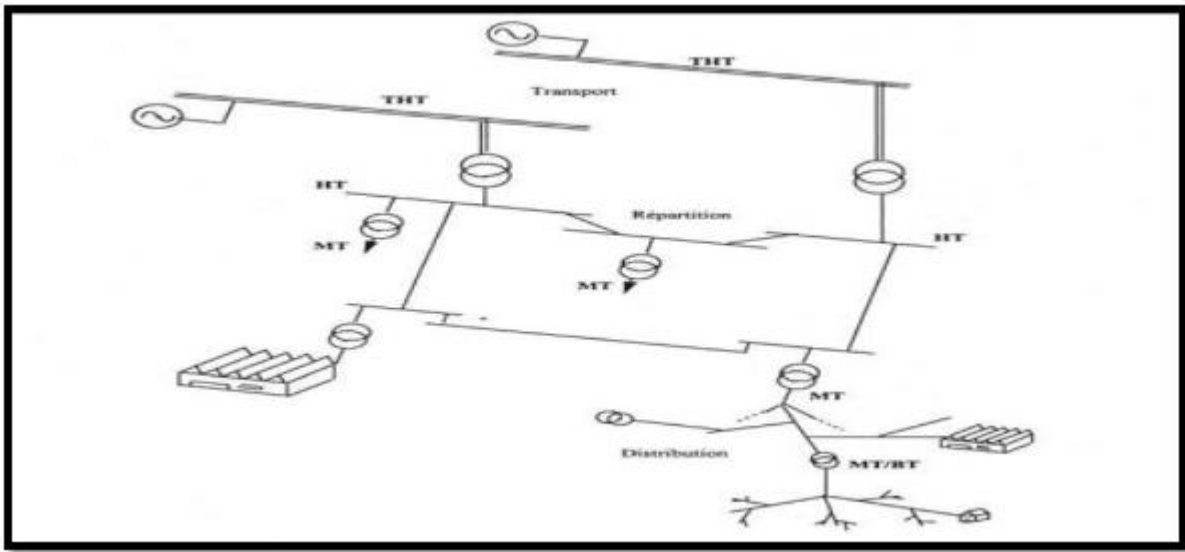


Figure III.1. Hiérarchisation par niveau d'un réseau de transport et de distribution d'électricité,[18].

La représentation schématique d'un réseau de distribution aérien MT (Figure III.1) permet de présenter les composants principaux des réseaux de distribution, [18].

III.2.1.2.Les défauts

La qualité de la fourniture d'électricité devient une nécessité de plus en plus forte de la part du monde industriel qui utilise un nombre croissant de matériels ou procédés sensibles. Ainsi les clients des réseaux de distribution attendent une qualité dans la fourniture de l'électricité: les creux de tension doivent être inférieurs à 10% et la continuité de service la meilleure possible. A court-circuit, la perturbation peut varier du simple creux de tension en passant par la microcoupure jusqu'à l'interruption complète de la fourniture électrique. De nombreux types de défauts existent selon le réseau de distribution (ligne aérienne ou câble souterrain), selon le lieu du défaut (sur la boucle de distribution, sur le tableau de distribution), selon les phases touchées (défaut monophasé entre une

phase et la terre, défaut biphasé ou triphasé entre deux ou trois phases, défaut évolutif passant par exemple de monophasé à triphasé), selon la durée du défaut (fugitif lorsqu'il est inférieur à 0,3 secondes, semi-permanent pour des défauts inférieurs à 15 secondes ou permanents). Beaucoup d'autres facteurs peuvent encore intervenir sur le type de défaut, comme le mode d'exploitation, le régime de neutre ou les performances des protections. Selon le type du défaut, les dégâts causés sur le matériel seront plus ou moins importants. Les plans de protections mis en place par les distributeurs doivent donc en tenir compte.

Pour déterminer les mesures de protections à prendre, les facteurs les plus importants sont: le temps du défaut, sa nature (monophasé ou triphasé) et le lieu du défaut. Ce dernier est approximativement trouvé grâce à la sélectivité des appareils de protection qui sont réglés de manière à ce que la plus petite portion possible du réseau en défaut soit mise hors tension. La sélectivité permet à l'exploitant du réseau de définir dans quelle branche a eu lieu le court-circuit afin d'ouvrir les protections le plus près de celui-ci pour gêner le moins de clients possibles. Les appareils de limitation du courant trouveront donc un créneau important sur le réseau MT et devront être adaptés pour éliminer des défauts fugitifs. Ces courants de court-circuit sont nuisibles pour le réseau, soit pour des raisons thermiques (fusion des conducteurs, dégradation des isolants), soit pour des raisons mécaniques à cause des déformations provoquées par les forces électromagnétiques, soit pour des raisons de coût car ils provoquent des vieillissements prématurés du matériel. Il est donc nécessaire d'éliminer le défaut (en général en ouvrant le circuit) pour permettre l'auto-extinction du défaut ou une réparation si celui-ci persiste. De plus, il est intéressant de limiter la valeur crête du courant de défaut (en particulier la première demi onde qui peut être très importante si le court-circuit est en pleine asymétrie) avant son élimination.

III.2.1.3.L'élimination des défauts

Lorsque deux fils se touchent, par exemple à cause du vent, (défaut fugitif car le contact entre les deux fils est inférieur à 0,3 s), il y a création d'un arc électrique entre eux. Il faut alors couper le courant pour éteindre l'arc et attendre quelques centaines de millisecondes afin de permettre à l'air de se désioniser sinon l'arc réapparaîtra lors de la remise sous tension du réseau. Ainsi, de manière générale, l'exploitant utilise des cycles d'Ouverture - Fermeture (cycles OF) des protections (disjoncteurs) afin de tenter de perturber le moins possible la distribution tout en favorisant l'auto-extinction du défaut Avant d'être obligé d'ouvrir définitivement la ligne si celui-ci persiste. Ces cycles dépendent principalement du défaut (monophasé ou triphasé) les cycles les plus répandus sont:

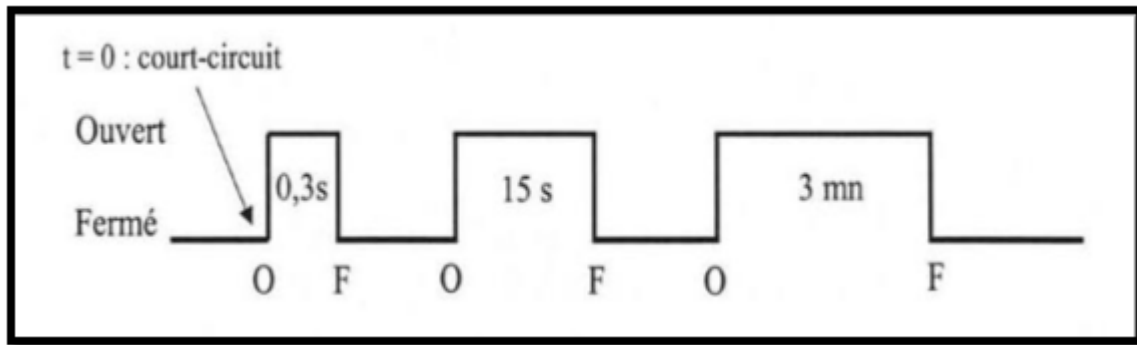


Figure III.2. Cycle OFOFOF pour une ligne aérienne, [18].

Lors de l'apparition d'un défaut, ouverture de la ligne pendant 0,3 s. Si le défaut persiste, nouvelle ouverture pendant 15 s. Enfin, ouverture pendant 3 mn (si nécessaire) avant une ouverture définitive du disjoncteur si le défaut ne s'est pas résorbé. Pour les câbles souterrains le schéma est différent car en général un défaut provient d'un endommagement accidentel de la ligne) :

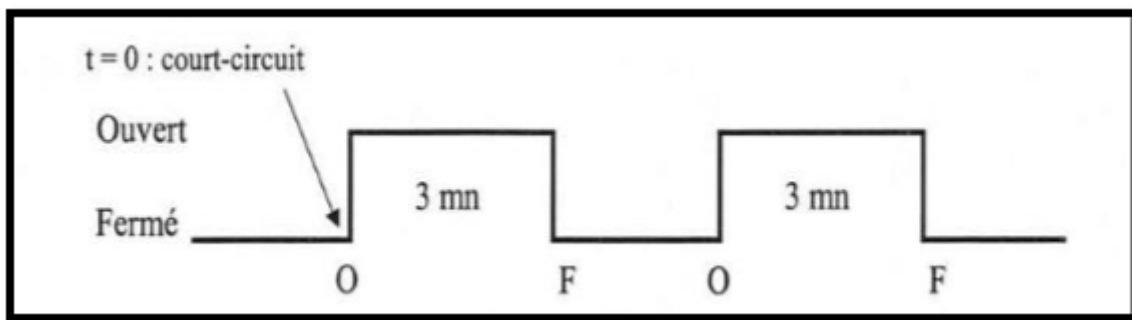


Figure III.3. Cycle OFOF pour une ligne souterraine, [18].

