SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

GSE - 34
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

GRUPO VIII
GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÈTRICOS - GSE

PROJETO E APLICAÇÃO DE LIMITADORES DE CORRENTE ELÉTRICA SUPERCONDUTORES RESISTIVOS

Rafael Cassiolato de Freitas*
Ernesto Ruppert Filho
FEEC/ UNICAMP

Roberto Petry Homrich
DEE / UFRGS

Carlos Alberto Baldan
Carlos Yugiro Shigue
Daltro Garcia Pinatti
DEMAR/ FAENQUIL

RESUMO

Este artigo apresenta a tecnologia, projeto, construção e resultados de ensaio em c.a. que demonstram a aplicação de um limitador de corrente elétrica supercondutor resistivo no auxílio à proteção contra curto-circuitos em sistemas de energia elétrica. Dois diferentes tipos de limitadores de corrente elétrica supercondutores resistivos são apresentados: o primeiro é construído com três bobinas cilíndricas, helicoidais e concêntricas conectadas em paralelo e o segundo é construído com duas bobinas cilíndricas, helicoidais, concêntricas e conectadas em série e com polaridades magnéticas opostas. As bobinas dos dois limitadores são enroladas em tubos de fibra de vidro e usam fio supercondutor tipo C de matriz CuNi para aplicações em c.a.. A montagem final do conjunto é imersa em um criostato contendo Hélio líquido a 4K. O material supercondutor deste fio é formado por uma liga de NbTi.

PALAVRAS-CHAVE

Limitadores de Corrente, Supercondutores, Proteção Elétrica, Cálculo Eletromagnético.

1.0 - INTRODUÇÃO

A contínua expansão dos sistemas de energia elétrica tem procurado atender adequadamente ao aumento da demanda dos modernos parques industriais e ao crescimento dos grandes centros urbanos com a construção de novas unidades geradoras e ampliação das linhas de transmissão, construção de novas subestações e repotenciação das já existentes, aumento da interligação entre ramais e instalação de novas unidades de geração distribuída.
Toda essa nova configuração do sistema de energia elétrica leva a um aumento significativo dos níveis de curto-circuito ao longo do sistema podendo, em muitos casos, exceder a capacidade dos dispositivos de proteção contra correntes em situações como de sobrecorrentes e curtos-circuitos, sujeitando as instalações e demais componentes a esforços eletromecânicos excessivos.
A substituição de todas proteções e chaves contra correntes de curto-circuito não se apresenta como a solução mais viável do ponto de vista econômico na maioria dos casos. Uma solução para este problema é a instalação de limitadores de corrente que, na ocorrência de um curto-circuito no sistema elétrico, atuam rapidamente limitando a corrente elétrica a níveis suportados pelos demais componentes elétricos do sistema já instalados, evitando assim que seja necessária a sua substituição.
Dentre as diversas técnicas e dispositivos propostos para resolver o problema da limitação de corrente, aquele que apresenta as características mais próximas do dispositivo ideal é o limitador de corrente elétrica supercondutor resistivo (LCSR), capaz de limitar a corrente elétrica de forma muito rápida e segura a níveis suportados por chaves sub-dimensionadas para aquele sistema [1] sem interferir na regulação de tensão durante sua operação sob condições normais.

*Cidade Universitária Zeferino Vaz, s/n - Caixa Postal 6101 – CEP 13083-970 – Campinas – SP - Brasil
Tel.: (019) 3788-3744 - Fax: (019) 3289-1395 - e-mail: rafael@dsce.fee.unicamp.br

Quando ocorre um aumento na intensidade da corrente elétrica devido a um curto-circuito, o material supercondutor existente na parte interna do fio transita do estado supercondutor em que possui resistência praticamente nula para o estado normal de condução, fenômeno denominado “quench”, em um espaço de tempo da ordem de 1 ms o que representa 1/16 de um ciclo de corrente alternada a 60Hz. Quando ocorre esta transição, a corrente elétrica passa a ser conduzida pela da matriz metálica de alta resistividade que reveste o fio supercondutor o que equivale a introduzir uma resistência elétrica em série no sistema, aumentando sua impedância e limitando a corrente elétrica a um valor pré-determinado.
Vários artigos relatam os desenvolvimentos neste tipo de equipamento e suas potenciais aplicações em um sistema de energia elétrica, entre eles [2] e [3] podem ser citados. Este artigo apresenta a tecnologia de LCSR utilizando material supercondutor de baixa temperatura de transição (LTS), bem como a metodologia de projeto para o correto dimensionamento do dispositivo LCSR de acordo com o sistema elétrico no qual se deseja limitar a corrente durante a ocorrência de um curto-circuito. É também apresentada a construção e ensaios de dois tipos de LCSR monofásicos utilizando o fio de NbTi tipo C da Alstom, refrigerado a 4k com Hélio líquido, cujas características de transporte de corrente elétrica c.c. e c.a. sob densidade de campo magnético são apresentadas na Figura 1.

