



GSE/005

21 a 26 de Outubro de 2001
Campinas - São Paulo - Brasil

GRUPO VIII SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS (GSE)

APLICAÇÃO DE NOVAS TÉCNICAS DE LIMITAÇÃO DE CURTO-CIRCUITO FACE À CONEXÃO DE PRODUTORES INDEPENDENTES À REDE BÁSICA SOB O NOVO AMBIENTE DESREGULAMENTADO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

Jorge Amon Filho (*)
FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A

Karl-Heinz Hartung
ABB CALOR EMAG MITTELSPANNUNG GMBH

RESUMO

Seguindo a tendência de outros países, o setor elétrico brasileiro está em transição, onde geração fica separada da transmissão primária, tornando a limitação dos níveis de curto-circuito um assunto de grande importância. A conexão de produtores independentes à rede básica causando um aumento significativo dos níveis curto-circuito exigirá cada vez mais o conhecimento de técnicas de limitação a serem aplicadas à rede existente, a qual não pode esperar mais por soluções estudadas a longo prazo. Este assunto tem causado tanta preocupação no setor elétrico brasileiro que agentes como CCPE e ONS estão se mobilizando para estudar soluções para o problema.

PALAVRAS-CHAVE

Conexão - produtores independentes - técnicas - limitação - curto-circuito.

1.0 - INTRODUÇÃO

A conexão de produtores independentes à rede básica causando um aumento significativo dos níveis curto-circuito não previsto anteriormente em estudos de planejamento a longo prazo exigirá cada vez mais o conhecimento de técnicas de limitação de curto-circuito a serem aplicadas à rede existente, tanto para níveis de AT quanto de MT/ BT.

Existem várias usinas térmicas previstas para serem instaladas no Brasil durante os próximos anos, algumas delas no Estado do Rio de Janeiro, sendo a primeira em 2002, causando fortes impactos no sistema de transmissão de FURNAS. Para este primeiro caso, tendo em vista que a solução **de reator limitador de corrente de núcleo de ar (RLC)**

pareceu, em princípio, não se aplicar, estudos de sistemas preliminares propuseram dividir os barramentos de 138 kV de ambas as subestações, de FURNAS e da usina térmica, mas esta prática está longe da solução ideal pois reduz a confiabilidade das subestações.

Considerando que a rede existente não pode esperar mais por soluções estudadas a longo prazo, este assunto tem causado tanta preocupação no setor elétrico brasileiro que os agentes oficiais como CCPE (Comitê Coordenador do Planejamento Expansão do Sistema Elétrico) e ONS (Operador Nacional do Sistema) estão criando grupos de trabalho especiais para estudar e apresentar solução imediata para o problema.

As soluções mais comuns para altos níveis de curto-circuito são: recapacitação das subestações e dos equipamentos; radialização da rede; introdução de conexões de tensões mais altas (CA ou CC); utilização de transformadores de impedância mais alta e de reatores de série de núcleo de ar; adoção de estratégias complexas de chaveamento seqüencial. Não obstante estas alternativas podem criar outros problemas como redução da segurança e da confiabilidade, custos elevados e aumento das perdas na rede.

Até agora, a solução adotada no Brasil foi o uso do **RLC** em série com o circuito de alimentação para níveis de tensão de 362 kV, 145 kV e 15 kV (1), (2), (3), (4) e (5). Os fatores que orientam o dimensionamento do RLC que poderiam até mesmo tornar a aplicação do RLC inviável são a queda de tensão, as perdas por efeito joule e os elevados fluxos magnéticos (demandam maiores afastamentos). Por outro lado, apesar destas desvantagens tais efeitos

(*) Rua Real Grandeza, 219 s/ 1607.3 Bl. C – Rio de Janeiro – R.J. – CEP 22283-900 - Brasil
Tel: (55 21) 528-4903 – FAX: (55 21) 528-4857 E-mail: jorgamon@furnas.gov.br

poderiam ser compensados economicamente ao se evitar a substituição de equipamento.

