



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GPC 10
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO V

GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO E CONTROLE EM SISTEMAS DE POTÊNCIA - GPC

POSSÍVEIS IMPACTOS, CONSEQUÊNCIAS E SOLUÇÕES PARA O SISTEMA DE PROTEÇÃO (EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA) DECORRENTES DA INSTALAÇÃO DE DISPOSITIVOS LIMITADORES DE CURTO-CIRCUITO

Jorge Amon Filho * Paulo Cesar Fernandez Roberto Campos de Lima

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A.

RESUMO

No ambiente de liberalização de regulação do setor elétrico brasileiro, caracterizado pelo livre-acesso de novos agentes de geração à rede de transmissão, verifica-se uma tendência a elevação dos níveis de curto-circuito normalmente nas proximidades dos centros de carga, não prevista pelas avaliações de planejamento do passado, anteriores à existência deste modelo institucional para o setor elétrico..

No presente artigo são avaliados os possíveis impactos, interações e consequências para os sistemas de proteção, decorrentes da disseminação, cada vez mais intensa, do uso de dispositivos limitadores de curto-circuito como solução para a mitigação da evolução dos níveis de curto-circuito, bem como novas propostas de configurações topológicas para a instalação desses dispositivos.

PALAVRAS-CHAVE

Modelo Institucional, Liberalização de Regulação, Curto-circuito, Dispositivos limitadores, Sistemas de proteção

1.0 - INTRODUÇÃO

Verifica-se como uma tendência, que se iniciou na década de 90 e tem se intensificado em anos recentes, que os sistemas elétricos de potência (SEP), a nível mundial, vêm experimentando mais e mais a chamada “liberalização de regulação”, com aumento de competitividade entre os agentes.

Este ambiente institucional relaciona-se ao livre-acesso à rede de transmissão, garantido pela nova tendência de regulamentação para os sistemas elétricos de potência, de modo que as empresas de transmissão, responsáveis pelos equipamentos constituintes do sistema de potência, estão perdendo o controle sobre o planejamento da localização de novas unidades geradoras e, conseqüentemente, ficando incapacitadas de prever, com uma maior antecedência e precisão, a evolução dos níveis de curto-circuito em cada ponto do sistema de transmissão.

Ou seja, a conexão de novos geradores (produtores independentes, auto-produtores, co-geração, etc) no sistema de transmissão está causando uma tendência à elevação dos níveis de curto-circuito em determinadas regiões da rede, elevação esta não prevista pelas avaliações de planejamento feitas no passado pelas empresas de transmissão, nas quais não se anteviu a existência destes novos agentes de geração, normalmente localizados próximos aos centros de carga. Com isto, dentro de uma perspectiva que está se consolidando de solução para o problema, verifica-se uma crescente necessidade de utilização de “dispositivos limitadores de curto-circuito” (DLCs) para mitigar os efeitos da elevação dos níveis de curto circuito no SEP decorrentes desta instalação (ou previsão de instalação) de novos agentes de geração.

Uma consequência imediata desta tendência de desenvolvimento atual dos SEP mundo afora é que em certas regiões do sistema de transmissão os requisitos de curto circuito dos equipamentos já existentes, definidos pela especificação técnica dos mesmos quando de sua aquisição no passado, estão sendo superados no presente ou em futuro muito próximo, sem que tal fato pudesse ter sido detetado em estudos de planejamento passados.

Assim, o uso de DLCs vem se apresentando como uma das melhores soluções, tanto do ponto de vista tecnológico quanto econômico, para esta problemática que vem ganhando importância cada vez maior, dado o contexto acima descrito sobre a tendência de evolução dos SEP em todo o mundo. Em termos do Brasil, no que diz respeito ao Sistema Interligado Nacional – SIN, estas constatações também são verdadeiras e algumas significativas exemplificações no sistema de transmissão de FURNAS Centrais Elétricas, acerca destes dois aspectos, serão apresentadas sucintamente no artigo em questão.

Porém, com a perspectiva da disseminação cada vez mais intensa destes dispositivos limitadores de curto-circuito, tornou-se importante também avaliar, afora outros aspectos tecnológicos e de custos, os possíveis impactos, interações e consequências para os sistemas de proteção atuais dos equipamentos do SEP, decorrentes da presença destes dispositivos limitadores de curto-circuito.

Dessa forma, esta análise será desenvolvida apontando as possíveis consequências para o sistema de proteção, abordando os aspectos de coordenação e seletividade, bem como novas propostas de configurações topológicas para a instalação de DCLs, e que apresentam a vantagem de mitigar grandemente estas consequências para os sistemas de proteção existentes decorrentes da presença destes DLCs no SEP, sem contudo influenciar no desempenho destes dispositivos quanto ao seu papel precípua de reduzir/limitar as correntes de curto-circuito para valores inferiores à suportabilidade dos equipamentos do SEP.