2.0 - PROJETO ELEROMAGNÉTICO DO LCSR

Para cada valor de corrente elétrica existe um valor correspondente de densidade de campo magnético na superfície do fio supercondutor a 4K para o qual ocorre a transição do estado supercondutor para o estado condutor. O LCSR é projetado de forma que o “quench” ocorra somente a um valor limite de corrente que se deseja e que seja seguro para o sistema elétrico. Este valor limite de corrente é usado para definir o valor da resistência elétrica que o LCSR deverá apresentar no estado normal de condução, e será aqui denominada resistência elétrica do LCSR.

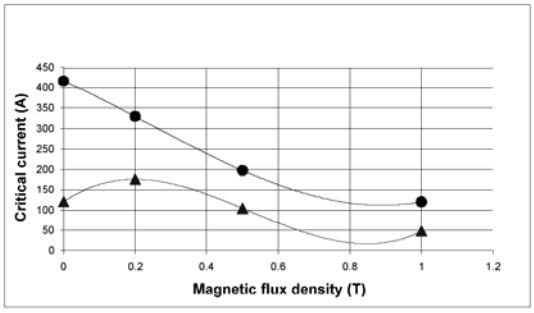


FIGURA 1 - Característica c.c. (●) e c.a. (60 Hz) (▲) do fio tipo C da Alstom.

O comprimento de fio supercondutor a ser utilizado é calculado a partir da resistência elétrica do LCSR necessária para limitar a corrente a um dado valor de projeto. O fio é enrolado sobre tubos de fibra de vidro formando bobinas que podem ser conectadas em série e/ou paralelo.
O número de bobinas que compõem o LCSR depende da sua corrente nominal de operação, isto é, a corrente que normalmente circula no dispositivo quando este se encontra no estado supercondutor. Esta corrente, se necessário, deve ser dividida entre diferentes bobinas ligadas em paralelo, a fim de impedir a ocorrência do quench no LCSR quando submetido a uma densidade de fluxo produzida pela corrente normal de operação que passa por cada uma delas. O número de bobinas e o número de espiras por bobina bem como o diâmetro das bobinas e sua altura também devem ser projetadas de forma que as indutâncias próprias e mútuas entre elas sejam minimizadas. Ao se projetar o LCSR é necessário ter em mente que o criostato deve ser adequado para resfriar toda parte ativa do LCSR. Obtidos todos estes parâmetros mencionados (número de bobinas, número de espiras por bobina, diâmetro e altura das bobinas e a resistência elétrica a ser introduzida no circuito), é necessário então calcular a densidade de fluxo magnético B na superfície do fio situado na altura média em cada uma das bobinas. Na Figura 2 é mostrado em detalhe, para a bobina 1, os pontos onde ocorre o máximo valor de densidade de fluxo magnético para o qual o fio supercondutor entra em quench ao se atingir a corrente que se desejada limitar. O mesmo princípio vale para as demais bobinas.

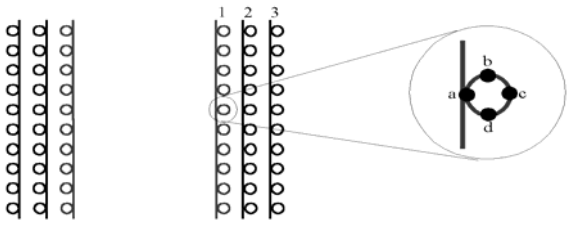
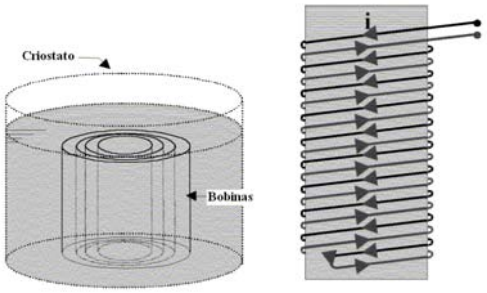


FIGURA 2 - Pontos da espira média da bobina 1 onde o vetor B é calculado.