Soluções alternativas, incluindo tanto dispositivos supercondutores quanto não supercondutores, estão sendo desenvolvidas por fabricantes de equipamento.

Quatro artigos apresentados na 38ª Sessão Bienal da CIGRÉ 2000 - Paris (6), (7), (8) e (9) discutiram princípios diferentes para prover limitação de correntes de curto-circuito e as possibilidades para adequar o projeto à aplicação específica e o WG 13.10 da CIGRÉ Internacional está encarregado de desenvolver uma especificação funcional de um dispositivo de manobra limitador de corrente de curto-circuito.

Os **dispositivos limitadores de correntes (DLC's)** podem ser divididos em duas categorias principais: supercondutores e não supercondutores.

As pesquisas em DLC's baseados em materiais supercondutores progrediram nos últimos anos no sentido de torná-los tecnicamente eficientes e economicamente atrativos.

Os DLC's não supercondutores compreendem os reatores série convencionais (manobráveis ou não), dispositivos eletrônicos de potência com reatores de série convencionais ou uma combinação de capacitores e reatores, dispositivos pirotécnicos etc

O presente artigo cita os dispositivos baseados em materiais supercondutores ora em fase de desenvolvimento e analisa o dispositivo pirotécnico da ABB conhecido como Limitador-Is, em termos de seu princípio de operação, impactos causados no sistema de transmissão, vantagens e desvantagens e custos.

São também apresentados exemplos de aplicações comerciais do Limitador-Is como solução alternativa principalmente quando a aplicação do RLC não é viável.

2.0 - TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS E EM FASE DE DESENVOLVIMENTO PARA A LIMITAÇÃO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO

Além dos RLC's já utilizados no Brasil, as seguintes tecnologias para os DLC's encontram-se disponíveis ou em fase de desenvolvimento.

2.1 DLC supercondutor

Dentre as idéias inovadoras que a supercondutividade a altas temperaturas produziu estão os DLC's supercondutores, ainda em fase de desenvolvimento. Estes equipamentos limitam a corrente de curto-circuito pela mudança do estado de supercondutividade para o de condutividade normal bem antes que seu primeiro valor de crista seja alcançado.

Basicamente existem três opções técnicas para o conceito de DLC supercondutor, também conhecido como supercondutor de alta-temperatura: o resistivo, o indutivo e o híbrido.

2.1.1 Tipo resistivo (7)

O DLC supercondutor resistivo é montado em série diretamente com o circuito a ser protegido (ligado eletricamente).

Seu princípio de funcionamento se baseia na variação rápida de resistência com a temperatura.

Quando uma certa densidade de corrente é alcançada, correspondendo a uma certa temperatura, a resistência aumenta rapidamente, de forma que, em alguns microssegundos, a corrente de falta é consideravelmente limitada.

Se estiver conectado ao circuito sob falta, a temperatura no material aumentará com o aumento da corrente de curto-circuito, fazendo com que a corrente de curto-circuito seja extinta antes que seu primeiro valor de crista seja alcançado. Tempos inferiores a 1ms podem ser alcançados entre ocorrência da falta e sua extinção.

Para prevenir seu aquecimento excessivo, evitando assim que o tempo necessário para o seu resfriamento seja longo, a corrente de falta é conduzida durante somente alguns poucos ciclos.

Em seguida, é desconectado por um dispositivo de manobra ligado em série, para o resfriamento, voltando a ser inserido novamente, à temperatura normal de operação, no seu estado de supercondutividade original.

Na FIGURA 1 está mostrado o circuito equivalente simplificado do DLC supercondutor resistivo.

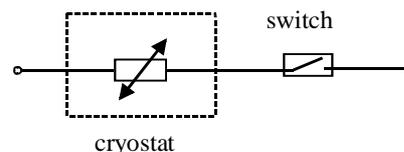


FIGURA 1 – DLC SUPERCONDUTOR RESISTIVO

2.1.2 Tipo indutivo (7)

O DLC supercondutor indutivo é, em princípio, um tipo de transformador no qual o material supercondutor impede que o campo magnético do enrolamento primário circule pelo núcleo de ferro durante a operação normal e, por isso, é freqüentemente chamado de "tipo núcleo de ferro blindado".