Ouverture des protections durant 3 minutes. Si le défaut persiste la ligne est définitivement ouverte. L'ouverture de la ligne est assurée par des disjoncteurs qui interrompent le courant près d'un passage à zéro. Sur les réseaux HTB ou HTA l'interruption n'est pas immédiate : un arc électrique apparaît dans la chambre de coupure entre les pôles du disjoncteur en raison de l'importance du courant de court-circuit. En THT il est même obligatoire de propulser dans la chambre de coupure un jet de gaz ayant une tension de claquage élevée afin de souffler l'arc électrique. En insérant un limiteur de courant en série avec les appareils de protection, leur taille et leur temps de coupure peuvent alors être réduits grâce à la diminution du courant de court-circuit. Après la limitation, le limiteur devra être de nouveau opérationnel avant la fermeture des organes de protection. Il est donc Souhaitable qu'un limiteur de courant puisse être réinséré dans le réseau après 0,3 secondes, il est important qu'il puisse être inséré après 15 secondes, et il est vital qu'il puisse être inséré 3 mn après la limitation du défaut. Le limiteur supraconducteur s'échauffe pendant son temps de limitation. Il faut donc qu'il ait refroidi avant que la ligne ne soit de nouveau fermée, [19].

III.2.1.4. Les courant de défaut

Le courant nominal I_n (ou courant assigné) est le courant maximal autorisé en régime permanent dans la ligne électrique alors que le courant de ligne I_{ligne} est le courant circulant réellement dans celle-ci. Enfin, le courant d'utilisation de la ligne est la valeur moyenne du courant de ligne. La puissance nominale S_n (ou puissance assignée) d'un réseau de niveau de tension entre phase un (et de niveau de tension phase-neutre V_n) est égale à (remarque: même si la dénomination actuelle est "assignée", nous utiliserons pour la suite le terme "nominal" pour I_n et S_n) :

$$S_n = \sqrt{3} \times U_n \times I_n \dots \dots \dots \text{(III.1)}$$

Pour un réseau moyen tension ou haute tension, le courant moyen (moyenne du courant de ligne) est de l'ordre de 40 à 50% du courant nominal. Le limiteur doit être dimensionné pour supporter le courant nominal, mais il peut être optimisé, par exemple, pour un courant deux fois plus faible. Il faut toutefois rester prudent pour ce type de dimensionnement qui ne peut être fait que si la consommation de la ligne sur laquelle le limiteur doit être inséré en fonction du temps est à peu près connue. En effet certains réseaux ont un courant de ligne deux fois plus faible que I_n sur une moyenne annuelle, mais pendant trois mois de suite, ils peuvent fonctionner à leur courant nominal. Lors d'un court-circuit, le courant en régime de défaut établi est appelé courant de court-circuit I_{cc} la puissance de court-circuit P_{cc} de la ligne pour un réseau de niveau de tension un est alors égale à :

$$P_{cc} = \sqrt{3} \times U_n \times I_{cc} \dots \dots \dots \text{(III.2)}$$

Pour un défaut triphasé :

$$I_{cc} = \frac{V_n}{Z} \text{ avec : } U_n = \sqrt{3} \times V_n \dots \dots \dots \text{(III.3)}$$

L'impédance Z est la somme de l'impédance interne du transformateur et de l'impédance du réseau ramenée en amont du défaut.

Pour un défaut biphasé:

$$I_{cc} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times V_n \times Z \dots \dots \dots \text{(III.4)}$$

Pour un défaut monophasé:

$$\overline{I_{cc}} = \frac{\overline{V_n}}{Z_n} + 3jC_w \overline{V_n} \dots \dots \dots \text{(III.5)}$$

avec: C la capacité homopolaire du réseau MT et Z_n l'impédance de neutre.

III.2.2. Intégration dans les réseaux électriques

L'insertion d'un limiteur permet, d'une part, d'assumer une augmentation des puissances transmissibles dans un réseau existant sans modifier ses composants ni sa structure, d'autre part de dimensionner différemment les réseaux futurs (**Figure III.4**). Les limiteurs de courant se justifient en fonction du niveau de tension envisagé : pour les moyennes tensions (quelques kV), les courants de défaut peuvent être très importants ; pour les plus hautes tensions (quelques centaines de kV) le coût élevé des disjoncteurs peut rendre attractif l'insertion d'un limiteur.

Le limiteur L1 protège le générateur et améliore sa stabilité les limiteurs L2 permettent de maintenir la liaison L3 en cas de défaut sur B Le limiteur L3 permet de déconnecter les deux sections A et B et d'éviter que A ou B ne débitent sur un même court-circuit (l'interconnexion n'aggrave pas les courants de défaut) les limiteurs L4 permettent de protéger sélectivement les départs C et D.

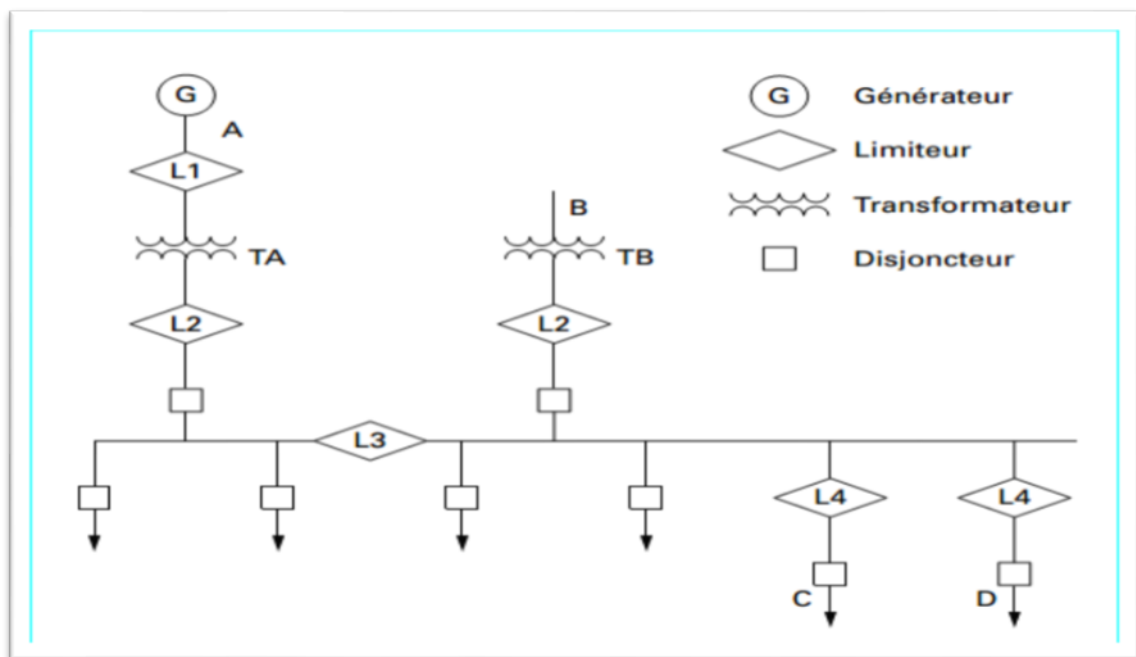


Figure III.4. Insertion de limiteurs dans un réseau, [19].

III.3.Fonctionnement de limiteur de court-circuit

III.3.1.Définition

Un dispositif est limiteur lorsque le courant qu'il laisse passer, sur court-circuit, est nettement inférieur en amplitude au courant présumé (**Figure III.5**). Dans le cas d'un disjoncteur limiteur, il y a simultanément, à cette réduction d'amplitude une réduction de la durée T de passage de courant par rapport au temps de passage du courant de court-circuit d'un disjoncteur non limiteur.

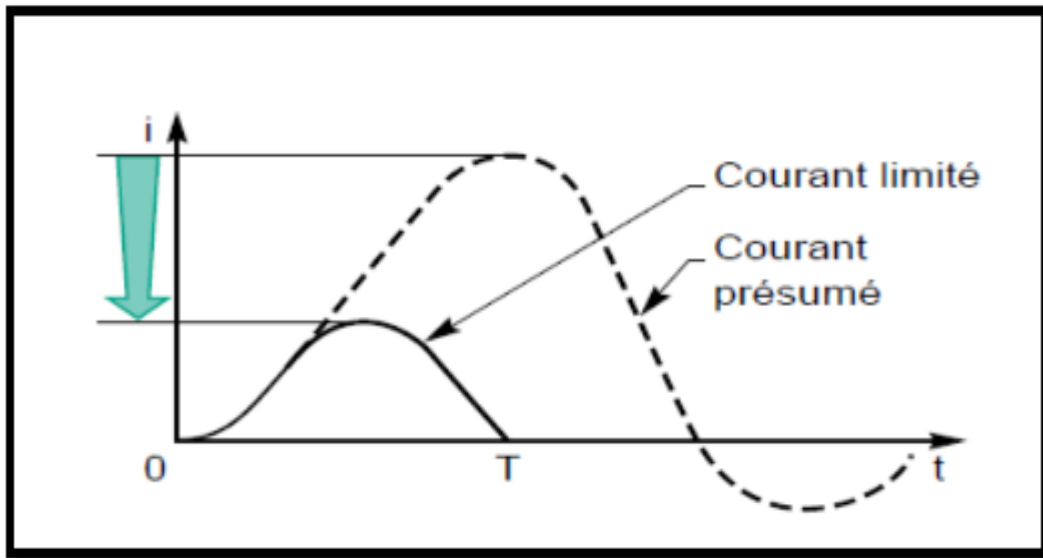


Figure III.5. Représentation des courants de court-circuit, présumé et limité, [19].

III.3.2. Pourquoi limiter le courant ?