O valor de B é calculado em quatro pontos em torno do fio supercondutor e o maior valor é escolhido como o valor de B em sua superfície. É também necessário calcular a indutância própria de cada bobina e as indutâncias mútuas entre elas de forma que a indutância equivalente do LCSR seja minimizada.
Será abordado na seção 6 deste artigo, um método matemático desenvolvido, baseado na Lei de Biot-Savart, para o cálculo da densidade de fluxo magnético na superfície do fio supercondutor, para determinar se a um dado estado de excitação em uma das bobinas do LSCR (corrente elétrica na bobina), esta irá permanecer no estado supercondutor ou irá transitar para o estado normal de condução.
Será mostrado também a partir da Lei de Biot-Savart, como calcular as indutâncias próprias das bobinas e as indutâncias mútuas entre elas.
As perdas em c.a. do LSCR bem como o consumo de hélio do sistema são calculados através das equações apresentadas em [4].

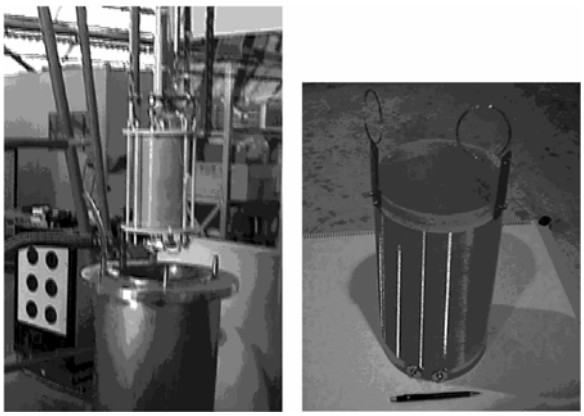
3.0 - PROJETO E CONSTRUÇÃO DO LCSR

Após vários cálculos iterativos no dimensionamento das bobinas, o LCSR é projetado. Neste ponto são conhecidos: o número de bobinas (N_c), o número de espiras por bobinas (N_1, N_2, N_3...), os diâmetros das bobinas (D_1,D_2,D_3,...), as alturas das bobinas (h_1,h_2,h_3,...), os passos entre as espiras de cada bobina (d_1,d_2,d_3,...), os valores minimizados das indutâncias próprias e mútuas das bobinas do LSCR e também o valor da densidade de fluxo magnético na superfície do fio que irá provocar a ocorrência do quench na exata corrente para a qual o LSCR foi projetado para atuar. O LSCR é formado por N_c bobinas cilíndricas enroladas em tubos de tecido de fibra de vidro impregnados com resina epóxi (NEMA G-10). Dois diferentes tipos de LCSR monofásicos foram projetados, construídos e ensaiados neste trabalho: O primeiro, denominado tipo W, cuja parte ativa é composta por 3 bobinas cilíndricas concêntricas, com uma camada de fio cada, enrolado em 3 tubos de G-10 e conectadas eletricamente em paralelo (Figura 3a); o segundo, denominado tipo O, é composto por duas bobinas cilíndricas, helicoidais, concêntricas deslocadas axialmente, com uma camada de fio cada, enroladas sobre um único tubo de G-10 e conectadas eletricamente em série com polaridades magnéticas opostas (Figura 3b) e cujos dados de projeto são apresentados nas Tabelas I e II. É preciso ter um cuidado especial com relação aos níveis de tensão presentes no LCSR para evitar descargas elétricas entre as bobinas ou entre as bobinas e o criostato. As forças mecânicas exercidas pelas bobinas contra o suporte dos flanges do criostato devem ser calculadas para um correto dimensionamento das mesmas. As Figuras 4(a) e 4(b) mostram o aspecto final dos LCSR construídos.



(a) (b)

FIGURA 3 - Diagrama esquemáticos dos limitadores construídos: (a) Tipo W e (b) Tipo O.



