

Influence des défauts de type court-circuit sur l'emplacement optimal d'un limiteur de courant supraconducteur dans un réseau d'énergie électrique

Gaëtan DIDIER, Charles Henri BONNARD, Bruno DOUINE, Jean LEVEQUE

Groupe de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Nancy
Faculté des Sciences et Technologies de Nancy, 54500 Vandoeuvre les Nancy

RESUME -Une nouvelle méthode, permettant de déterminer l'emplacement optimal d'un limiteur de courant de court-circuit supraconducteur dans un réseau d'énergie en présence de défaillance, est présentée dans ce papier. Cette méthode utilise, comme donnée d'entrée, les variables du réseau donnant une information sur la stabilité transitoire du système. Une analyse des résultats obtenus est présentée en fin de papier pour identifier l'emplacement optimal du limiteur en prenant en considération l'ensemble des défauts de type court-circuit existant. Cette étude d'emplacement optimal est couplée à la recherche de la résistance optimale que le limiteur doit introduire dans le réseau au moment de la défaillance. Les simulations sont réalisées sur le réseau test IEEE composé de deux secteurs et quatre alternateurs synchrones pour prouver l'efficacité de la méthode proposée.

Mots-clés—Limiteur de courant de court-circuit supraconducteur, stabilité du réseau, emplacement optimal, défaut de type court-circuit.

1. INTRODUCTION

La demande toujours croissante d'énergie entraîne indéniablement une élévation du courant de court-circuit des réseaux de distribution d'énergie électrique imposant obligatoirement un changement des appareils de protection donc une augmentation du coût financier pour l'entreprise [1]. De nouvelles technologies voient le jour de sorte à limiter ce courant tout en gardant les appareils de protection en place. Pour réaliser cette limitation, il est possible d'utiliser la transition naturelle d'un matériau connu sous le nom de supraconducteur. Le passage de son état supraconducteur (invisible pour le réseau) vers son état résistif permet de limiter les courants de défauts lors de l'apparition d'une défaillance dans le réseau de distribution (ou de transport) d'énergie dans un temps relativement court. C'est dans ce cadre que le concept de limiteur de courant de court-circuit supraconducteur est intéressant, puisqu'il permettrait de soulager les différents éléments haute tension durant un défaut. Une diminution de l'impédance de court-circuit et une meilleure interconnexion des réseaux de distribution pourraient alors être envisagées. La qualité de l'énergie fournie serait ainsi améliorée notamment en terme de

continuité de service, forte préoccupation actuelle [2-4]. Cependant, la mise en place de ce type de limiteur ne peut se faire n'importe où dans le réseau. Plusieurs paramètres importants entrent en jeu dans ce cas tel que :

1. La valeur de la résistance introduite par le limiteur en cas de court-circuit ;
2. La position optimale du limiteur dans le réseau ;
3. La coordination des systèmes de protection avec le limiteur supraconducteur (disjoncteur, sectionneurs, capteurs, ...).

La méthode proposée s'oriente plus particulièrement sur les points 1. et 2. Diverses études ont été menées sur l'influence d'un limiteur dans un réseau de distribution mais la majorité a porté sur l'analyse d'un réseau radial simple (une machine, une ligne de transmission, un bus infini) [5]. Nous proposons dans cet article d'étendre l'étude à un réseau de plusieurs alternateurs en prenant en compte l'ensemble des défauts de type court-circuits existants.

2. MODELE DU LIMITEUR DE COURANT SUPRACONDUCTEUR

Le modèle du limiteur de courant de court-circuit supraconducteur peut être représenté par une impédance, qui dépend du courant et/ou de la température [6-7], ou par une résistance qui varie en fonction du temps [5][8]. Le premier modèle est plutôt utilisé lors d'une étude du comportement du limiteur à proprement parler (étude du passage de l'état supraconducteur à l'état résistif). Dans notre étude, la sélection de l'emplacement optimal du limiteur est basée sur l'étude de la stabilité transitoire du réseau lors de l'apparition d'un défaut. L'analyse de la stabilité transitoire d'un réseau s'étalant sur plusieurs secondes, la résistance variant en fonction du temps sera privilégiée pour diminuer le temps de simulation (modélisation du comportement plus simple). Par conséquent, la résistance du limiteur de courant de court-circuit supraconducteur peut s'exprimer par :

$$R_{SFCL}(t) = R_{Lim}(1 - e^{-t/T_c}) \quad (1)$$

où R_{Lim} et T_c représentent respectivement la résistance maximale du limiteur à l'état résistif et le temps nécessaire à la transition du limiteur de l'état supraconducteur à l'état résistif.

Dans notre étude, ce temps sera considéré égal à 1 ms.