Pour réaliser des disjoncteurs plus économiques, surtout dans les faibles intensités nominales. L'appareil limiteur n'est traversé que par le courant limité beaucoup plus réduit que le courant présumé, et il n'a à couper que ce courant limité. Pour minimiser les effets du courant de défaut dans une installation électrique. Quels sont ces effets ?

III.3.2.1. Effet électromagnétique

A une distance d d'un conducteur parcouru par un courant d'intensité I , il y a dans l'air une induction magnétique B de valeur, [19].:

$$B = 2 \times 10^{-7} \times \frac{I}{d} \dots\dots\dots (III.6)$$

Conséquence possible : perturbation des dispositifs électroniques situés à proximité de conducteurs électriques parcourus par un courant de court-circuit.

III.3.2.2. Effets mécaniques

Si à la distance d d'un conducteur parcouru par un courant I se trouve un autre conducteur parallèle au premier de même longueur L , et parcouru par un courant I' , ce conducteur est soumis à un effort F (d'attraction si I et I' sont de même sens, de répulsion dans le cas contraire) qui vaut par unité de longueur, [19]. :

$$\frac{F}{L} = B \times I' \dots\dots\dots (III.7)$$

Conséquence possible : déformation ou rupture de pièces. Dans tout appareillage, les contacts séparables, maintenus en contact par des ressorts, tendent à s'ouvrir sous l'effet d'une force électrodynamique dite de répulsion. Efforts qu'il faut parfois équilibrer par des systèmes de «compensation ».

III.3.2.3.Effet thermique

Lors d'un court-circuit, il y a un échauffement adiabatique $\Delta\theta$ des conducteurs de section S s'élevant :

$$\Delta\theta = \frac{k}{S^2} \int T^2 dt \dots\dots\dots(III.8)$$

III.3.3.Comment limiter ?

Soit un circuit alternatif monophasé de puissance apparente S et de tension E, débitant dans une charge Z à travers un dispositif de protection a présentant une impédance négligeable avant son entrée en action avec pour l'ensemble : source + ligne + défaut.

R = résistance équivalente

L = inductance équivalente (**Figure III.6**).

Quand apparaît un court-circuit aux bornes de la charge Z, avant intervention de A (donc U_a négligeable) le réseau est alimenté par une force électromotrice (f .e. m.) telle que :

$$e = Ri + L \frac{di}{dt} \dots\dots\dots(III.9)$$

Donc le courant s'établit avec une dérivée initiale égale à :

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_0 = \frac{e}{L} \dots\dots\dots(III.10)$$

Cette dérivée est maximale lorsque le court-circuit se produit à l'instant du maximum de tension du réseau, ce qui correspond, pour des facteurs de puissance inférieurs à 0,25, à un courant présumé pratiquement symétrique, [20].

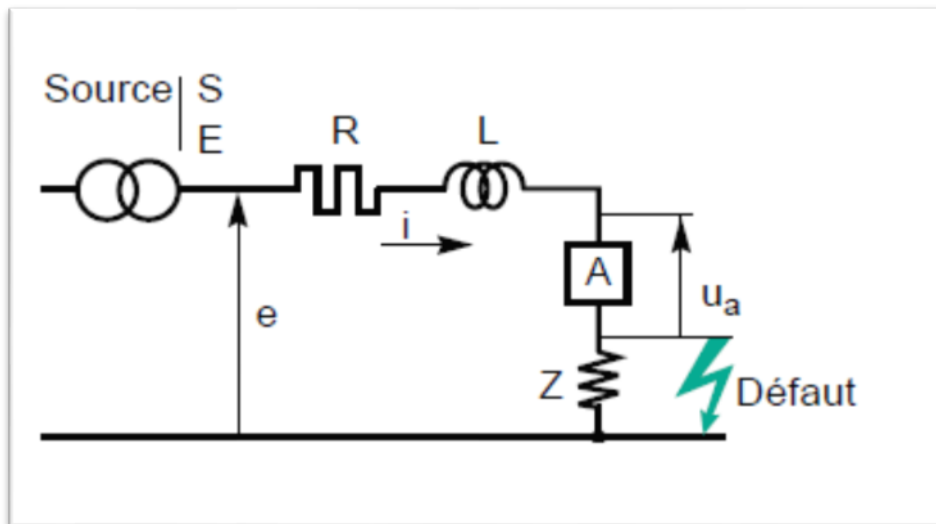


Figure III.6. Schéma de principe d'un circuit en défaut, [20].

III.4. Intérêt du limiteur de courant de défaut

Les courants de défaut restent un problème mal résolu dans les réseaux électriques alternatifs hautes tension. Les courants de défaut ne sont pas limités, mais seulement coupés lors d'un passage par zéro par un disjoncteur. Ce problème est encore plus délicat en courant continu car le courant, ne passant plus par zéro, est extrêmement difficile à couper. Comme les courants de défaut ne sont pas limités en amplitude, mais seulement en durée, tous les appareils doivent être surdimensionnés en conséquence pour résister notamment aux efforts électrodynamiques proportionnels au carré du courant. Les courants de défaut peuvent être considérables : 20 fois le courant normal assigné et ils induisent donc des forces 400 fois plus élevées qu'en régime normal. Le réseau est conçu pour que les courants de défaut ne soient pas trop importants et ne dépassent pas les capacités de coupure des disjoncteurs. Un réseau se représente très schématiquement par une source de tension E en série avec l'impédance de ligne Z_{cc} et la charge. En court-circuit, le courant de défaut est seulement limité par l'impédance de la ligne :

$$I_{cc} = I_{\text{Défaut}} = \frac{E}{Z_{cc}} \dots\dots\dots (III.11)$$

Par contre, si l'impédance de ligne réduit favorablement le courant de défaut, elle introduit une chute de tension ($Z_{cc} \cdot I$) préjudiciable en régime permanent, puisqu'elle entraîne une variation de l'amplitude de la tension. La qualité de tension (amplitude constante) augmente avec la puissance de court-circuit ($S_{cc} = 3 E^2 / Z_{cc}$). Celle-ci est limitée par la tension réseau E et la capacité de coupure des disjoncteurs I_{cc} . Un compromis doit être trouvé entre la qualité de tension et les courants de défaut.

La multiplication des chemins d'alimentation d'un consommateur sécurise son alimentation, mais avec comme conséquence l'augmentation du courant de défaut. Il est en effet la somme des courants de défauts des différentes sources (loi de nœuds). Tant pour la qualité de tension du réseau que pour sa sécurisation, deux demandes actuelles fortes, un limiteur de courant de défaut est par conséquent l'appareil rêvé pour un réseau. Il permet une puissance de court-circuit « infinie », mais un courant de défaut limité. Celui-ci réduit en plus les contraintes sur tous les dispositifs classiques de la ligne, donc leur surdimensionnement lié au courant de défaut. Malheureusement, cet appareil idéal n'existe pas encore dans les réseaux haute tension, mais la supraconductivité pourrait apporter une solution, [20].

III.5.Limiteur de courant : solution classique

Peu de solutions classiques permettent de limiter naturellement les courants de court-circuit. Le fusible et le fusible pyrotechnique sont des solutions classiques utilisées jusqu'à des tensions de quelques dizaines de kV mais ils présentent l'inconvénient majeur de ne pas être réutilisables et de nécessiter une intervention humaine pour la remise sous tension du système. Les autres solutions de l'augmentation de leur impédance apparente lors d'une montée de courant.

III.5.1. Arc électrique

Cette solution est inhérente aux disjoncteurs lorsqu'ils s'ouvrent sur courant de défaut pour isoler une ligne. La résistance électrique d'un arc est fortement non linéaire avec le courant: les faibles courants mènent à une forte résistance qui diminuera d'autant plus le courant. Il est possible d'augmenter la puissance perdue par l'arc en favorisant les processus de convection et de rayonnement qui augmentent encore la résistance de l'arc. (En imposant un certain cheminement).

III.5.2.Condensateur

En commutant le courant à limiter dans un condensateur, on obtient une tension V limite bien le courant. Malheureusement la valeur de capacité nécessaire est importante et le courant limité reste significatif. Cette piste reste pourtant exploitable en basse tension. Un autre problème est que la commutation doit se faire en quelques microsecondes. Pour cela il est possible d'utiliser des disjoncteurs statiques, mais dans tous les cas la synchronisation des dispositifs semi-conducteurs de commutation est délicate. Ces systèmes de commutation rapide restent difficiles à appliquer à la haute tension et présentent des chutes de tension non négligeables à l'état passant (quand le courant est inférieur ou égal au courant nominal).

III.5.3. Inductances

Une inductance insérée en série dans le réseau limite le courant de court-circuit mais dégrade la stabilité transitoire si l'inductance est à proximité des générateurs, et introduit des surtensions transitoires durant les séquences de refermeture des appareils de coupure. De plus la chute de tension, les pertes en régime nominal et l'encombrement sont loin d'être négligeables sauf pour de très faibles courants nominaux. De fait, cette solution introduit une composante inductive qui peut être gênante pour certains types de réseau, [20].

III.5.4. Réactance série

L'insertion permanente de réactances en série dans les réseaux permet de limiter les courants de défauts mais introduisent des surtensions transitoires durant les séquences de refermeture des disjoncteurs. De plus, les chutes de tensions en régime nominal et l'encombrement n'étant pas négligeable, cette solution n'est pas applicable pour tous les réseaux.