(a) (b)

FIGURA 4 - LCSR construídos: (a) Tipo W e (b) e Tipo O.

4.0 - SIMULAÇÃO MATEMÁTICA DINÂMICA DA OPERAÇÃO DO LCSR

Para aperfeiçoar o projeto eletromagnético do limitador é necessário realizar uma simulação dinâmica do funcionamento do LCSR. A Figura 5 apresenta o diagrama esquemático de um LCSR de 3 bobinas ligadas em paralelo. Este sistema elétrico pode ser estendido para um limitador de N_c bobinas e a equação (1) pode ser escrita para cada bobina:

$$\mathbf{v} = r\mathbf{i} + L\frac{d}{dt}\mathbf{i} \tag{1}$$

Na equação (1), **v** é a tensão entre os terminais do LCSR, ***r*** é a matriz diagonal das resistências elétricas das bobinas, **L** é a matriz de indutâncias próprias e mútuas das bobinas e $p_1, p_2, \ldots p_n$ são as polaridades magnéticas (-1) ou (+1) de cada bobina, como visto em (2). O cálculo iterativo que utiliza a curva característica em c.a. do fio (Figura 1) para verificar a ocorrência do quench em qualquer uma das bobinas a cada passo de integração da equação diferencial (1), pode ser descrito pelo seguinte algoritmo:

1. Entrada de dados: vetor de tensão **v**, matriz de resistência das bobinas **r**, matriz de indutância das bobinas **L**, corrente inicial i_0, tempo inicial t_0, tempo final t_f e instante de ocorrência do curto-circuito;
2. Início da rotina de resolução numérica da equação diferencial (1) pelo método de Runge-Kutta de 4ª ordem;
3. Cálculo de i(t) no instante i(t+Δt);
4. Cálculo da densidade de fluxo magnético B no LCSR nos pontos mostrados na Figura 2 usando i(t) obtida no passo 3;
5. Verificação na curva da Figura 1 se $|i(t)|>i_c(B)$ onde $i_c(B)$ é a corrente crítica para o valor de B calculado no passo 4;
6. Se não ocorrer a condição do passo 5, a resistência das bobinas permanece igual a zero e retorna-se para o passo 3 verificando também se foi atingido o instante programado para o curto-circuito ou se o tempo final de simulação foi alcançado, se ocorrer a condição do passo 5 a resistência do fio das bobinas é inserida no circuito e retorna-se para o passo 3 ("quench"). Após a ocorrência do curto-circuito, a topologia elétrica do circuito utilizado na simulação é alterada e o processo continua do passo 3.

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix}_{(n\times 1)} \quad \mathbf{i} = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix}_{(n\times 1)} \quad \mathbf{r} = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & r_2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & r_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & r_n \end{bmatrix}_{(n\times n)} \quad \mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_1 & L_{12}p_1p_2 & L_{13}p_1p_3 & \cdots & L_{1n}p_1p_n \\ L_{12}p_1p_2 & L_2 & L_{23}p_2p_3 & \cdots & L_{2n}p_2p_n \\ L_{13}p_1p_3 & L_{23}p_2p_3 & L_3 & \cdots & L_{3n}p_3p_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{1n}p_1p_n & L_{2n}p_2p_n & L_{3n}p_3p_n & \cdots & L_n \end{bmatrix}_{(n\times n)} \tag{2}$$

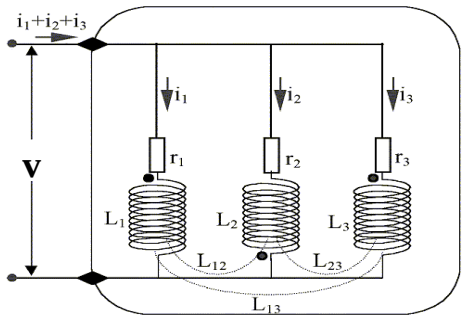


FIGURA 5 - Circuito elétrico equivalente de um limitador de 3 bobinas em paralelo.