3. CALCUL DE L'INDICE DE STABILITE

La recherche de l'emplacement et de la résistance optimal du limiteur de courant supraconducteur est basée, dans la méthode proposée, sur l'analyse de la stabilité transitoire du réseau lorsque ce dernier est soumis à un défaut de type court-circuit. Habituellement, le limiteur de courant supraconducteur est placé à un endroit du réseau présentant un courant de court-circuit important. Cependant, dans ce cas de figure, l'influence du limiteur sur les autres paramètres du réseau, tel que la stabilité transitoire, est souvent écartée. Dans [8], les auteurs ont montré que la transition d'un limiteur de courant supraconducteur de son état supra vers son état résistif peut induire une instabilité dans le réseau lorsque ce dernier est soumis à un court-circuit triphasé. Par conséquent, du point de vue du réseau, l'emplacement du limiteur doit être choisi de sorte à obtenir une protection du réseau optimale, que ce soit du point de vue de la limitation du courant de défaut que du point de vue de la stabilité globale du système et ce, quelque soit le type de court-circuit. C'est dans ce contexte que les travaux présentés ont été conduits, rechercher l'emplacement optimal d'un limiteur de courant de court-circuit supraconducteur de sorte à limiter le courant de défaut tout en augmentant la stabilité du système en cas de court-circuit.

Pour un réseau présentant plus d'un générateur, une condition nécessaire pour assurer la stabilité de l'ensemble du système réside dans le fait qu'il faut garder, à chaque instant, le synchronisme entre tous les générateurs, et ce que ce soit pour un régime de fonctionnement normal où défaillant (perte d'une ligne de transmission, augmentation brutale d'une charge, court-circuit monophasé, biphasé ou encore triphasé). Ce synchronisme est directement associé à la dynamique des générateurs et aux relations puissance-angle du système [1]. Lorsqu'un défaut apparaît, le point de fonctionnement du système change instantanément. A cause de l'inertie mécanique des générateurs, la séparation angulaire entre les rotors des différentes machines, que nous appellerons δ , évolue dans le temps jusqu'à ce que le défaut soit éliminé du système (par l'ouverture des disjoncteurs par exemple). Au début du défaut, cette séparation angulaire augmente jusqu'à atteindre une valeur qui est exclusivement fonction du temps nécessaire à supprimer le défaut. Si ce temps est faible, le réseau est perturbé mais un nouveau point stable est trouvé après quelques secondes, dans le cas contraire, le réseau ne peut se stabiliser et le synchronisme de l'ensemble est perdu.

La figure 1 présente l'évolution la séparation angulaire δ d'un réseau composé de seulement deux générateurs et une charge, lorsqu'un défaut triphasé apparaît à $t=1$ sec près d'un des deux générateurs. Cette séparation angulaire représente la différence angulaire entre les rotors des deux générateurs. Comme nous pouvons le remarquer, si le défaut est supprimé à l'instant $t=1,2$ sec, le système retrouve un état stable. L'angle δ oscille quelques secondes pour finalement retrouver une valeur constante, signe du retour à un fonctionnement stable du réseau. Par contre, si le défaut est supprimé à $t=1,3$ sec, l'énergie cinétique emmagasinée par les générateurs durant la période du défaut est trop importante pour permettre au système de retrouver un point de stabilité. L'angle δ continu d'augmenter même après la suppression du défaut, indiquant

une perte du synchronisme entre les deux générateurs, donc une perte du transit de puissance.

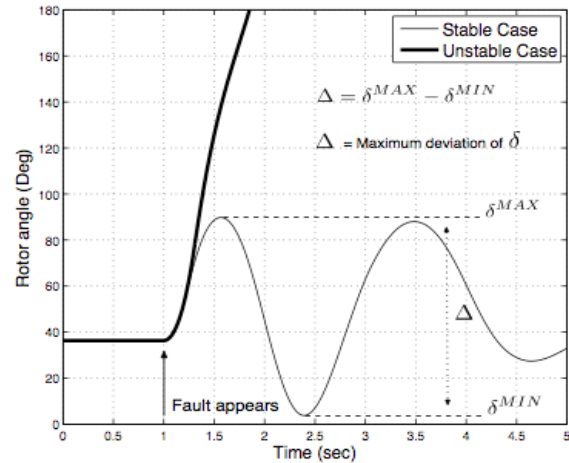


Fig.1 : Evolution de l'angle de séparation des rotors pour un défaut éliminé 1,2 sec (cas stable) et un défaut éliminé à 1,3 sec (cas instable).

Sung a montré théoriquement dans [11] que la présence d'un limiteur de courant de court-circuit supraconducteur dans un réseau radial simple (1 générateur, 1 ligne de transmission, 1 bus infini) permet d'augmenter ce temps de suppression du défaut. En d'autres termes, la présence du limiteur supraconducteur permet d'avoir un laps de temps supplémentaire pour assurer l'ouverture de la ligne défaillante. Si nous portons cette information dans le domaine de la stabilité des réseaux, la présence du limiteur supraconducteur permet de réduire la variation de l'angle δ ($\delta^{MAX} - \delta^{MIN}$). Par conséquent, la stabilité globale du réseau est ainsi augmentée. En partant de cette observation, nous proposons une méthode de sélection de l'emplacement optimal du limiteur de courant de court-circuit supraconducteur basée sur l'étude de la séparation angulaire entre les rotors des générateurs du réseau à étudier. Beaucoup d'études existent sur l'impact des limiteurs dans un réseau en terme de stabilité mais la plupart d'entre elles se sont limitées à un réseau radial simple. Au jour d'aujourd'hui, il est nécessaire d'orienter ce type d'étude vers des réseaux plus importants. L'étude présentée ne se limite pas à un réseau radial simple mais est étendue à un réseau test IEEE quatre générateurs, 2 secteurs présentés à la figure 2.