III.5.5. Limiteur commandé

Pour limiter ces inconvénients, il est préférable d'introduire ces composants au moment du défaut. Un des dispositifs de référence est le transformateur série court-circuité par des thyristors (**Figure III.7**). Lorsque les thyristors sont passants le transformateur est en court-circuit, l'impédance série est négligeable devant la charge. Cependant lorsque les thyristors sont bloqués, le transformateur est en circuit ouvert et son impédance augmente fortement, [17].

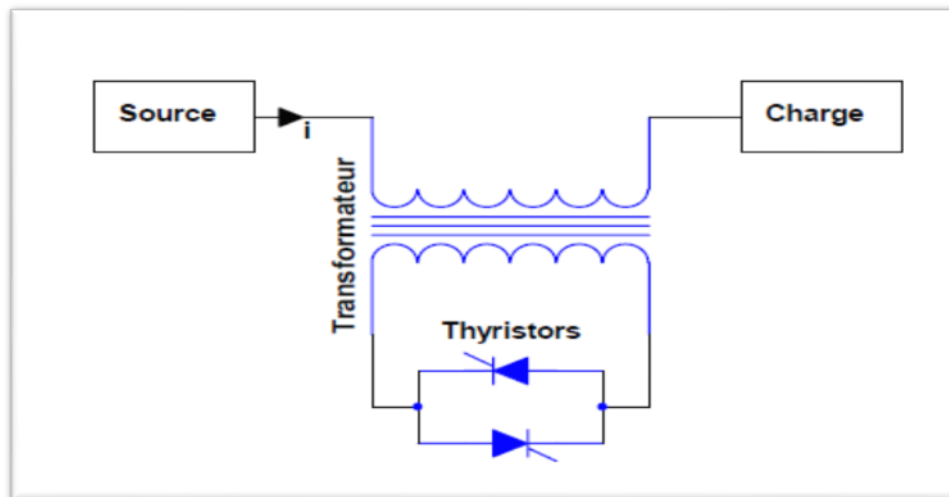


Figure III.7. Limitation de courant par transformateur court-circuité, [17].

III.5.6.Résistance variable

Enfin, une solution élégante et efficace est l'utilisation d'une résistance variable insérée dans le circuit. Cette variation provient en général soit d'un changement de phase, soit d'un changement d'état du matériau de la résistance. Dans le cas d'un changement d'état, s'il n'est pas homogène, la concentration de puissance dans une région limitée en courage la destruction du matériau, [17].

III.6.Caractéristiques spéciales du disjoncteur limiteur

Afin de réduire les contraintes thermiques et mécaniques (dus à des forces électrodynamiques) exercées sur l'objet à protéger, il faut couper le courant dès le début du court-circuit, avant que la valeur totale possible soit atteinte (comme par exemple pour éviter la soudure des bornes du contacteur).

- On y parvient grâce à ce qui suit
- l'ouverture rapide des contacts principaux.
- Le développement rapide d'une haute tension d'arc (détourner rapidement l'arc des pointes des contacts et le guider vers la chambre d'extinction).

- Les effets de la réduction des valeurs de l'énergie passante sont

1. La réduction des forces électrodynamiques sur les barres collectrices (comme par exemple un espacement croissant entre les supports).
2. La réduction des contraintes thermiques. Il est possible d'empêcher la soudure des bornes des contacteurs. Le surdimensionnement des contacteurs peut être évité ou du moins limité raisonnablement.

Le résultat figure dans les tableaux de coordination des courts-circuits démarreur de petite dimension composé d'éléments choisis surtout en fonction de leurs courants assignés. Les disjoncteurs limiteurs de courants sont utilisés dans une large gamme d'applications.

Il n'est plus nécessaire d'effectuer des calculs compliqués du courant de court-circuit à chacun des endroits du réseau où est installé un disjoncteur. La coordination du court-circuit nécessite aussi peu de travail de planification qu'avec les fusibles.

le disjoncteur devrait être construit de manière à pouvoir couper un courant de court-circuit dans toutes les situations possibles sans aucun problème, [17].

- **Les caractéristiques qui font que la planification avec les disjoncteurs est aussi facile qu'avec les fusibles sont :**

1. Le pouvoir de coupure élevé rend superflu le calcul du courant de court-circuit :
Dans des applications réelles, le niveau de défaut (courant de court-circuit présumé), à l'endroit

où les disjoncteurs des circuits de branchement des moteurs sont installés, est surtout de l'ordre de 1...20 kA. Si le pouvoir de coupure du disjoncteur est supérieur, il n'est pas nécessaire de faire d'autre calcul. Il est possible d'utiliser les disjoncteurs à n'importe quel endroit de l'installation sans avoir à calculer leurs encombrements, comme c'est le cas avec les fusibles à pouvoir de coupure élevé.

2. Les valeurs de l'énergie passante sont basses: les contacteurs raccordés en aval sont moins sollicités à mesure que les disjoncteurs limitent le courant de court-circuit de façon sensible. La coordination des court-circuit est simplifiée et il n'est pas nécessaire de consulter les tableaux de coordination de courts-circuits, [17].

III.7.Limiteurs supraconducteurs de courant

III.7.1.Principes et réalisations des limiteurs supraconducteurs

La caractéristique intrinsèque fortement non linéaire du champ électrique en fonction du courant dans un supraconducteur est à la base du limiteur supraconducteur des courants de défaut. En régime normal, les pertes dans l'élément supraconducteur sont très faibles (pertes AC), voire pratiquement nulles en DC. Par contre, dès que le courant dépasse un seuil prédéfini, l'élément supraconducteur développe instantanément un fort champ électrique qui équilibre la tension du réseau et limite le courant à une valeur prédéterminée, facile à couper par un disjoncteur. Le disjoncteur reste indispensable pour isoler le défaut entre autres (**Figure III.8**).

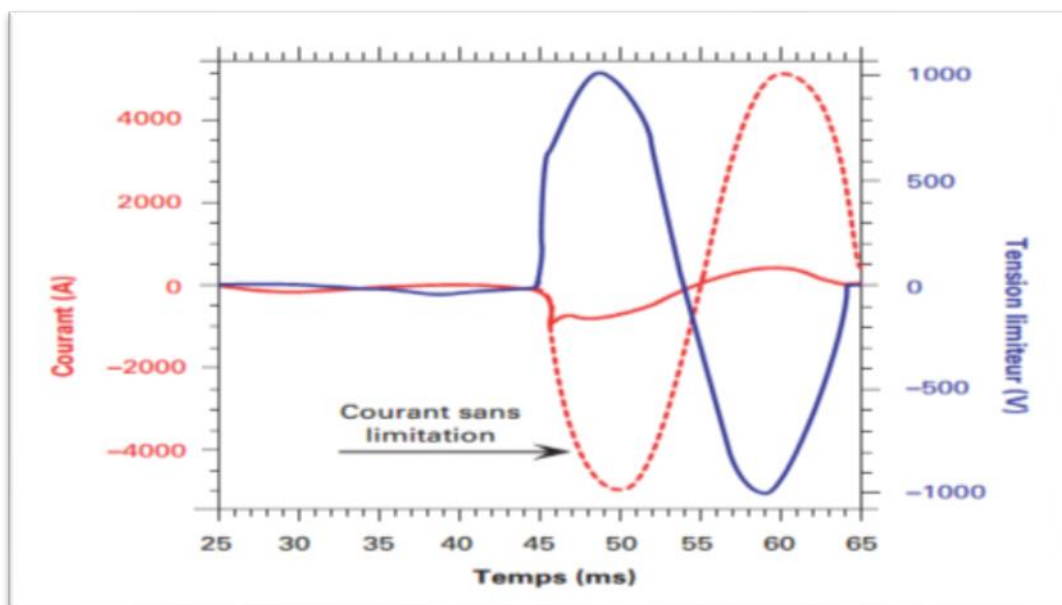


Figure III.8. Évolutions temporelles des courants (avec et sans limitation) et de la tension lors d'un court-circuit, [11].

Après avoir été isolé par le disjoncteur, l'élément supraconducteur se refroidit progressivement et retrouve l'état supraconducteur après un certain temps. C'est la récupération. Si la limitation est extrêmement rapide (μs), la récupération est nettement plus lente (seconde à minutes) et peut poser des problèmes de continuité de service dans certaines configurations. Il existe deux grands types de limiteurs supraconducteurs en excluant ceux qui utilisent de l'électronique de puissance comme un pont redresseur :

- **Le limiteur résistif** : reste le plus simple le courant est limité par la résistance développée par le supraconducteur, [11].
- **Le limiteur inductif** : le supraconducteur déclenche seulement la limitation, mais n'assure pas mieux la limitation ; celle-ci est réalisée par une inductance. Si le limiteur inductif présente quelques atouts, il reste très désavantagé par le circuit magnétique lourd et encombrant et les études actuelles portent essentiellement sur le limiteur résistif. Ce principe simple et inaccessible par des techniques conventionnelles de limitation du courant est très attractif pour permettre l'amélioration de la qualité de service des réseaux actuels, [11].

III.7.2. Les types des limiteurs supraconducteurs

III.7.2.1. Limiteur résistif

Dès les années 70, les conducteurs ne supportant pas à cette époque les courants alternatifs l'utilisation des supraconducteurs dans un limiteur de courant a été envisagée à partir de films minces de NbN en commutant le courant de défaut dans une résistance parallèle de limitation.