5.0 - ENSAIOS EM CORRENTE ALTERNADA

Na etapa em que foram realizados os ensaios em c.a. com o LCSR, foi utilizado um grupo gerador de 88kVA, 380V, 60Hz nominais alimentando uma carga resistiva trifásica. Foi então feito um curto-circuito entre fases sem o LCSR tal que o pico de corrente assimétrico em uma das fases atingiu 1.200 A como visto na Figura 6. Realizando o mesmo ensaio agora com o LCSR tipo W, conectado em série com uma das fases, a corrente foi limitada quando esta atingiu 400 A, como visto na Figura 7 e com o LCSR tipo O a corrente foi limitada quando esta atingiu 170 A, como visto na Figura 8. Estes resultados experimentais estão em completo acordo com os valores de corrente de transição previstos em simulação e mostrados nas Tabelas 1 e 2, respectivamente, onde se pode

ver que a corrente, no caso do LCSR do tipo W, foi limitada a 434 A e a corrente, no caso do LCSR do tipo O, foi limitada a 176 A. O erro em ambos casos é menor do que 10%.

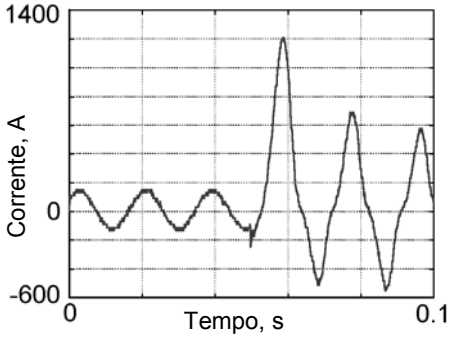


FIGURA 6 - Corrente de curto-circuito a ser limitada no ensaio em c.a.

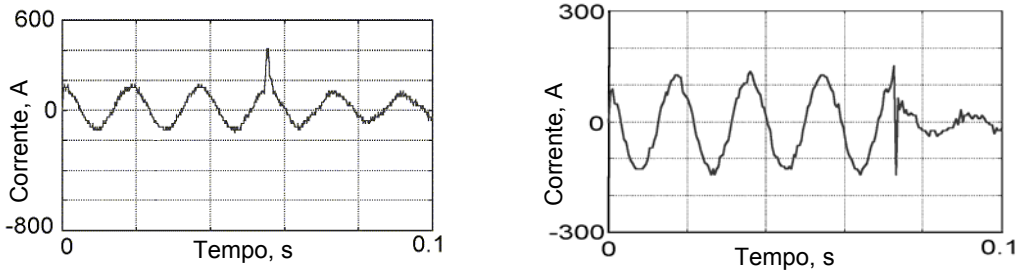


FIGURA 7 – (a) Corrente de curto-circuito limitada pelo LCSR Tipo W.
(b) Corrente de curto-circuito limitada pelo LCSR Tipo O.

Tabela 1. Dados do LCSR Tipo W

BOBINA	a	b	c
Número de espiras	86	74	66
Raio interno (mm)	67	77,5	87,5
Altura da Bobina (mm)	258	111	264
Comprimento do fio (mm)	36,3	36,1	36,3
Passo da hélice (mm/espira)	3	1,5	4
Indutância própria (mH)	0,42	0,73	0,40
Indutância mútua(mH) ab/bc/ca	0,38	0,29	0,37
Indutância equivalente (μH)	63,0		
Resistência a 4K (Ω)	28,3	28,2	28,4
Resistência equivalente (Ω)	9,43		
Sequência de transição	3	2	1
Polaridade das bobinas	+1	-1	+1
Corrente de transição (A)		434	
Perdas a 60Hz/ 270A		2,8	
Volume de Helio evaporado(l/h)		4,0	

Tabela 2. Dados do LCSR Tipo O

BOBINA	a	b
Número de espiras	86	86
Raio interno (mm)	87,5	87,5
Altura da Bobina (mm)	260	260
Comprimento do fio (mm)	47,42	47,42
Passo da hélice (mm/espira)	3,0	3,0
Indutância própria (mH)	0,68	0,68
Indutância mútua(mH)- ab	0,66	
Indutância equivalente (μH)	37,97	
Resistência a 4K (Ω)	36,98	36,98
Resistência equivalente (Ω)	73,97	
Polaridade das bobinas	+1	-1
Corrente de transição (A)	176	176
Perdas a 60Hz/ 272A	2,5	
Volume de Helio evaporado(l/h)	3,6	

6.0 - MÉTODO PARA O CÁLCULO DO VETOR B

O método utilizado para o cálculo do vetor B na superfície do fio supercondutor, apresentado em [5], baseia-se na lei de Biot-Savart, ilustrada na Figura 8 e representada na forma sua forma vetorial em (3).