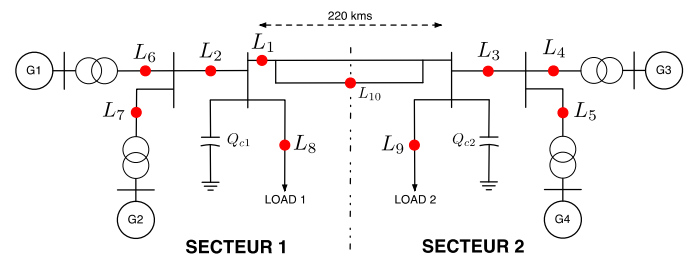


Fig.2 : Réseau test IEEE utilisé pour les simulations

Ce réseau est composé de quatre générateurs, notés G1 à G4, chacun commandé par un régulateur de puissance et de vitesse. Le détail de ce réseau peut être trouvé dans [12]. Pour déterminer l'emplacement optimal du limiteur dans ce réseau test, la séparation angulaire de tous les générateurs est calculée pour chaque type de défaut étudié et ce, pour

différente valeur de résistance du limiteur. Si nous considérons le générateur G4 comme référence, nous pouvons calculer la variation temporelle des angles $\delta_{iN_g}(t)$ ($i = 1$ à 3 et $N_g = 4$) pour évaluer la déviation maximale Δ_{iN_g} lorsqu'un défaut apparaît à l'un des emplacement préalablement définis (L_1 à L_{10}) pour une valeur donnée de R_{Lim} (Eq. 2). Ces trois données sont ensuite additionnées de sorte à obtenir un indice noté $\Delta_{k/R_{Lim}}$ (Eq. 3) image de la stabilité du réseau étudié pour un emplacement de défaut k et une valeur de résistance R_{Lim} du limiteur supraconducteur. Pour analyser l'influence du limiteur sur la stabilité du réseau en cas de défaut, un indice global, noté $m_{k/R_{Lim}}$ (Eq. 4), est calculé en comparant l'indice $\Delta_{k/0}$ (indice obtenu sans limiteur de courant supraconducteur, c'est à dire pour une résistance R_{Lim} égale à 0) et l'indice $\Delta_{k/R_{Lim}}$ obtenu pour un emplacement k et une valeur de résistance R_{Lim} .

$$\Delta_{iN_g} = \delta_{iN_g}^{MAX} - \delta_{iN_g}^{MIN} \quad (2)$$

$$\Delta_{k/R_{Lim}} = \sum_{i=1}^{N_g-1} \Delta_{iN_g} \quad (3)$$

$$m_{k/R_{Lim}} = \Delta_{k/0} - \Delta_{k/R_{Lim}} \quad (4)$$

où N_g , $\delta_{iN_g}^{MAX}$, $\delta_{iN_g}^{MIN}$ représentent respectivement le nombre de générateurs présents dans le réseau étudié (4 dans notre cas), la valeur maximal de la déviation angulaire entre les rotors du générateur i (i compris entre 1 et $(N_g - 1)$) et du générateur N_g , la valeur minimale de la déviation angulaire entre les rotors du générateur i et du générateur N_g . Le terme $\Delta_{k/R_{Lim}}$ représente la somme des variations angulaires des rotors de tous les générateurs du réseau étudié (les $(N_g - 1)$ générateurs par rapport au générateur noté N_g (k représente un des emplacements possibles du limiteur dans le réseau et R_{Lim} la valeur de la résistance associée au limiteur).

4. RESULTATS DE SIMULATION

Pour analyser la méthode présentée, 10 emplacements possible pour le défaut (et donc le limiteur), notés L_1 à L_{10} (figure 1), ont été choisis dans le réseau test. De plus, la ou les travaux actuels limitent leurs études au court-circuit triphasé, la méthode proposée prend en considération que différents types de court-circuit peuvent apparaître dans le réseau test IEEE :

- Défaut monophasé (Mono)
- Défaut Biphasé avec terre (Bi_AT)
- Défaut biphasé sans terre (Bi_ST)
- Défaut triphasé avec terre (Tri_AT)
- Défaut triphasé sans terre (Tri_ST)

Nous considérons que les différents types de défauts peuvent apparaître aux emplacements L_1 à L_{10} et que chaque emplacement est apte à accueillir un limiteur de courant supraconducteur. La première étape de cette méthode consiste à calculer la valeur du terme $\Delta_{k/0}$ (cas où le limiteur de courant supraconducteur n'est pas introduit dans le réseau) pour chaque type de défaut et chaque emplacement possible du limiteur. L'étape suivante consiste à étudier le réseau, toujours en terme de comportement dynamique, mais en intégrant un limiteur de courant supraconducteur à l'emplacement même ou le défaut

est créé (pour chaque type de défaillance et pour plusieurs valeurs de résistance du limiteur). Les résultats ainsi obtenus nous permettent d'évaluer le terme $\Delta_{k/R_{Lim}}$ et l'indice de stabilité en présence du limiteur $m_{k/R_{Lim}}$. Lorsque toutes les valeurs de la résistance du limiteur ont été testées, l'analyse de l'indice $m_{k/R_{Lim}}$ nous donnera l'emplacement optimal du limiteur ainsi que la valeur optimale de sa résistance de sorte à obtenir la stabilité optimum de l'ensemble du système.