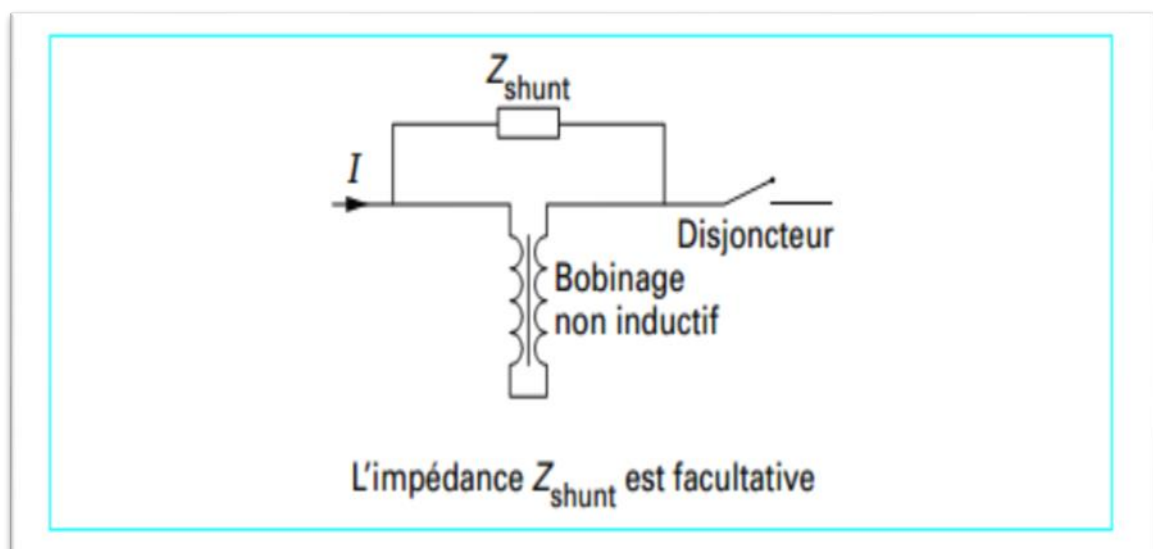


Figure III.9. Limiteur résistif BTc, [11].

Le plus simple des concepts (**Figure III.9**) est de monter en série sur la ligne à protéger un bobinage non inductif supraconducteur pour limiter les chutes de tension à l'état passant. Après

transition, la forte résistance insérée naturellement dans la ligne limite le courant. Un disjoncteur en série, rapide, mais de faible pouvoir de coupure, permet d'isoler le défaut et protège le limiteur contre une excursion en température excessive.

Un limiteur résistif de résistance R présente une dissipation en régime de défaut égale à R^{-1} puisque le limiteur est soumis en régime de défaut à la tension du réseau.

La structure non inductive a par ailleurs les avantages :

- les champs de fuite et les pertes par courant de Foucault au niveau des structures (supports et cryostat) qui peuvent être métalliques sont réduits.
- les pertes du supraconducteur qui n'est soumis qu'à son champ propre sont réduites. L'énergie magnétique stockée dans l'enroulement supraconducteur au moment de la transition est négligeable.
- le courant de court-circuit étant essentiellement ohmique, l'utilisation du disjoncteur auxiliaire de coupure est plus simple (**Figure III.10**) et celui à HTc de Siemens (1 kV, 100 A).



Figure III.10. Limiteur résistif : prototype Alcatel Alsthom Recherche, [11].

III.7.2.2. Limiteur inductif

À l'état passant, le limiteur a une faible inductance équivalente alors qu'à l'état bloquant, une forte impédance apparaît. Le concept le plus simple consiste à coupler antiparallèlement deux solénoïdes réalisés avec des conducteurs de courants critiques différents (**Figure III.11**). En cas de défaut, un seul des deux bobinages (Bobinage déclencheur) transite à l'état normal, l'essentiel du courant est transféré

à la bobine qui n'a pas transité et l'impédance est pratiquement l'inductance de celle-ci. Le dimensionnement du déclencheur, en particulier la longueur de supraconducteur nécessaire, est le même que celui d'un bobinage limiteur résistif de même résistance R et la dissipation en régime de défaut reste proche de R^{-1} puisque le déclencheur est soumis en régime de défaut à la tension du réseau.

La dissipation en régime de défaut n'est théoriquement moindre que si $R \gg 1$, cela nécessiterait de grandes longueurs de conducteur qui entraîneraient des pertes froides en régime normal importantes.

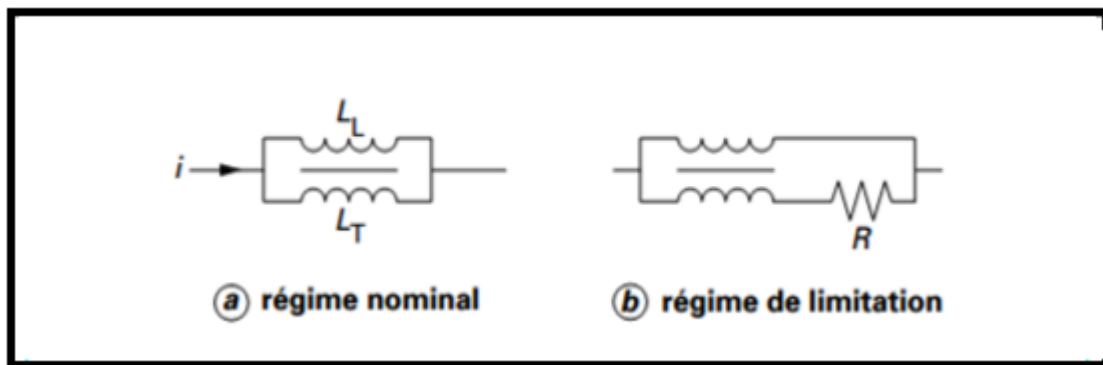


Figure III.11. Limiteur inductif à fort couplage, [11].

Le bon fonctionnement de ce dispositif est lié au couplage entre les deux bobinages qui doit être excellent, ce qui est incompatible avec un bon découplage thermique des deux bobinages. Pour réduire cet inconvénient, on peut mettre en parallèle une inductance de limitation avec un bobinage supraconducteur déclencheur non inductif (**Figure III.12**).

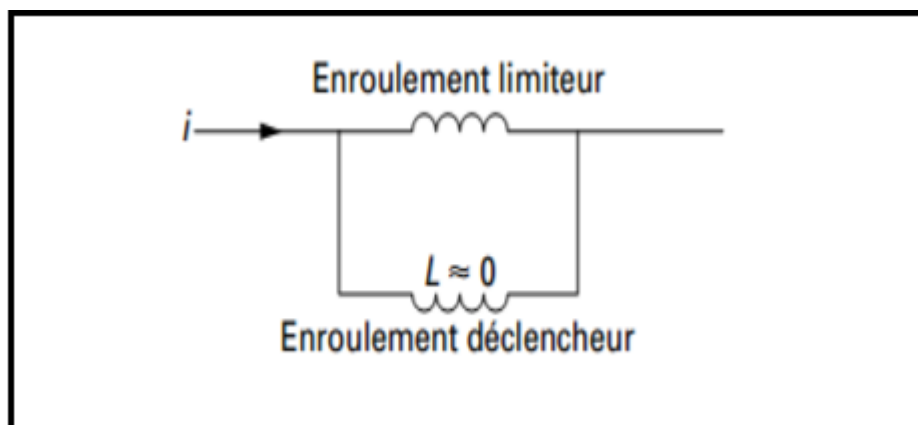


Figure III.12. Limiteur inductif à bobinage découplé, [11].

■ Application

Sur une conception analogue, deux prototypes de Toshiba 6,6 kV/1,5 kA, l'un avec un

enroulement de limitation en cuivre et l'autre avec un enroulement de limitation supraconducteur ont été réalisés. L'utilisation de deux enroulements déclencheurs permet d'avoir des temps de récupération très rapides (quelques ms) (**Figure III.13**), [11].

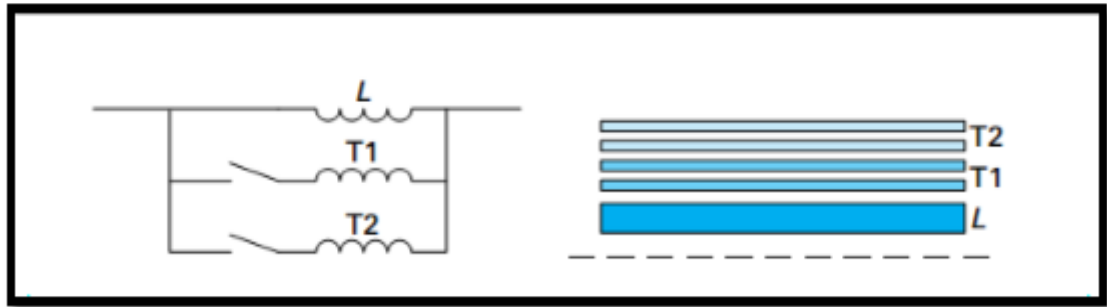


Figure III.13. Limiteur inductif à plusieurs déclencheurs, [11].