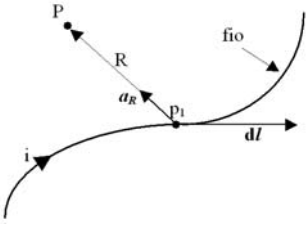


FIGURA 8 - Ilustração da Lei de Biot-Savart para o cálculo do vetor densidade de fluxo magnético em um ponto P.

$$d\boldsymbol{B}_p = \frac{\mu_0 \, \mathrm{I} d\boldsymbol{l} \times \boldsymbol{a}_R}{4\pi \left|\mathrm{R}\right|^2} \tag{3}$$

Neste método de cálculo, a bobina possui forma geométrica helicoidal e suas espiras descrevem uma trajetória em forma de hélice. Considera-se que: (a) existe espaçamento entre espiras, (b) a altura da bobina não é necessariamente maior do que seu raio, (c) a densidade de fluxo magnético não é uniforme ao longo do eixo axial da bobina nem ao longo de sua seção transversal.
A Figura 9 mostra o formato de uma bobina helicoidal percorrida por uma corrente elétrica i. O vetor densidade de fluxo magnético B pode ser calculado em um ponto P qualquer do espaço e fora do condutor, desde que a forma geométrica que o condutor descreve possa ser descrita de forma matemática. As coordenadas do ponto P_1 (sobre o fio) são definidas no sistema cartesiano de coordenadas de acordo com a geometria do problema.
Este método, que considera toda a geometria helicoidal da bobina, é bastante preciso porém quando implementado numericamente em software, demanda um esforço computacional bastante alto e conseqüentemente é muito lento.

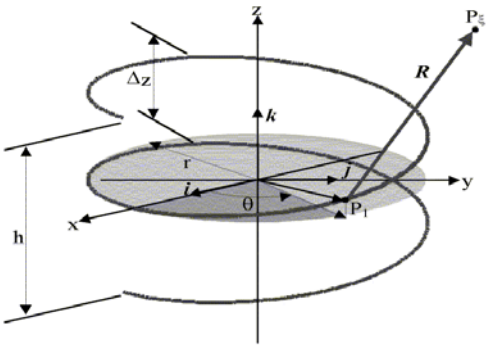


FIGURA 9 - Bobina com formato helicoidal.

Considerando a existência de espaço entre as espiras e que estas são praticamente paralelas entre si, um método alternativo para simplificar a geometria do problema pode ser proposto aproximando a bobina helicoidal por outra composta de espiras planas, fechadas, circulares e espaçadas uniformemente umas das outras transportando cada uma delas a mesma corrente i [6].
No modelamento matemático, toma-se cada espira posicionada na altura média entre duas espiras sucessivas da bobina helicoidal e, aplicando-se a lei de Biot-Savart a uma espira circular plana, o vetor B pode ser calculado a qualquer distância R a partir da espira percorrida pela corrente elétrica i e através do cálculo da integral da equação (3) ao longo da curva descrita pela espira plana, como pode ser visto na Figura 10.

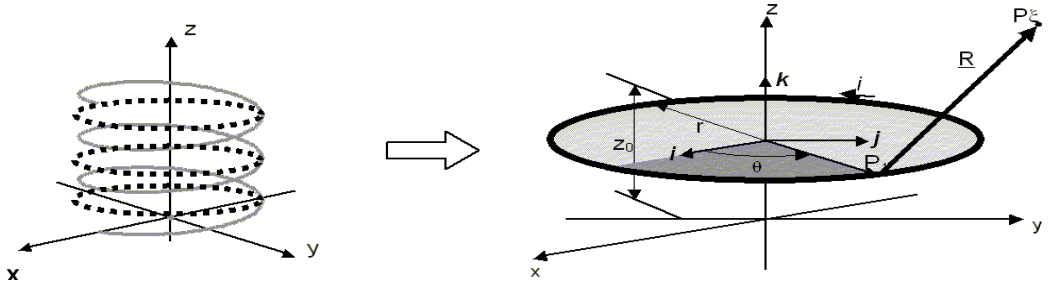


FIGURA 10 - Espiras planas na posição média entre as espiras helicoidais e
Lei de Biot-Savart aplicada a uma espira plana circular.