A $t_f=1$ sec, le défaut est créé à l'emplacement L_k . La ligne est ouverte par les interrupteurs à $t_0 = t_f + 100$ ms de sorte à supprimer le défaut du réseau. A $t_r = t_f + 160$ ms, les interrupteurs remettent en service la ligne de transport en considérant que le défaut est définitivement supprimé [21]. Le temps de simulation nécessaire pour le système retrouve un point de fonctionnement stable est de 20 secondes. Avant de pouvoir calculer les différents indices $m_{k/R_{Lim}}$, il est nécessaire de déterminer l'écoulement de puissance avant défaut du réseau. Cette étude permet de connaître les puissances produites par les générateurs et transitées par les lignes pour une charge donnée. Les résultats montrent que les puissances produites par G1 et G2 sont absorbées par la charge 1. Dans le secteur 2, la charge 2 absorbe la totalité des puissances produites par les générateurs G3 et G4. Cependant, pour satisfaire son fonctionnement nominal, la charge 2 absorbe en complément une puissance de 413 MW en provenance du secteur 1 (G1 et G2). Cette puissance est transitée par les 220 kms de lignes séparant les deux secteurs.

4.1. Etude pour le défaut monophasé

Nous donnons dans cette partie les résultats intermédiaires obtenus pour le calcul de l'indice de stabilité $m_{k/R_{Lim}}$ pour un défaut de type monophasé. Pour les autres défauts, seul les résultats finaux seront donnés dans la prochaine section. Pour l'ensemble des défauts, nous avons choisi de faire varier la résistance du limiteur de courant de court-circuit supraconducteur d'une valeur de 5Ω à 90Ω par pas de 5Ω . Il n'est pas nécessaire de prendre une valeur de résistance supérieure à 90Ω car, dans ce cas de figure, la réalisation pratique d'un limiteur supraconducteur de cette valeur serait expérimentalement difficile (importante longueur de câble pour atteindre cet objectif).

Nous donnons au tableau 1 les résultats obtenus pour l'indice $\Delta_{k/R_{Lim}}$ lorsqu'un défaut monophasé (phase A) apparaît à l'emplacement L_k . Nous précisons que dans ce Tableau, la seconde ligne correspond à la valeur de l'indice $\Delta_{k/0}$ (défaut sans limiteur supraconducteur dans le réseau).

Comme nous pouvons le voir, les emplacements L_3 , L_5 et L_7 sont plus sensibles au défaut monophasé que les autres étant donné que la valeur de l'indice $\Delta_{k/R_{Lim}}$ correspondant est importante ($\Delta_{k/R_{Lim}} > 100^\circ$). Le fait que le défaut apparait près des générateurs peut être une explication à ces résultats. Si nous effectuons une analyse de l'ensemble des données, nous pouvons remarquer que la présence du limiteur supraconducteur augmente la stabilité du réseau pour les emplacements L_1 à L_9 . Pour l'emplacement L_{10} , nous pouvons remarquer l'effet inverse, la présence du limiteur augmente l'instabilité du réseau et ce quelque soit la valeur de la résistance choisie. Ce résultat a déjà été montré dans [9] pour un court-circuit triphasé. A ce stade de l'étude, nous pouvons

déjà conclure sur le fait que placer un limiteur de courant supraconducteur dans une ligne de transport séparant deux secteurs augmente l'instabilité de l'ensemble du réseau en cas de défaut (quelque soit le type de défaut). Nous pouvons aussi remarquer que la stabilité du réseau pour un défaut monophasé n'augmente pas avec la valeur de la résistance du limiteur. En effet, pour tous les emplacements sélectionnés (hormis l'emplacement L_{10}), nous obtenons un minimum de l'indice $\Delta_{k/R_{Lim}}$ pour des valeurs de résistances qui sont proches de la valeur de la résistance de la ligne considérée.

Tableau 1. Valeur de l'indice $\Delta_{k/R_{Lim}}$ pour un défaut monophasé -Phase A

R_{Lim} \ k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0 (sans limiteur)	45.10	88.31	100.98	86.02	106.72	70.59	103.14	52.56	75.99	6.22
5	32.45	31.78	50.10	68.33	76.52	59.17	73.89	32.65	40.08	6.38
10	17.77	9.82	19.02	55.54	53.70	47.55	41.97	16.29	26.27	6.60
15	7.15	14.84	13.09	50.21	44.59	41.95	30.50	4.94	25.27	6.87
20	16.13	18.36	13.89	47.15	47.63	38.54	34.93	3.92	29.64	7.31
25	16.46	19.93	11.62	47.71	49.14	35.33	33.65	2.04	28.07	7.31
30	18.24	21.36	14.10	47.08	49.69	34.30	33.78	2.10	30.80	7.46
35	18.92	22.93	18.65	46.27	50.42	32.45	33.90	2.65	33.67	7.93
40	20.17	23.37	22.44	45.59	51.10	32.51	34.55	3.34	37.11	7.83
45	20.91	24.19	26.37	45.16	52.05	32.20	35.16	3.93	40.20	8.00
50	19.82	25.94	33.55	45.01	56.05	31.49	36.28	5.32	40.07	8.97
55	21.99	26.02	33.32	45.10	54.41	31.92	36.53	5.12	45.95	8.34
60	24.49	26.89	37.63	43.07	53.90	32.36	36.81	6.96	55.51	8.25
65	22.91	28.38	39.31	45.78	56.43	32.28	38.32	6.02	50.65	8.62
70	23.26	29.64	41.88	46.50	57.27	32.95	39.12	6.43	52.74	8.77
75	22.23	32.23	46.90	47.31	60.93	33.64	40.78	7.55	50.53	9.65
80	23.86	32.17	46.35	48.26	58.84	34.47	40.62	7.13	56.36	9.04
85	24.12	33.37	48.25	49.24	59.54	35.28	41.32	7.44	57.90	9.17
90	23.13	35.76	52.12	50.14	63.10	36.20	43.03	8.54	54.45	9.99