Les bobinages sont des solénoïdes coaxiaux, les bobinages déclencheurs T1 et T2 sont non inductifs et assurent le passage du courant nominal ; en cas de court-circuit, le courant est transféré dans la bobine de limitation, supraconductrice ou résistive. Parmi les réalisations significatives actuelles, il faut citer le prototype commandé utilisant un conducteur HTc BSCCO gainé Ag de Loockheed Martin Co-South Cal Utility (2,4 kV;2,2 kA) qui utilise une détection classique pour insérer une inductance supraconductrice de limitation sans tirer parti de sa transition. Une configuration originale de limiteur inductif à déclencheur HTc permet d'auto renforcer l'effet de limitation par application d'un champ magnétique (**Figure III.14**), [21].

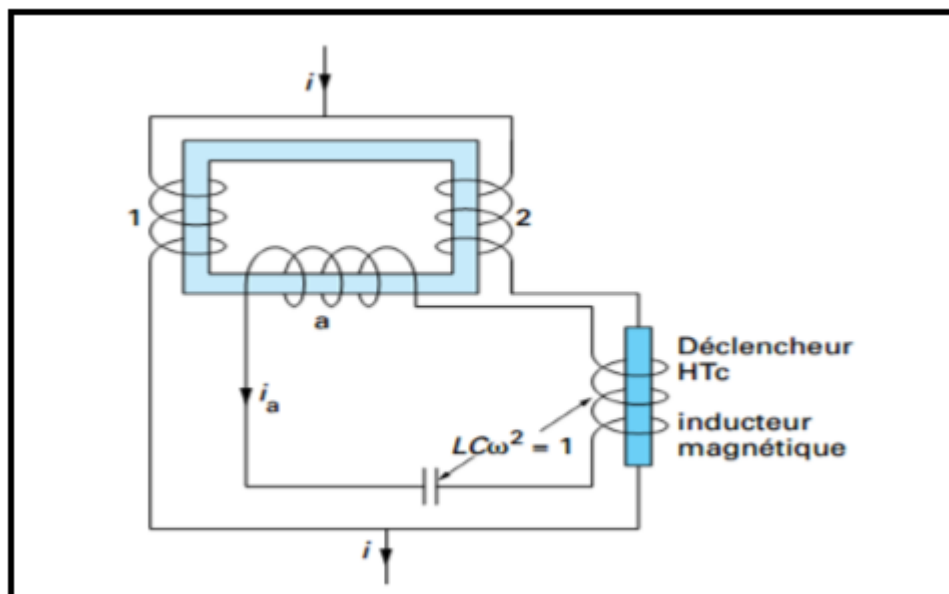


Figure III.14. Limiteur à trigger auto renforcé, [21].

III.7.2.3. SCFCL de type noyau magnétique écranté

Ce type de limiteur est souvent appelé SCFCL inductif, il est composé d'un enroulement primaire conventionnel bobiné autour d'un noyau magnétique entre les quels ce trouve un cylindre supraconducteur (**Figure III.15**).

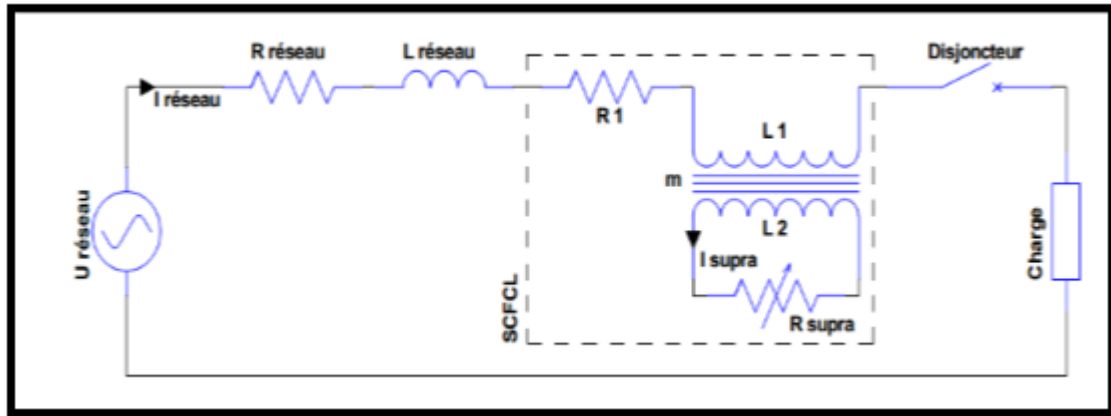


Figure. III.15. SCFCL de type noyau magnétique écranté, [21].

Son principe de fonctionnement est semblable à un transformateur avec un rapport de transformation « m » et un enroulement secondaire court-circuité (**Figure III.16**), [14].

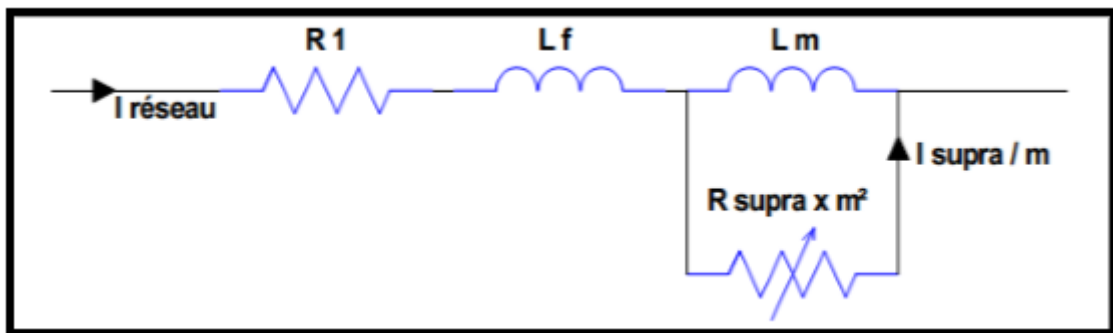


Figure III.16. Schéma équivalent du SCFCL de type noyau magnétique écranté, [14].

En régime assigné, le courant induit dans le cylindre supraconducteur est inférieur à son courant critique et fonctionne comme un parfait écran magnétique pour l'enroulement primaire, ainsi le flux dans le noyau magnétique est négligeable. La faible impédance apparente du SCFCL équivaut à la résistance R_1 de l'enroulement primaire et à l'inductance de fuite L_f entre l'enroulement primaire et le cylindre supraconducteur.

En régime de défaut, le courant dans le supraconducteur excède sa valeur critique et le cylindre développe une résistance. Le flux pénètre alors le noyau magnétique, générant ainsi une impédance de limitation constituée par la mise en parallèle de l'inductance magnétisante L_m et de la résistance

R_{supra} ramenée au primaire soit $R_{supra} \times m^2$. Ainsi la conception du dispositif détermine si l'impédance de court-circuit est principalement résistive ou inductive.

Ce type de SCFCL est avantageux car le supraconducteur n'est pas directement connecté au réseau et il n'y a pas d'amenées de courant à basse température. En régime de défaut le supraconducteur est soumis à une tension faible correspondant à la tension du réseau atténué par le rapport de transformation « m ». Les principaux inconvénients de ce type de SCFCL sont le volume et le poids qui sont semblables à un transformateur de même puissance. Il est également nécessaire de respecter un temps de récupération avant d'utiliser de nouveau le SCFCL, [14].

III.7.2.4. SCFCL de type pont redresseur

Ce type de SCFCL (**Figure III.17**) est composé d'un pont redresseur à diodes ou thyristors, d'une bobine supraconductrice L_{supra} et d'une source de tension continue U_{dc} .

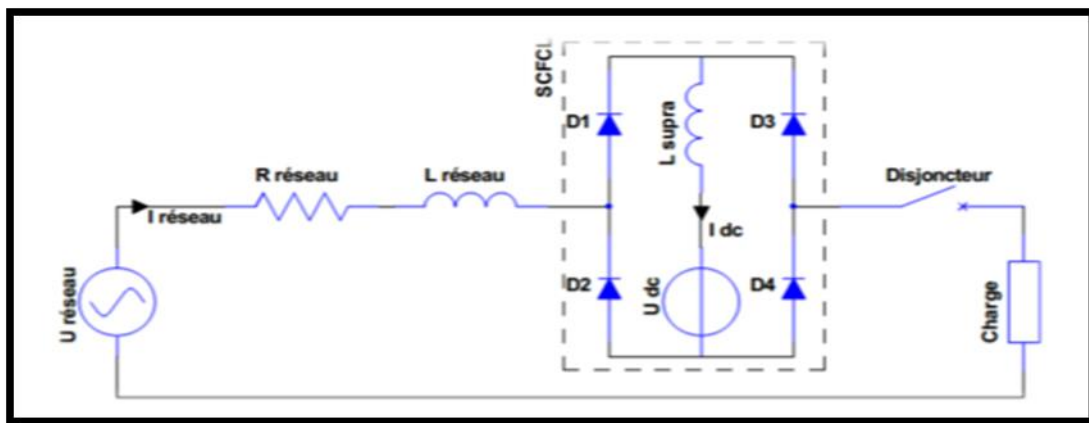


Figure III.17. SCFCL de type pont redresseur, [14].