Utilizando o sistema cartesiano de coordenadas, o vetor B pode ser determinado, em qualquer ponto do espaço, pelas suas componentes B_x, B_y e B_z como desenvolvido nas equações de (4) a (9).

$$d\vec{l} = r d\theta \vec{a}_\theta \tag{4}$$

$$\vec{a}_\theta = -\mathrm{sen}\,\theta \mathrm{i} + \cos\theta \mathrm{j}$$

$$d\vec{l} = (-r\,\mathrm{sen}\,\theta \mathrm{i} + r\cos\theta \mathrm{j}) d\theta \tag{5}$$

$$\vec{R} = (x_\xi - r\cos\theta)\mathbf{i} + (y_\xi - r\,\mathrm{sen}\,\theta)\mathbf{j} + (z_\xi - z_0)\mathbf{k} \tag{6}$$

$$\frac{\vec{a}_R}{\left|\vec{R}\right|^2} = \frac{(x_\xi - r\cos\theta)\mathbf{i} + (y_\xi - r\,\mathrm{sen}\,\theta)\mathbf{j} + (z_\xi - z_0)\mathbf{k}}{\left[x_\xi^{\,2} + y_\xi^{\,2} + r^2 - 2r(x_\xi\cos\theta + y_\xi\,\mathrm{sen}\,\theta) + (z_\xi - z_0)^2\right]^{3/2}} \tag{7}$$

$$B(x,y,z) = B_x\,i + B_y\,j + B_z\,k \tag{8}$$

$$B_x = \frac{\mu_0 i}{4\pi}\int_0^{2\pi} \frac{r\cos\theta\,(z_\xi - z_o)}{\left[x_\xi^{\,2} + y_\xi^{\,2} + r^2 - 2r(x_\xi\cos\theta + y_\xi\,\mathrm{sen}\,\theta) + (z_\xi - z_o)^2\right]^{3/2}} d\theta$$

$$B_y = \frac{\mu_0 i}{4\pi}\int_0^{2\pi} \frac{r\,\mathrm{sen}\,\theta\,(z_\xi - z_o)}{\left[x_\xi^{\,2} + y_\xi^{\,2} + r^2 - 2r(x_\xi\cos\theta + y_\xi\,\mathrm{sen}\,\theta) + (z_\xi - z_o)^2\right]^{3/2}} d\theta \tag{9}$$

$$B_z = \frac{\mu_0 i}{4\pi}\int_0^{2\pi} \frac{r^2 - r(x_\xi\cos\theta + y_\xi\,\mathrm{sen}\,\theta)}{\left[x_\xi^{\,2} + y_\xi^{\,2} + r^2 - 2r(x_\xi\cos\theta + y_\xi\,\mathrm{sen}\,\theta) + (z_\xi - z_o)^2\right]^{3/2}} d\theta$$

O valor de B acima é utilizado para se determinar as indutâncias próprias entre as bobinas do LCSR e as mútuas entre elas. Como as bobinas possuem núcleo não ferromagnético, o sistema pode ser considerado magneticamente linear e as indutâncias podem ser calculadas através da equação (10). Nesta equação, λ representa o fluxo magnético concatenado entre uma espira percorrida pela corrente i e outra espira qualquer da mesma bobina (para o cálculo de indutância própria) ou de outra bobina (para o cálculo de indutância mútua).

$$\mathrm{L} = \frac{\lambda}{i} \tag{10}$$

O fluxo magnético concatenado por cada espira pode ser calculado pela equação (11). Nesta equação o vetor B é calculado considerando a corrente elétrica apropriada como descrito no parágrafo anterior e o vetor d*A* representa o elemento vetorial de área da superfície da espira em que se calcula o fluxo magnético.

$$\phi = \int_A B_z\,dA \tag{11}$$

A integral de superfície (11) pode ser calculada numericamente dividindo-se a área da superfície de cada espira circular plana em m anéis concêntricos como mostra a Figura 11. O fluxo magnético que concatena cada anel é aproximado pela equação (12) e a área de cada anel A_T é dada pela equação (13). A precisão deste cálculo pode ser incrementada até o grau desejado com o aumento do número m de anéis.