Contrariamente ao tipo resistivo, o DLC supercondutor indutivo é acoplado magneticamente com o circuito a ser protegido.

O primário é o enrolamento de condutividade normal. Consiste em vários enrolamentos de forma análoga a um enrolamento convencional.

O secundário é o enrolamento supercondutor. Consiste, na maioria das vezes, num único enrolamento, que é um invólucro cilíndrico.

Durante a operação normal o campo magnético do enrolamento primário é impedido pelo supercondutor de circular pelo núcleo de ferro. Se a corrente crescer acima de um valor determinado, o campo magnético crítico do supercondutor será excedido e penetrará no núcleo de ferro, resultando numa impedância elevada que limitará a corrente de curto-circuito.

De forma similar à do tipo resistivo, o DLC supercondutor indutivo necessita da interrupção da corrente após sua limitação, para o resfriamento e de um período de restabelecimento do seu estado de supercondutividade original.

Na FIGURA 2 está mostrado o circuito equivalente simplificado do DLC supercondutor indutivo.

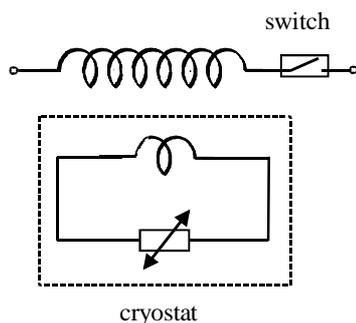


FIGURA 2 – DLC SUPERCONDUTOR INDUTIVO

2.1.3 Tipo híbrido (resistivo/indutivo) (8)

O DLC supercondutor híbrido consiste numa combinação dos dois tipos anteriores.

As vantagens principais do dispositivo são: características de projeto mais flexíveis para satisfazer os requisitos de operação, pela fácil variação dos parâmetros físicos, elétricos e magnéticos.

As desvantagens principais são seu tamanho e peso.

2.2 DLC pirotécnico (10)

O DLC pirotécnico limita consideravelmente a corrente de curto-circuito no início do seu estabelecimento, de tal forma que o seu máximo valor assimétrico fique bastante reduzido.

O DLC pirotécnico consiste em princípio num interruptor extremamente rápido, capaz conduzir uma corrente elevada mas não tendo nenhuma capacidade de limitação, montado em paralelo com um fusível de alta capacidade de interrupção.

Para a obtenção do curto tempo de abertura desejado, uma pequena carga explosiva é usada como energia para abrir o interruptor (o condutor principal).

Quando o condutor principal é aberto, a corrente continua fluindo pelo fusível paralelo, sendo limitada dentro de 0.5 ms e então finalmente interrompida na próxima passagem por zero.

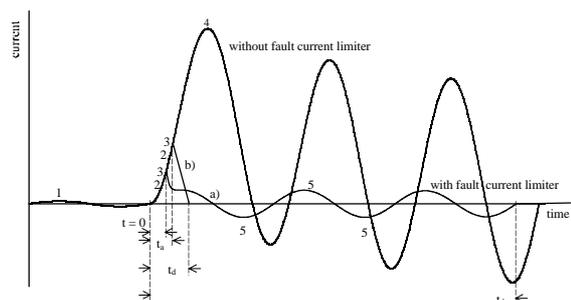
A corrente instantânea de curto-circuito que flui pelo DLC pirotécnico e sua taxa de crescimento são constantemente monitoradas por um medidor e por um dispositivo eletrônico de disparo.

No início do estabelecimento da corrente de curto-circuito, este dispositivo decide se é necessário o disparo do DLC pirotécnico.