Tal análise abordará as possíveis implicações para os tipos de proteção mais comumente utilizados no SIN, indicando as medidas que deveriam ser investigadas mais a fundo no sentido de compatibilizar o desempenho tanto dos sistemas de proteção quanto dos dispositivos limitadores de curto-circuito, a fim de que ambos continuem cumprindo adequadamente seus papéis, como será discutido em mais detalhes no artigo ora proposto.

Quanto às soluções propostas no artigo para os problemas apontados, destaca-se a proposta de instalação destes dispositivos limitadores na posição de “interligação de barras” nas configurações de barramentos comumente utilizadas na rede básica do SIN pelas concessionárias de transmissão ou distribuição que atuam no Brasil.

Serão apresentadas, de uma forma abrangente, as vantagens da instalação destes dispositivos nesta configuração topológica, ou seja, tanto no que diz respeito aos impactos para o sistema de proteção, quanto em relação a outros aspectos importantes, como de regulação de tensão, perdas ôhmicas, agressão ao meio ambiente devido a campos eletromagnéticos, ruídos, etc.

2.0 - TIPOS DE DISPOSITIVOS LIMITADORES

Os DLC's podem ser classificados nas seguintes categorias principais: a) quanto ao tipo de material empregado para exercer o papel de limitar a corrente de curto-circuito, podem ser supercondutores e não supercondutores (1); b) quanto à ação do DLC no SEP, podem ser passivos (2) e ativos (3) .

Embora as pesquisas de DLC's baseados em materiais supercondutores tenham progredido grandemente nos últimos anos, é provável que ainda decorra algum tempo considerável antes de que eles estejam comercialmente disponíveis para aplicações em sistemas de transmissão de alta tensão, basicamente devido a questões de custos.

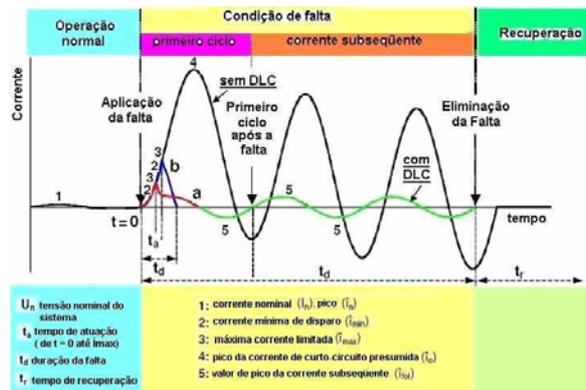
Os DLC's não supercondutores compreendem: os reatores série convencionais (manobráveis ou não); dispositivos eletrônicos de potência com reatores série convencionais ou uma combinação de capacitores e reatores; dispositivos pirotécnicos; etc, cuja experiência de uso no Brasil de alguns destes tipos data da segunda metade da década de 80 (4).

Para descrever conceitualmente a atuação de um DCL, a Figura 1 mostra em um ponto qualquer de um sistema de transmissão 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.

Como mencionado acima, os DLC's também podem ser divididos em, passivos e ativos, conforme ilustrado na Figura 2.

Os DLC's passivos, grupo do qual os reatores série fazem parte, caracterizam-se por impedância elevada, tanto em condições normais de operação, quanto em condições de falta, enquanto os DLC's ativos, grupo do qual os dispositivos pirotécnicos e os supercondutores fazem parte, por impedância pequena sob condições normais de

operação, porém com crescimento muito rápido dessa grandeza apenas quando sob condições de falta, voltando às condições iniciais (automaticamente ou por intervenção da manutenção), após a eliminação dessa falta.



Corrente de curto-circuito sem limitação, iniciada em $t = 0$ e limitação proporcionada por:
a) DLC supercondutor
b) DLC pirotécnico

FIGURA 1 – Corrente de curto-circuito

Os DLC's ativos, por sua vez, podem ainda ser caracterizados pelas seguintes funções:

- apenas limitação de corrente
- limitação e interrupção de corrente
- auto disparados
- disparados por dispositivo externo

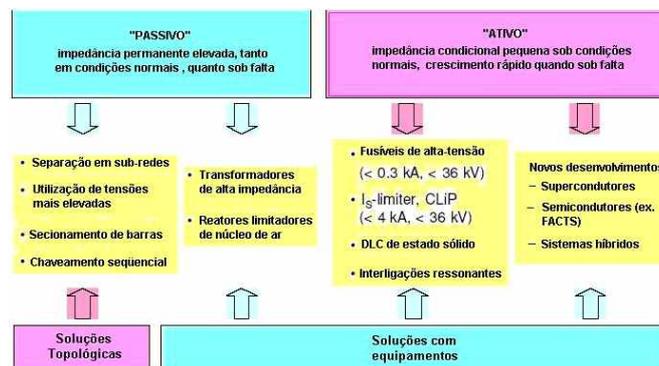


FIGURA 2: Características da classificação dos DCLs em ativos e passivos

Um levantamento realizado em 2004 pelo grupo de trabalho WG A3.16, do Comitê de Estudos A3 (Equipamentos de Alta Tensão) do CIGRÉ, envolvendo 14 países, constatou uma crescente necessidade em todo o mundo de se limitar os níveis de curto-circuito dos sistemas elétricos, especialmente nas tensões entre 110 kV e 145 kV. O caso específico do Brasil, bem como a experiência brasileira no uso de DLC's do tipo "reator série de núcleo de ar" é relatado na referência (4).