Un courant continu I_{dc} traversant une bobine supraconductrice L_{supra} est délivrée par une source de tension U_{dc} . En régime assigné le courant $I_{réseau}$ étant inférieur au courant, les diodes sont passantes et le courant $I_{réseau}$ ne traverse pas l'inductance. Dans ce cas l'impédance du SCFCL est faible et seule l'électronique de puissance génère des pertes. Si le courant $I_{réseau}$ excède le courant I_{dc} , les diodes (D1, D4) ou (D2, D3) selon l'alternance concernée par le court-circuit, se bloquent. Ce quasi fonctionnement en pont redresseur fait circuler le courant $I_{réseau}$ dans la bobine L_{supra} qui limite le courant par sa forte inductance.

En principe la bobine peut être non-supraconductrice, mais ceci augmente les pertes par effet Joule et implique également un enroulement plus grand. En remplaçant les diodes par des thyristors il devient possible de stopper le court-circuit au passage par zéro du courant. De plus, le courant de déclenchement est réglable par I_{dc} et peut facilement être adapté aux besoins du réseau. Cependant le fonctionnement reste peu fiable, en effet en régime de défaut un dysfonctionnement d'une diode court-circuitera la bobine, annulant ainsi le phénomène de limitation de courant, [14].

III.7.2.5. SCFCL de type contrôleur du courant de défaut

Un composant d'électronique de puissance comme le thyristor, peut par son ouverture aiguiller un courant dans une impédance de limitation. La possibilité d'ajuster le seuil de déclenchement de la commande fait de ce type de SCFCL un contrôleur de courant de court-circuit. Il est composé de deux thyristors T1 et T2 montés en opposition-série et court-circuités respectivement par les inductances supraconductrices L1 et L2. (Figure III.18).

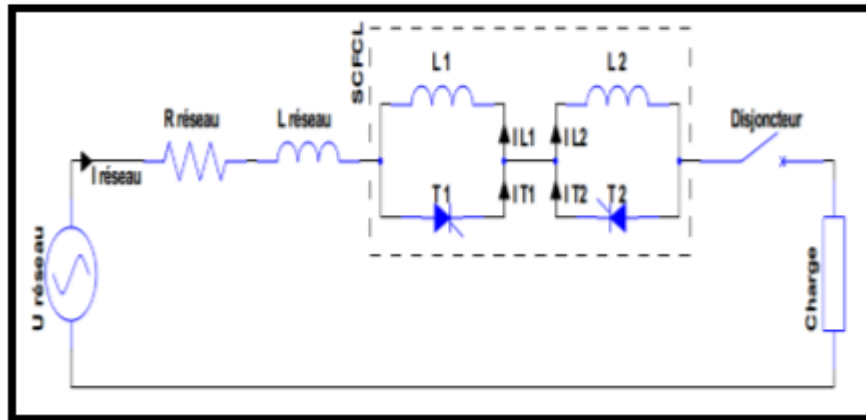


Figure III.18. SCFCL de type contrôleur du courant de défaut, [14].

Pour amorcer le fonctionnement du système, il est nécessaire de connecter une charge au réseau puis de commander alternativement les Thyristors T1 et T2 pour faire circuler un courant continu d'amplitude I_{dc} dans les bobines supraconductrices L1 et L2. En régime assigné l'amplitude du courant $I_{réseau}$ étant inférieure à I_{dc} , les thyristors conduisent en permanence et l'impédance du SCFCL correspond à la chute de tension des thyristors.

En régime de défaut le courant $I_{réseau}$ dépasse I_{dc} , ceci bloque alternativement les thyristors et aiguille ainsi le courant dans les inductances qui leurs sont associées.

Par conséquent les inductances supraconductrices L_1 et L_2 sont alternativement insérées sur le réseau à chaque passage par zéro du courant, cette augmentation d'impédance permet ainsi de limiter le courant. Cette architecture possède les mêmes caractéristiques que le SCFCL avec pont redresseur mais exige une source de tension et de l'électronique de puissance en moins.

III.7.2.6. SCFCL de type noyaux magnétiques saturés

Pour limiter le courant de court-circuit, une impédance non-linéaire peut être obtenue en reliant les enroulements $L1$ et $L2$ de deux noyaux magnétiques saturés par des bobines supraconducteurs $L_{supra 1}$ et $L_{supra 2}$ parcourues par des courants continus. (Figure III.19).

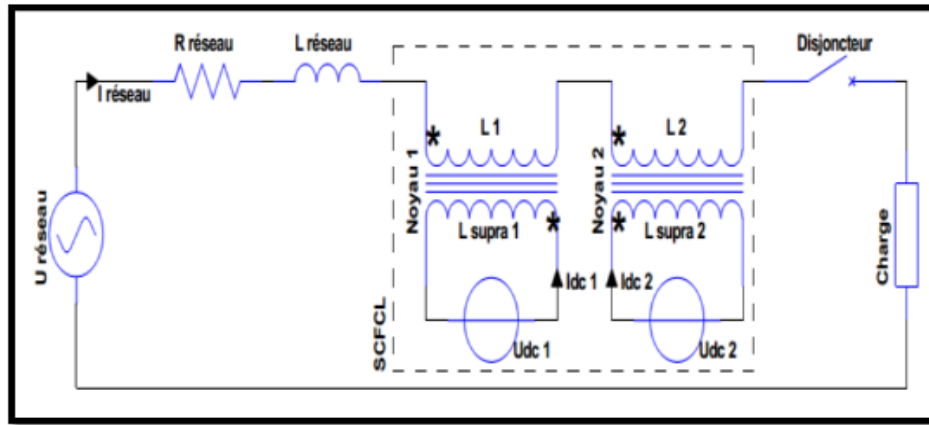


Figure III.19. SCFCL de type noyaux magnétiques saturés, [14].

Les deux noyaux étant saturés, l'inductance apparente du SCFCL est faible et correspond à la somme des résistances et des réactances de $L1$ et $L2$. En régime assigné, $I_{réseau}$ est assez bas pour maintenir les noyaux entièrement saturés, assurant ainsi la faible impédance du SCFCL. Dans le cas d'un défaut, l'augmentation de $I_{réseau}$ conduit alternativement les deux noyaux hors de leur saturation, dans leur zone de perméabilité élevée. Ceci entraîne une importante augmentation de l'impédance apparente du SCFCL, développant ainsi un champ électrique permettant de limiter le courant. L'enroulement supraconducteur n'étant que très faiblement traversé par le courant variable, les pertes à basse température sont faibles et ne nécessitent pas de système de refroidissement important. Cependant, le noyau de fer et toute l'installation restent relativement encombrants, [14].

III.7.3. Emplacements d'un limiteur

❖ Un limiteur de courant peut être placé :

En sortie de tranche ou de sous-station; on peut protéger ainsi le générateur et le transformateur qui peuvent être dimensionnés en fonction du courant de limitation et non plus en fonction du courant de court-circuit.

Dans les sections d'entrée des sous-stations; pour des réseaux existants, cela permet de maintenir l'interconnexion des sections en aval.

Dans une branche d'interconnexion; ce qui permet, d'une part, d'isoler la portion en défaut tout en assurant la continuité d'exploitation avec les autres sources et, d'autre part, d'améliorer les marges

de stabilité et la qualité des systèmes. Par ailleurs, le Limiteur peut être utilisé comme régulateur sélectif permettant d'équilibrer la charge dans des branches en parallèle, [17].

Les limiteurs doivent être calibrés pour ne fonctionner qu'en régime de défaut et pas sur les surcharges momentanées et être compatibles avec les systèmes de protection existants. Dans les applications en ligne, la majorité des défauts étant fugitifs (90 % sur les lignes aériennes) la refermeture automatique (cycle OFO) du disjoncteur est employée: les systèmes classiques, qui ne changent pas d'état, acceptent cette procédure ; par contre tout ou partie des dispositifs supraconducteurs, notamment les limiteurs à basse température critique, devront être dupliqués pour assurer cette fonction. Cette duplication n'est pas indispensable en interconnexion, où un délai de quelques minutes avant refermeture est acceptable. Dans le cas des matériaux HTc, à haute température critique, la faible dissipation peut permettre d'envisager des temps de récupération compatibles avec les cycles OFO. L'insertion d'un limiteur dans un réseau de distribution peut être envisageable en plusieurs endroits. Selon l'emplacement choisi, le limiteur de courant pourrait avoir des caractéristiques différentes (courant nominal, courant limité, temps de récupération ...). Ainsi, en fonction de son emplacement, le matériau supraconducteur utilisé pour le limiteur pourra être différent, ce qui permettrait d'utiliser au mieux les particularités de chaque type de supraconducteur. Une première place très intéressante pour installer un limiteur se situe entre deux jeux de barres (**Figure III.20**) afin d'augmenter le maillage du réseau (toujours dont le but d'accroître la continuité de service). Actuellement, certains réseaux moyens tension ne peuvent pas être interconnectés entre eux car les courants de court-circuit engendrés seraient trop importants. La sensibilité accrue de l'opinion publique et le coût engendré vis à vis de l'installation de nouvelles lignes de transport, poussent à tirer le meilleur parti des infrastructures existantes. Ainsi en haute tension, le bouclage de deux réseaux évite d'amener une autre source pour sécuriser les départs, [17].