Quando os ajustes são alcançados ou excedidos, o dispositivo eletrônico só atua nas fases defeituosas e o DLC pirotécnico é então desconectado por um disjuntor em série para permitir a substituição das partes internas (carga explosiva e fusível).

Desde sua invenção em 1955, vários DLC's pirotécnicos vem sendo usados com sucesso em sistemas de CC, de CA e particularmente em sistemas trifásicos de CA de tensão nominal até 40 kV.

A FIGURA 3 mostra a corrente de curto-circuito sem limitação, iniciada em $t = 0$ e a limitação proporcionada pelos diversos tipos de DLC's abordados no presente item.



Corrente de curto-circuito sem limitação, iniciada em $t = 0$ e limitação proporcionada por:

- a) DLC supercondutor
- b) DLC pirotécnico

FIGURA 3 – CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO 3.0 - DISPOSITIVO LIMITADOR PIROTÉCNICO DA ABB: LIMITADOR-IS

O dispositivo pirotécnico limitador-Is é uma alternativa técnica e economicamente atraente para a limitação do valor máximo assimétrico da corrente curto circuito.

O dispositivo, desenvolvido pela ABB Calor Emag em Ratingen, Alemanha, vem sendo usado com sucesso em mais de 2.500 instalações em 70 países.

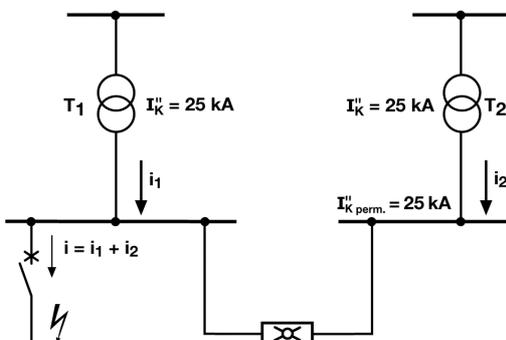
Embora a condução da corrente e sua limitação, no caso de um curto-circuito, se processam em os dois sistemas de condutores do limitador-Is, os limitadores-Is podem conduzir altas correntes sem perdas e, não obstante, efetivamente limitar as correntes de curto-circuito antes que as mesmas atinjam seu valor máximo assimétrico.

O exemplo da FIGURA 4 ilustra a função fundamental do limitador-Is: uma contribuição de curto-circuito de 25 kA fluindo por cada transformador até o ponto de falta a montante do disjuntor do alimentador, perfaz um total de 50 kA.

A instalação (barramentos e equipamentos), entretanto, é projetada para uma corrente curto-circuito de 25 kA.

No início da subida (primeiro semi-ciclo) da corrente de curto-circuito, o limitador-Is que interliga as duas barras atua.

A corrente i_2 é limitada tão rapidamente de forma a não contribuir para o valor de pico da corrente assimétrica de curto-circuito $i_1 + i_2$ no local da falta. Conseqüentemente, nenhum ponto da instalação fica submetido então a uma corrente mais alta que a admissível (25 kA).



a) unifilar

alcançado pelo limitador-Is é de 100%, enquanto que por um RLC se situa entre 2 e 20%.

Um sistema de medição e disparo é necessário para a perfeita perfeita e segura do limitador-Is. Um dispositivo eletrônico especialmente desenvolvido pela ABB Calor Emag para este propósito mede o valor instantâneo e taxa de crescimento da corrente que flui pelo limitador-Is, e compara estes valores com os limites especificados. Há um sistema de medição e disparo para cada das três fases. Se ambos os limites especificados são alcançados ou excedidos em qualquer uma das fases, o limitador-Is atua imediatamente.

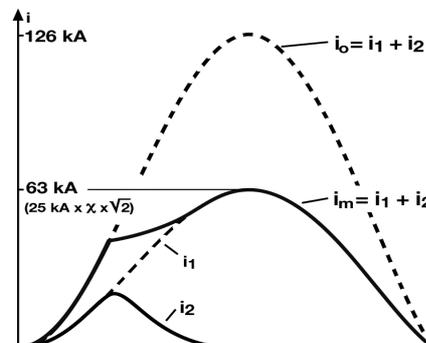
4.0 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS

O limitador-Is consiste num suporte com encaixe para a recarga fusível extraível, num transformador de pulso e num dispositivo eletrônico de medição e disparo, conforme mostrado na FIGURA 5.