Nous donnons dans le tableau 2 la valeur de l'indice de stabilité $m_{k/R_{Lim}}$ (Eq. 4) pour le défaut considéré.

Tableau 2. Valeur de l'indice de stabilité $m_{k/R_{Lim}}$ pour un défaut monophasé.

R_{Lim} \ k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	12.65	56.53	50.89	17.69	30.20	11.43	29.24	19.91	35.91	-0.16
10	27.34	78.49	81.96	30.49	53.02	23.04	61.16	36.27	49.72	-0.39
15	37.96	73.47	87.90	35.81	62.14	28.64	72.64	47.62	50.71	-0.65
20	28.98	69.95	87.09	38.87	59.09	32.05	68.20	48.64	46.35	-1.09
25	28.65	68.38	89.36	38.31	57.58	35.26	69.48	50.52	47.91	-1.08
30	26.87	66.95	86.88	38.94	57.03	36.30	69.35	50.46	45.18	-1.24
35	26.18	65.38	82.34	39.76	56.30	38.15	69.24	49.90	42.31	-1.71
40	24.93	64.94	78.54	40.43	55.63	38.08	68.58	49.22	38.88	-1.62
45	24.20	64.11	74.62	40.86	54.67	38.40	67.97	48.63	35.79	-1.78
50	25.28	62.37	67.43	41.01	50.67	39.11	66.86	47.24	35.91	-2.75
55	23.11	62.29	67.66	40.92	52.31	38.68	66.60	47.44	30.03	-2.12
60	20.62	61.42	63.35	42.95	52.82	38.24	66.33	45.60	20.48	-2.03
65	22.20	59.93	61.67	40.24	50.29	38.31	64.82	46.54	25.33	-2.40
70	21.84	58.67	59.10	39.52	49.45	37.65	64.02	46.13	23.24	-2.55
75	22.88	56.08	54.09	38.71	45.79	36.96	62.35	45.01	25.46	-3.43
80	21.24	56.14	54.64	37.76	47.88	36.13	62.52	45.43	19.63	-2.82
85	20.99	54.94	52.74	36.78	47.18	35.32	61.82	45.12	18.08	-2.95
90	21.98	52.55	48.87	35.88	43.62	34.40	60.11	44.02	21.53	-3.76

Nous pouvons remarquer que nous obtenons une valeur maximale de l'indice de stabilité $m_{k/R_{Lim}}$ pour chaque emplacement étudié. Par exemple, si nous considérons une

résistance du limiteur égale à 5Ω ; l'emplacement optimal du limiteur serait L_2 étant donné que nous obtenons l'indice de défaillance maximale pour cette valeur. Si nous effectuons la même analyse pour l'ensemble des valeurs de résistances étudiées, nous obtenons les résultats indiqués en gras dans le tableau 2. Pour chaque valeur de résistance, un emplacement optimal pour le limiteur est associé. Le principal problème dans un réseau est qu'il n'est pas possible de placer un limiteur de courant de court-circuit supraconducteur à chaque endroit ou un défaut peut survenir. Si nous considérons qu'un seul emplacement est possible pour ce type de défaut, l'analyse effectuée nous orienterait vers l'emplacement L_3 avec une résistance R_m égale à 25Ω étant donné que ce sont pour ces paramètres que nous avons un indice de stabilité $m_{3/25}$ maximal. Nous donnons aux figures 3 et 4 la séparation angulaire des générateurs (avec G4 comme référence) lorsqu'un défaut monophasé apparaît à l'emplacement L_3 sans limiteur (figure 3) et avec un limiteur de courant de court-circuit supraconducteur présentant une résistance de 25Ω (figure 4).