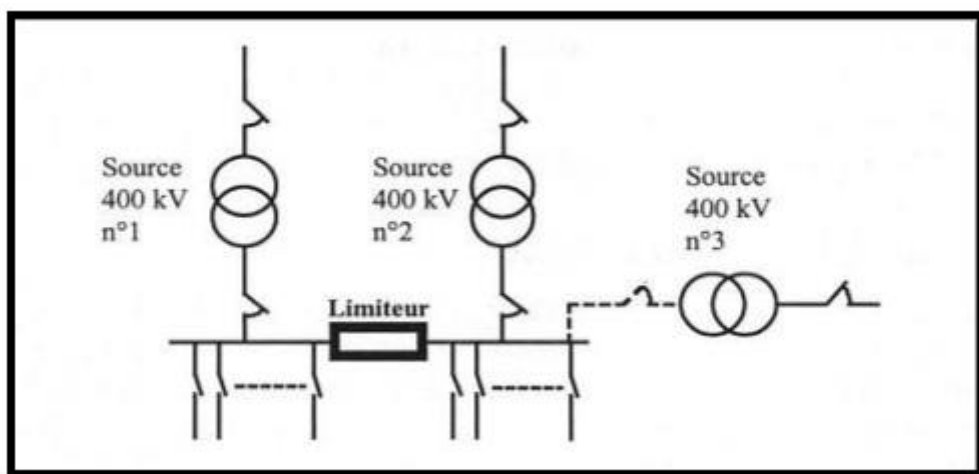


Figure III.20. Limiteur entre deux boucles d'un réseau, [17].

Les limiteurs de courant peuvent être placés en différents endroits d'un réseau électrique classique. Deux exemples vont être donnés : Dans la (**Figure III. 21**), le limiteur supraconducteur relie deux parties du réseau non interconnectables actuellement. Cette liaison conduit en effet à des courants de court-circuit dépassant les capacités de coupure des disjoncteurs actuels. Par contre, cette liaison sécurise avantagusement le réseau et améliore la qualité de tension. La remise en service du limiteur après une limitation n'a pas à être rapide puisque l'isolation conduit à l'état actuel du réseau non interconnecté, comme en cas d'incident sur le limiteur.

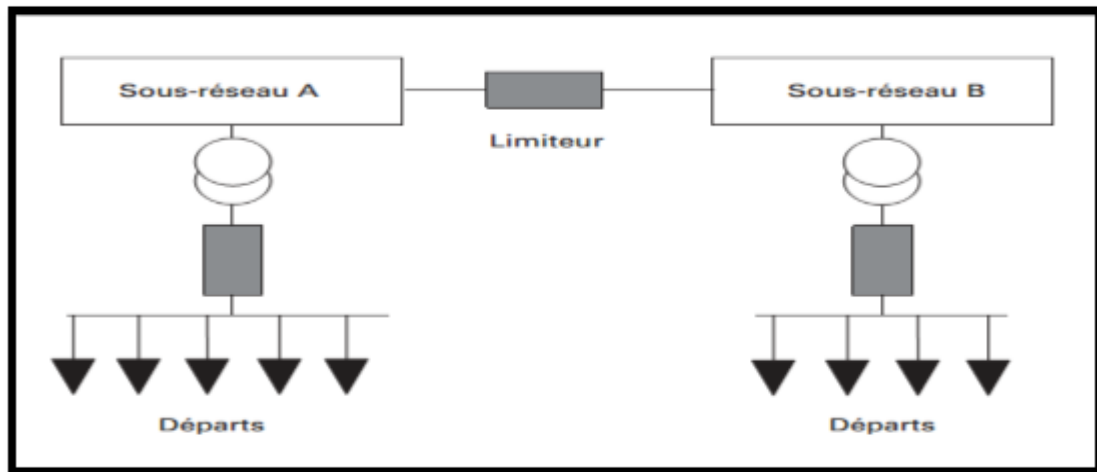


Figure III.21. Emplacement très intéressant d'un limiteur, [17].

La (**Figure III.22**) donne un autre exemple d'emplacement très intéressant d'un limiteur dans une sous-station en Allemagne. Les 2 sous-réseaux 110 KV, A et B sont alimentés chacun par 2 transfo de 1000 MVA A1/A2 et B1/B2 pour satisfaire à la règle $n-1$ de dimensionnement des réseaux électriques. Ce critère $n-1$ signifie que le réseau doit fonctionner avec la perte d'un élément, ici un transformateur. Si l'un des 2 transformateurs alimentant un sous-réseau est hors d'usage, l'autre assure la continuité de service, mais au prix d'un appareil de 1000 MVA avec tous les accessoires, notamment les organes de coupure associés. L'utilisation de 2 limiteurs de courant de défaut permet trait de s'affranchir de 2 transformateurs de 1000 MVA tout en assurant le critère $n-1$. En cas d'indisponibilité du seul transformateur alimentant le sous-réseau, celui-ci est alimenté par l'autre sous-réseau via le limiteur. La liaison entre les 2 sous-réseaux 110 kV n'est pas possible sans limiteur car elle conduirait à des courants de défaut trop élevés. Les évaluations conduisent à une réduction de 50 % des coûts d'investissement et d'exploitation, [21].

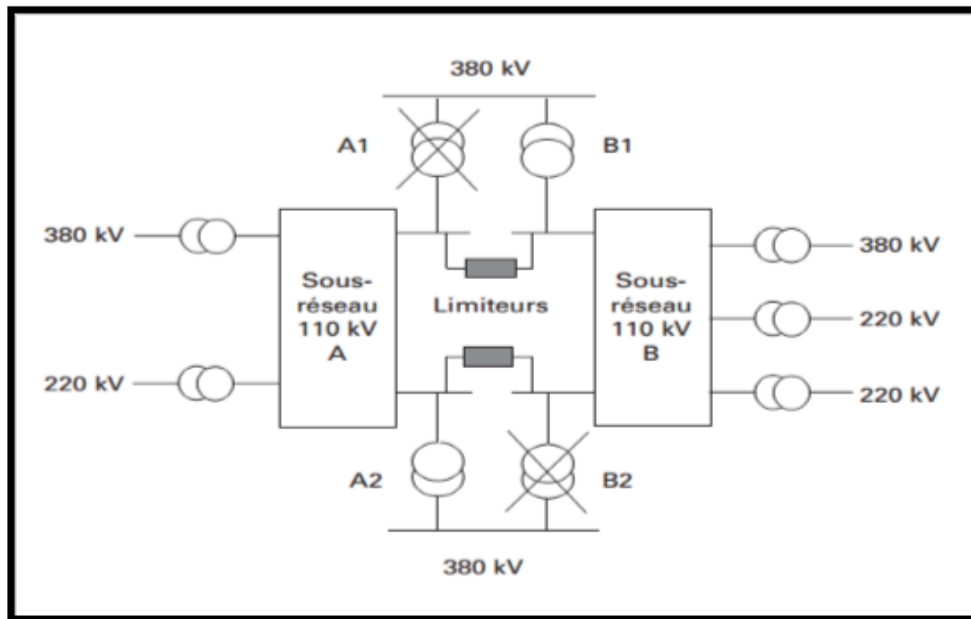


Figure III.22. Exemple d'emplacement intéressant de limiteurs dans une sous-station, [21].

III.7.4 Avantages et inconvénients propres aux supraconducteurs

Les avantages attendus par rapport aux systèmes classiques sont :

- Une limitation immédiate et non différée du courant, ce qui garantit la protection des matériels contre les efforts électromagnétiques intenses qu'occasionnent les sur-courants.
- Une fonctionnalité nouvelle sans équivalent classique.
- Un fonctionnement autonome et naturel.
- Une intégration des dispositifs de détection et de limitation.
- Un faible chute de tension et de faibles pertes en régime normal.
- Une masse et un volume réduits.
- Un fonctionnement répétitif, la transition de l'état supraconducteur à l'état normal étant non destructive si elle est bien maîtrisée.
- Une autoprotection en cas de dysfonctionnement automatique puisque, en cas de panne. Cryogénique par exemple, le supraconducteur se trouve naturellement dans l'état normal résistif.
- Une bonne tenue diélectrique pour les applications en haute tension.
- Une réponse possible aux besoins accrus de la qualité de la fourniture d'énergie électrique.

Les inconvénients qu'il convient de minimiser par des dispositifs s'adaptés sont :

- Les pertes cryogéniques.
- Le temps de récupération.

- La compatibilité et la connectique avec le réseau (amenées de courant).
- Les besoins de maintenance, [21].

III.8.Conclusion

Les défauts sont définis comme étant des évènements qui contribuent à la violation des limites de conception des composants du réseau électrique. Le courant de court-circuit est défini comme étant une connexion anormale (relativement de bas impédance) entre deux points de potentiels différents, produite accidentellement ou intentionnellement peut endommager les équipements constituant le réseau.

Le limiteur de courant supraconducteur est un élément clé pour la protection des matériels électriques, l'extension des puissances transitées sur réseaux existants, l'accroissement du degré d'interconnexion des réseaux et de la qualité du service. Le phénomène exploité est, sauf de rares exceptions, le passage de l'état supraconducteur à l'état résistif, Obtenu lorsque le courant atteint un certain seuil.

Nous avons décrit dans ce chapitre les différents types de limiteurs et leurs configurations dans un réseau électrique. En effet, afin d'utiliser des supraconducteurs à haute température critique pour la réalisation d'un limiteur de courant, il nous a d'abord fallu comprendre leur comportement tant en régime nominal qu'en régime de limitation. Le calcul des courants de court-circuit et de voir leurs influence sur le réseau électrique sans et avec limiteurs de courant fera l'objet du chapitre suivant.