Dois isoladores apóiam o invólucro da recarga fusível do limitador-Is cuja fixação se dá por um sistema de grampos. Um transformador de pulso é integrado a um dos isoladores para transmitir o pulso de disparo do dispositivo eletrônico de medição e disparo à carga explosiva ao potencial da rede. O transformador de pulso provê isolamento elétrico entre o sistema de disparo e a carga explosiva.

As alavancas são usadas para operar o sistema de grampos de fixação do invólucro da recarga fusível do limitador-Is.

A recarga do limitador-Is é sempre fácil de substituir, de forma que o limitador-Is pode retornar rapidamente



b) corrente de curto-circuito

i_0 - corrente total sem o limitador-IS
 i_m - corrente total com o limitador-IS

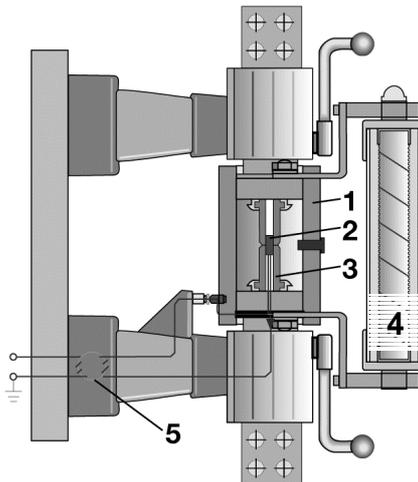
FIGURA 4 – INTERRUPTÃO COM O LIMITADOR-IS

As perdas por efeito joule e as quedas de tensão que ocorrem quando são usados RLC's, por exemplo, não acontecem com o limitador-Is. O grau de limitação

à operação depois de disparado. A recarga é reciclada pelo fabricante de maneira a não causar impacto ao meio ambiente.

A recarga do limitador-Is consiste num cilindro isolante que envolve o sistema condutor principal.

Este condutor consiste numa ponte-fusível com um ponto de ruptura e contém uma carga explosiva.



Suporte com encaixe e recarga fusível extraível

- 1 Cilindro isolante
- 2 Carga explosiva
- 3 Ponte-fusível (condutor principal)
- 4 Fusível
- 5 Transformador de pulso

FIGURA 5 – LIMITADOR-IS

Disparando, o dispositivo eletrônico de medição e disparo atua sobre a carga através do transformador de pulso e assim, abre o condutor principal, causando a comutação da corrente com o fusível paralelo.

Para detetar a corrente que flui pelo condutor principal, um transformador de pulso é instalado em série com a recarga do limitador-Is em cada fase. O dispositivo eletrônico de medição e disparo fica situado no interior de um gabinete de folha de aço à prova de poeira ou no interior do cubículo do equipamento de manobra de baixa tensão.

O dispositivo inclui uma fonte de alimentação, três dispositivos eletrônicos de medição e disparo, uma unidade de sinalização e uma unidade anti-interferência.

5.0 APLICAÇÕES POTENCIAIS DO LIMITADOR-IS

Tal dispositivo limitador pirotécnico satisfaz uma variedade de aplicações que não podem ser cumpridas através de interruptores convencionais. As mais importantes são apresentadas a seguir:

5.1 Acoplamento paralelo entre dois sistemas

Os limitadores-Is podem ser usados no acoplamento entre dois sistemas ou partes de sistemas cujas suportabilidades ao curto-circuito não seriam suficientes para um acoplamento paralelo com disjuntor (FIGURA 6).