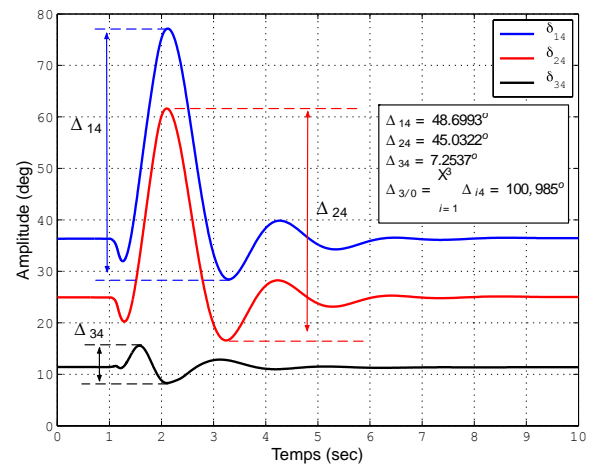


Fig.3: Evolution de $\delta_{i4}(t)$ dans le cas d'un défaut monophasé à l'emplacement L_3 sans limiteur supraconducteur.

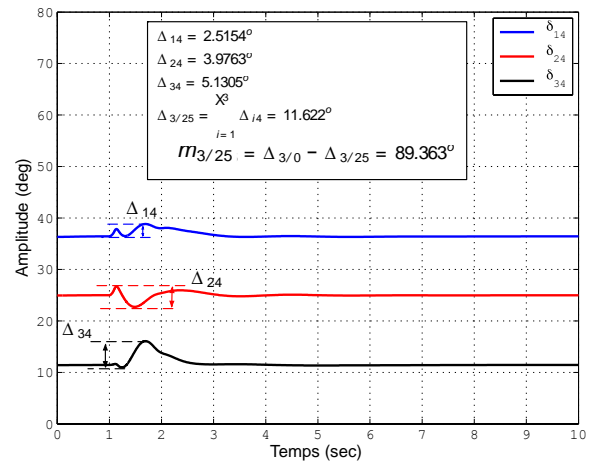


Fig.4: Evolution de $\delta_{i4}(t)$ dans le cas d'un défaut monophasé à l'emplacement L_3 avec un limiteur supraconducteur de 25Ω .

Nous pouvons remarquer que la variation des angles $\delta_{i4}(t)$ est fortement réduite lorsque le limiteur est intégré au réseau indiquant une augmentation significative de la stabilité de l'ensemble du système. La présence du limiteur supraconducteur permet au système de retrouver un point de fonctionnement stable plus rapidement. Sans le limiteur supraconducteur, ce temps est estimé à 8,2 sec alors qu'en présence du limiteur, ce temps est réduit de 3,2 sec.

4.2. Etude pour l'ensemble des défauts

Nous donnons à la figure 5 les résultats obtenus pour l'ensemble des défauts étudiés. Il est nécessaire de préciser que les résultats obtenus pour un défaut triphasé avec terre sont quasi-identiques que ceux obtenus pour un défaut triphasé sans terre. De ce fait, seul les résultats pour un défaut triphasé sans terre seront présentés. Les résultats montrent que pour un type de défaut, nous obtenons un indice de stabilité maximal pour une valeur de résistance du limiteur donnée. Par exemple, pour un court-circuit triphasé sans terre, c'est avec un limiteur de 35 Ω situé à l'emplacement L_4 que nous obtenons le meilleur gain en terme de stabilité transitoire du réseau si un défaut de ce type apparaissait au même endroit. Le couple k/R_{Lim} pour chaque défaut étudié est représenté par un cercle rouge sur la figure 5.

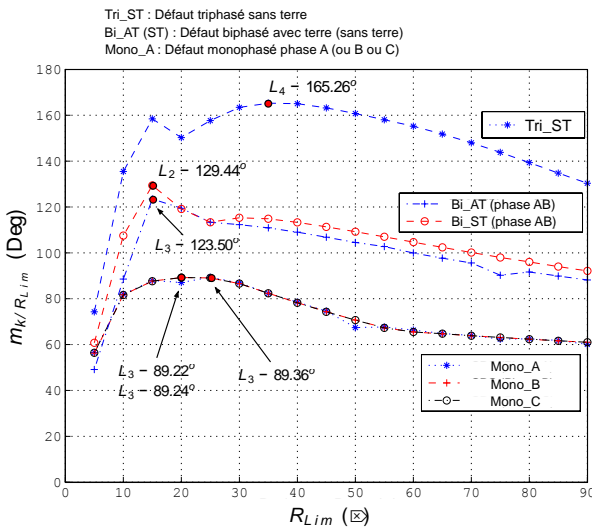


Fig. 5 : Variation de l'indice de défaillance $m_{k/R_{Lim}}$ pour chaque défaut étudié.

Nous résumons au tableau 3 les emplacements optimaux obtenus par la méthode proposée pour chaque type de défaut étudié (nous précisons la valeur de la résistance associée ainsi que la valeur de l'indice $m_{k/R_{Lim}}$). L'analyse de ce tableau montre que plusieurs emplacements pour le limiteur de courant supraconducteur ainsi que plusieurs valeurs de résistance sont possibles (ces deux paramètres étant fonction du type de défaut étudié). Sachant que nous ne pouvons sélectionner qu'un seul emplacement avec une seule valeur de résistance, il serait très simple de limiter le choix de ces deux paramètres au défaut le plus récurrent dans un réseau de distribution d'énergie électrique, à savoir le défaut monophasé (le défaut monophasé représente environ 80% de l'ensemble des défauts survenus sur le réseau français lors de ces 10 dernières années). Partir de ce constat, l'emplacement L_3 avec une résistance du limiteur de