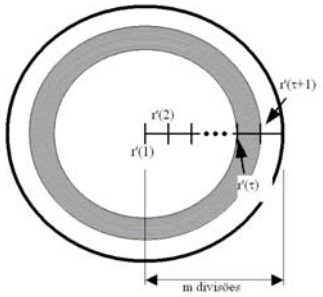


FIGURA11 - Discretização do raio da espira.

$$\overline{\phi(\tau)} = \frac{B_z(\tau) + B_z(\tau+1)}{2} \cdot A_\tau \tag{12}$$

$$A_\tau = \pi\left[r'^2(\tau+1) - r'^2(\tau)\right] \tag{13}$$

O fluxo magnético total concatenando a espira k da bobina é dado pela equação (14) e o fluxo concatenado com a bobina com N espiras é dado (15).

$$\varphi_k = \sum_{\tau=1}^{m} \overline{\varphi(\tau)} \tag{14}$$

$$\lambda = \sum_{k=1}^{N} \phi_k \tag{15}$$

Este método simplificado de cálculo do vetor B permite maior velocidade no processamento quando implementado em software garantindo ainda boa precisão nos resultados.

7.0 - CONCLUSÃO

Neste artigo foi apresentada uma metodologia para o projeto e construção de um LCSR monofásico. Os resultados dos ensaios realizados mostram que o procedimento de projeto apresentado se mostra bastante adequado e incentiva os autores a projetar e construir um LCSR utilizando agora materiais supercondutores cerâmicos de alta temperatura, que utilizam nitrogênio líquido (77 K) como fluido criogênico, que é mais barato e de fácil utilização.

Os limitadores supercondutores resistivos são mais indicados para aplicação em sistemas de energia elétrica por não introduzirem elementos indutivos ou capacitivos no sistema, diminuindo a complexidade da operação e do despacho e evitando a necessidade de compensadores.

O cálculo das indutâncias, parte importante do dimensionamento do LCSR, poderia também ter sido feito utilizando as fórmulas de Neumann ou a de Maxwell ou ainda a de Graneau [7] que são fórmulas de energia. Porém, como durante o projeto do LCSR já seria necessário o cálculo do vetor B em diversos pontos das bobinas, o método de cálculo apresentado neste artigo foi preferido por reduzir o esforço computacional necessário no projeto.

Os autores agradecem à FAPESP e à CPFL pelo apoio financeiro às pesquisas até aqui realizadas nessa área.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Wu, Y. and Yin, Y., “Fault-Current Limiter Applications in Medium and High- Voltage Power Distribution Systems,.” IEEE Trans. On Industry Applications, vol. 34, pp. 236-242, Jan/Feb. 1998.

[2] Noe, M., Oswald, B. R., “Technical and Economical Benefits of Superconducting Fault Curent Limiters in Power Systems” , American Superconductor Conference - ASC98, Palm Desert, USA, 1998.

[3] Teklletsadik, K. and Saravolac, M. P., “Development of a 7.5 MVA Superconducting Fault Current Limiter,” IEEE Trans. On Applied Superconductivity, vol. 9, no. 2, Jun. 1999..

[4] Wilson, M. N., “Superconductor Magnets”, Claredon Press Oxford, 1983.

[5] Homrich, R. P. Ruppert Filho, E. and Pinatti, D. G., “Helicoidal Single-Layer Cylindrical Coil Self-Inductance Evaluation: A Didactic Method,” IEEE Trans. On Education vol. 44, no. 2, May 2001.

[6] Baldan, C. A., Freitas, R. C., Homrich, R. P., Pinatti, D. G., Ruppert Filho, E. and Shigue,C. Y., “Fast Single Layer Cylindrical and Helicoidal Coil with Voids Between Successive Turns Electromagnetic Field Calculation to be used in Superconductor Current Limiter Simulator for Design Purpose”, IEEE Trans. On Applied Superconductivity, vol. 14, no. 2, Jun 2004.

[7] M. Bueno, A. K. T. Martins, “Equivalence between the formulas for inductance calculation” , Can. J. Phys. vol 75, pp. 357-362, 1997.