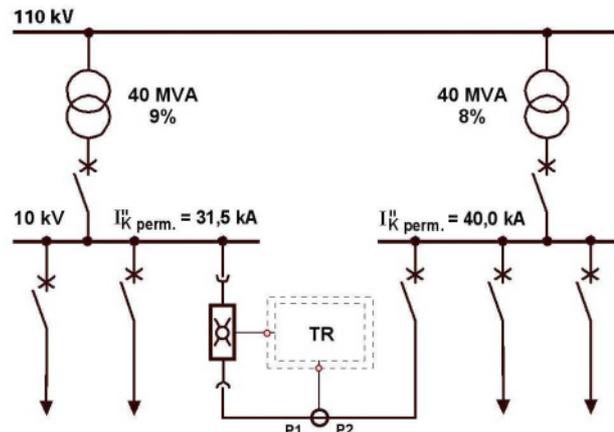


FIGURA 6 - ACOPLAMENTO ENTRE SISTEMAS

5.2 Conexão de produtores independentes à rede básica

A conexão de produtores independentes à rede básica provocará cada vez mais um aumento significativo dos níveis curto-circuito, exigindo soluções de limitação que podem ser proporcionadas pelos limitadores-Is (FIGURA 7).

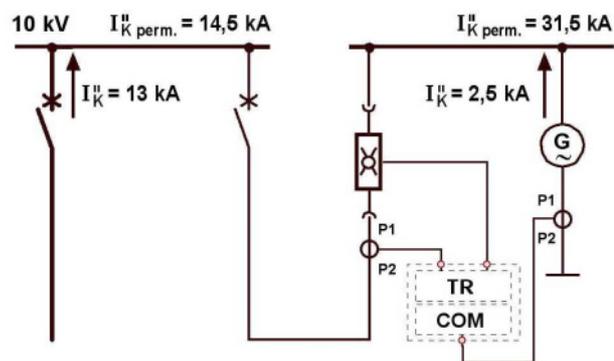


FIGURA 7 - CONEXÃO DE PRODUTOR À REDE

5.3 Chaveamento seletivo com limitadores-Is

Quando vários limitadores-Is são instalados num sistema, é possível a adoção de chaveamento seletivo.

Em tais casos, somente o limitador-Is mais próximo ao local de falta é disparado. A FIGURA 8 mostra um exemplo desta aplicação.

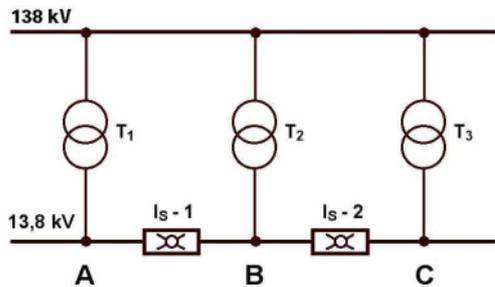


FIGURA 8 – CHAVEAMENTO SELETIVO

6.0 - CONCLUSÕES

A conexão de produtores independentes à rede básica causando aumento dos níveis curto-circuito exigirá cada vez mais o conhecimento de técnicas de limitação a serem aplicadas à rede existente.

Soluções como recapacitação das instalações, radialização da rede, utilização de transformadores de impedância mais alta e de reatores de série de núcleo de ar (RLC's) e adoção de estratégias de chaveamento seqüencial podem criar outros problemas como redução da segurança e da confiabilidade, custos elevados e aumento das perdas na rede.

Além dos RLC's já utilizados no Brasil, DLC's supercondutores e pirotécnicos encontram-se disponíveis ou em fase de desenvolvimento.

O DLC pirotécnico limitador-Is é uma alternativa para a limitação já sendo usado com sucesso em mais de 2.500 instalações em 70 países, alcançando grau de limitação de 100%, enquanto que por um RLC se situa entre 2 e 20%.