20 Ω ou 25 Ω serait la solution adéquate. Cependant, nous pensons qu'il est nécessaire de prendre en compte l'ensemble des défauts pour sélectionner un emplacement et une valeur de résistance. En effet, si nous partons sur le constat fait précédemment (emplacement L_3 avec une résistance de 20 Ω par exemple), nous obtenons la meilleure stabilité transitoire du réseau dans le cas d'un défaut monophasé (phase B ou C). Cependant, si un défaut de type biphasé avec terre (Bi_AT) apparaît à ce même emplacement avec les paramètres précédemment définis, la stabilité du réseau serait détériorée de 15% par rapport aux paramètres optimaux du défaut Bi_AT, à savoir, l'emplacement L_2 avec une résistance de 15 Ω . En effet, si nous calculons l'indice de stabilité $m_{3/20}$ pour un défaut Bi_AT, nous obtenons 109,3° alors que d'après le tableau 3, ce même indice, calculé avec les paramètres optimaux donne 129,4°.

Tableau 3. Résultats de simulations pour l'ensemble des défauts étudiés.

Défaut	Emplacement optimal	R_{Lim} (Ω)	$m_{k/R_{Lim}}$ (deg)
Mono_A	L_3	25	89,36
Mono_B	L_3	20	89,24
Mono_C	L_3	20	89,22
Bi_ST	L_3	15	123,5
Bi_AT	L_2	15	129,4
Tri_ST/ Tri_AT	L_4	35	165,3

Dans le but de trouver le couple k/R_{Lim} optimal en prenant en compte l'ensemble des défauts étudiés, nous pouvons analyser la variation qu'aurait l'indice de stabilité $m_{k/R_{Lim}}$ si un défaut différent de celui prévu apparaissait dans le réseau à l'emplacement sélectionné. Par exemple, il faut analyser les variations de l'indice $m_{3/20}$ (l'emplacement 3 et une résistance de 20 Ω étant les paramètres optimaux pour un défaut monophasé sur la phase B ou C) si un défaut monophasé phase A, biphasé avec et sans terre ou triphasé apparaissait à l'emplacement 3 avec une résistance du limiteur de 20 Ω . Le tableau 4 nous donne les résultats de cette comparaison. Ce tableau nous renseigne sur la valeur de l'indice $m_{k/R_{Lim}}$ calculé pour chaque couple k/R_{Lim} et pour chaque type de défaut (cette donnée est précisée entre parenthèses) et sur la perte de stabilité, exprimé en %, par rapport à l'utilisation du couple de paramètres optimaux pour le défaut considéré.

Tableau 4. Analyse de l'indice $m_{k/R_{Lim}}$ pour différentes associations k/R_{Lim} .

k/R_{Lim}	Mono Phase A	Mono Phase B	Mono Phase C	Bi_ST	Bi_AT	Tri_AT=Tri_ST	Total
2/15 ($m_{2/15}$)	-17.78 % (73.4718)	-17.89% (73.2752)	-17.74% (73.3892)	-6.20% (115.8394)	0% (129.44)	-32.90% (110.8829)	-92.51%
3/15 ($m_{3/15}$)	-1.64% (87.89)	-1.75% (87.68)	-1.75% (87.65)	0% (123.50)	-6.61% (120.8813)	-4.13% (158.42)	-15.89%
3/20 ($m_{3/20}$)	-2.54% (87.09)	0% (89.24)	0% (89.22)	-3.25% (119.48)	-15.58% (109.2804)	-13.04% (143.7111)	-34.41%
3/25 ($m_{3/25}$)	0% (89.36)	-0.19% (89.07)	-0.20% (89.04)	-8.24% (113.32)	-31.21% (89.0408)	-16.05% (138.7395)	-55.88%
4/35 ($m_{4/35}$)	-55.51% (39.7581)	-55.80% (39.4454)	-55.71% (39.5153)	-35.92% (79.1358)	-25.69% (96.1899)	0% (165.26)	-228.63%

Nous trouvons évidemment des valeurs nulles dans les cases où nous avons un type de défaut et son couple optimal

k/R_{Lim} associés (tableau 3). La colonne appelée « Total » correspond à la somme des variations de l'indice de stabilité $m_{k/R_{Lim}}$ pour le défaut étudié.

Si nous analysons le couple $k/R_{Lim}=2/15$ (couple optimal pour un défaut biphasé avec terre), nous remarquons une perte de stabilité d'environ 17% si un défaut monophasé apparaît à l'emplacement sélectionné. Cette perte de stabilité passe à 6,20% pour un défaut biphasé sans terre et 32,90% pour un défaut triphasé (avec ou sans terre). Si nous prenons en compte l'ensemble des défauts, nous avons une perte de stabilité égale à 92,51% pour le couple 2/15. Dans le cas d'un couple $k/R_{Lim}=3/15$ (couple optimal pour un défaut biphasé sans terre), ce résultat se limite à une valeur de 15,89%. Pour un couple $k/R_{Lim}=3/20$ (couple optimal pour un défaut monophasé phase B et C), nous obtenons une valeur de 34,41%, pour un couple $k/R_{Lim}=3/25$ (défaut monophasé phase A), cette valeur atteint 55,88% et pour un couple $k/R_{Lim}=4/35$ (défaut triphasé), nous atteignons une valeur de 228,63%.