7.0 - BIBLIOGRAFIA

- (1) AMON F.,J, PERES, L. A. P., GOMES, R., ORÇAI, J.- "Soluções e Perspectivas do Uso de Limitadores de Corrente para Controle do Fluxo de Potência e Redução das Correntes de Curto-Circuito" - VII ERLAC, Puerto Iguazú, Argentina, 1997
- (2) AMON F.,J, PERES, L. A. P. – "Recapacitação da Subestação de Mogi 345/230 kV e Adaptação aos Novos Níveis de Curto-Circuito da Rede" - XIV SNPTEE, Belém, PA, 1997
- (3) AMON F.,J, MALDONADO, P. M., PERES, L. A. P., GOMES, R., ORÇAI, J. E OUTROS – "Limitação dos Níveis de Curto-Circuito no Setor de 345 kV da Subestação de Mogi das Cruzes Através do Emprego de Reatores Limitadores de Núcleo de Ar" - VIII ERLAC – Ciudad del Este, Paraguai, 1999
- (4) AMON F.,J, PERES, L. A. P., PREZIA, L. A., LANZIOTTI, A. L. – "Recapacitação da Subestação de Mogi das Cruzes, Projetos, Estudos e Aspectos Construtivos" - IV ELAB, Rio de Janeiro, RJ, 1999

(5) AMON F.,J – "Limitação de curto-circuito: Experiência de FURNAS e análise de novas tecnologias existentes e em desenvolvimento, cada vez mais necessárias para viabilizar a conexão de novos produtores independentes à rede básica." - IX ERLAC – Foz do Iguaçu, Brasil, 2001

(6) PAUL W., CHEN M., LAKNER M., RHYNER J., BRAUN D., LANZ W. (Switzerland), KLEIMAIER M. (Germany) – "Superconducting fault current limiter-applications, technical and economical benefits, simulations and test results" - artigo 13-201 - 38ª Sessão Bienal da CIGRÉ, Paris, 2000

(7) FISCHER S., SCHMITT H., VOLKMAR R.R. (Germany), BRISSETTE Y. (Canada) – "System requirements and test of super-conducting fault current limiters" - artigo 13-207- 38ª Sessão Bienal da CIGRÉ, Paris, 2000

(8) SARAVOLAC M.P., VERTIGEN P. (United Kingdom) – "Development and testing of a novel design concept for high temperature super-conducting fault current limiter" - artigo 13-204 - 38ª Sessão Bienal da CIGRÉ, Paris, 2000

(9) FUKAGAWA H., MATSUMURA T., OHKUMA T., SUGIMOTO S., GENJI T., UEZONO H. (Japan) – "Current state and future plans of fault current limiting technology in Japan" - artigo 13-208 - 38ª Sessão Bienal da CIGRÉ, Paris, 2000

(10) – HARTUNG, K. H. – "Is-Limiter – reliable and economic protection against short-circuit currents" – Seminário sobre equipamentos de manobra – CIGRÉ Brasil – BR.CE 13, Rio de Janeiro, junho de 2000.

AUTORES

Jorge Amon Filho - Nascido em 08.08.52, no Rio de Janeiro, RJ. Graduação (1975) e mestrado em engenharia elétrica (1986) pela PUC-RJ. Engenheiro de FURNAS (1976), trabalha na área de planejamento desde 1978, onde é chefe da Divisão de Estudos de Equipamentos. Coordenador do Comitê de Estudos 13 da CIGRÉ-Brasil e membro do CIGRÉ WG 13.10 - "Specifications for Short Circuit Current Limiters". Professor nos cursos de graduação em engenharia elétrica da PUC-RJ (1990/1995) e da UERJ (2000).

Karl Heinz Hartung - Nascido em 1945 em Neukirchen, Alemanha. Mestrado em engenharia elétrica pela Technical University em Aachen, Alemanha. Engenheiro da ABB Calor Emag Mittelspannung GmbH do Departamento de desenvolvimento (cálculo de curto-circuito, Limitador-Is, equipamento eletrônico de ensaio, c.t.s., disjuntores). Gerente geral do projeto Limitador-Is desde 1992. Membro do CIGRÉ WG 13.10 - "Specifications for Short Circuit Current Limiters"