L'analyse de ces résultats nous permet de déterminer quel est le couple optimal k/R_{Lim} pour l'ensemble des défauts étudiés. Dans notre cas, il s'agit du couple $k/R_{Lim}=3/15$ qui présente le meilleur compromis en terme de stabilité si l'un des défauts étudiés apparaissait à l'emplacement sélectionné. En effet, si ce choix est retenu, l'apparition d'un défaut monophasé phase A à cet emplacement n'induirait qu'une perte de stabilité par rapport à son optimum de 1,64%. Cette perte serait de 1,75% dans le cas d'un défaut monophasé phase B et C, de 6,61% pour un défaut biphasé avec terre et de 4,13% dans le cas d'un défaut triphasé avec et sans terre. A partir de ces résultats et pour le réseau étudié, nous pouvons conclure que l'emplacement optimal du limiteur de courant de court-circuit supraconducteur serait L_3 avec une résistance de 15Ω .

5. CONCLUSIONS

Nous proposons une nouvelle méthode de sélection de l'emplacement optimal d'un limiteur de courant de court-circuit supraconducteur (couplée à la sélection de la valeur optimale de sa résistance) basée sur une étude de la stabilité transitoire d'un réseau de puissance. Les résultats ont montré que la présence d'un limiteur de courant supraconducteur permet d'augmenter la stabilité transitoire de l'ensemble du réseau lors de l'apparition d'un défaut de type court-circuit. Les résultats de simulation ont montré qu'en fonction du type de défaut étudié, différents emplacements peuvent être choisis pour le limiteur de courant supraconducteur. La méthode intègre une étude permettant de sélectionner un emplacement unique et une seule valeur de résistance du limiteur de sorte à optimiser la stabilité transitoire du système, tout en prenant en

compte l'ensemble des court-circuits pouvant survenir dans le réseau de distribution (ou de transport). Il est important de noter que la méthode proposée peut intégrer n'importe quel type de limiteur (inductif, résistif, avec électronique de puissance) et être appliquée à tous les types de réseau, qu'ils soient de petite ou de grande taille, sectorisé ou non.

6. REFERENCES

- [1] W. D. Stevenson, Elements of Power System Analysis, Mc Graw Hill International Editions, 1982.
- [2] A. Morandi, State of the art of superconducting fault current limiters and their application to the electric power system, Physica C: Superconductivity 484 (2013) 242–247.
- [3] L. Ye, L. Lin, K.-P. Juengst, Application studies of superconducting fault current limiters in electric power systems, IEEE Transactions on Applied Superconductivity 12 (1) (2002) 900–903. doi:10.1109/TASC.2002.1018545.
- [4] D. Hui, Z. Wang, J. Zhang, D. Zhang, S. Dai, C. Zhao, Z. Zhu, H. Li, Z. Zhang, Y. Guan, L. Xiao, L. Lin, L. Li, L. H. Gong, X. D. Xu, J. Lu, Z. Fang, H. X. Zhang, J. P. Zeng, G. P. Li, S. Z. Zhou, Development and test of 10.5 kv/1.5 ka hts fault current limiter, IEEE Transactions on Applied Superconductivity 16 (2) (2006) 687–690. doi:10.1109/TASC.2006.871209.
- [5] B. C. Sung, D. K. Park, J. W. Park, T. K. Ko, Study on a series resistive SFCL to improve power system transient stability: Modeling, simulation, and experimental verification, IEEE Transactions on Industrial Electronics 56 (7) (2009) 2412–2419.
- [6] C. Gandioli, P. Tixador, G. Mariani, Tests and simulations of different YBCO tapes for FCL, IEEE Transactions on Applied Superconductivity 22 (3) (2012) 5603104–5603104. doi:10.1109/TASC.2011.2178578.
- [7] W. T. B. De Sousa, A. Polasek, F. Silva, R. Dias, A. Jurelo, R. de Andrade, Simulations and tests of MCP-BSCCO-2212 superconducting fault current limiters, IEEE Transactions on Applied Superconductivity 22 (2) (2012) 5600106–5600106. doi:10.1109/TASC.2012.2187189.
- [8] G. T. Son, H.-J. Lee, S.-Y. Lee, J.-W. Park, A study on the direct stability analysis of multi-machine power system with resistive SFCL, IEEE Transactions on Applied Superconductivity 22 (3) (2012) 5602304–5602304. doi:10.1109/TASC.2011.2177626.
- [9] G. Didier, J. Leveque, A. Rezzoug, A novel approach to determine the optimal location of SFCL in electric power grid to improve power system stability, IEEE Transactions on Power Systems 28 (2) (2013) 978–984. doi:10.1109/TPWRS.2012.2224386.
- [10] P. Kundur, Power System Stability and Control, Mc Graw Hill International Editions, 1993.
- [11] B. C. Sung, D. K. Park, J. W. Park, T. K. Ko, Study on a series resistive SFCL to improve power system transient stability: Modeling, simulation, and experimental verification, IEEE Transactions on Industrial Electronics 56 (7) (2009) 2412–2419.
- [12] P. Kundur, Power System Stability and Control, Mc Graw Hill International Editions, 1993.