3.0 INTERAÇÃO ENTRE O DLC E O SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

As seguintes interações entre o SEP e o DLC (e vice-versa) devem ser investigadas com o objetivo de se minimizar os efeitos indesejáveis destas interações inerentes a esse tipo de solução para mitigação da evolução dos níveis de curto-circuito no SEP:

3.1 Impacto do SEP no DLC

- Acionamentos indesejáveis do DLC
- Capacidade de suportar correntes de curto-circuito

3.2 Impacto do DLC no SEP

- Sobre esquemas de proteção existentes
- Sobre instalações de geração (como produtores independentes, auto-geradores, co-geração, etc)
- Sobre equipamentos de manobra convencionais

- Sobre a confiabilidade do SEP

Embora os DLCs passivos, quando já existentes, não causem impacto nos sistemas de proteção, já que sua presença é permanente no SEP, a redefinição dos ajustes dos respectivos sistemas de proteção deve ser contemplada quando da instalação deste DLC no SEP.

Já no caso dos DLCs ativos, seus comportamentos dinâmico e transitório modificam momentaneamente a topologia do sistema de potência e podem acarretar alterações de performance e operação indevida dos sistemas de proteção, uma vez que estes últimos possuem ajustes fixos em função de uma determinada configuração da topologia do SEP, que estaria sendo modificada pela atuação do DLC ativo, introduzindo no SEP uma impedância antes não existente.

4. 0 SISTEMAS DE PROTEÇÃO

De acordo com o referido levantamento do WG A3.16, foi constatada uma predominância dos relés eletromecânicos nos sistemas de proteção dos países que participaram do questionário, sendo as principais filosofias de proteção adotadas nos países participantes a de distância, a diferencial e a de sobrecorrente. Também foi constatado que a eletrônica de potência ou proteção digital vem sendo utilizada crescentemente no Brasil nos últimos 10 anos, correspondendo, aproximadamente, a 6% do total instalado, enquanto que nos demais países participantes, está sendo prevista apenas para novas instalações futuras, o que se dá de uma forma bem mais lenta do que no Brasil, devido à expansão do SEP nestes países se dar a taxas bem menores. No caso do Brasil, dos arranjos de subestações no SIN e nos sistemas de distribuição, predominam o tipo barra principal e de transferência, o tipo barra dupla e disjuntor simples, o tipo anel e o tipo barra dupla e disjuntor duplo, nas tensões entre 13,8 kV e 500 kV. Para níveis superiores a 500 kV, o arranjo utilizado é o disjuntor e meio, sendo este arranjo, em alguns casos, também utilizado para níveis de tensões inferiores a 500 kV.

4.1 Aspectos gerais

Como regra geral pode ser estabelecido que quanto maior o nível de tensão do equipamento, ou quanto maior a importância do equipamento ou do sistema de potência, mais rigorosos são os requisitos de proteção. Os sistemas de proteção devem atender aos requisitos de “seletividade e coordenação”, “sensibilidade”, “rapidez” e “confiabilidade operativa”, de modo a não deteriorar o desempenho do sistema elétrico durante a ocorrência de condições anormais (perturbações), sendo necessário realizar estudos de coordenação da proteção, de forma a confirmar o atendimento a estes requisitos. Todos os sistemas de proteção devem admitir a falha ou a perda de um componente sem que isto acarrete a degradação da confiabilidade ou da funcionalidade do sistema de proteção como um todo (existência de proteção back-up).

Um sistema de potência não irá operar satisfatoriamente sem um projeto e ajustes da proteção adequados à configuração de sistema e à confiabilidade requerida. Dessa forma, os sistemas da proteção precisam garantir esta confiabilidade requerida à operação do SEP, mesmo se os DLCs forem aplicados. O comportamento dos sistemas de proteção pode ser dividido para regime permanente e para condições transitórias. Por outro lado, existem diferentes tipos de proteção que processam diferentes grandezas físicas do SEP, seja de forma analógica ou digitalizada. A Tabela 1 apresenta os principais tipos de proteção utilizados em um SEP e os possíveis impactos causados nas mesmas devido à utilização de DLC.

O sistema de proteção, sem prejuízo dos requisitos acima, deve ser necessário e suficiente para a eliminação de todos os tipos de curtos-circuitos possíveis (monofásicos, bifásicos, bifásicos a terra e trifásicos, envolvendo ou não a terra). As maiores solicitações aos disjuntores ocorrem quando os mesmos são acionados pelo sistema de proteção para eliminar correntes de curto-circuito do tipo “trifásicas terminais não envolvendo a terra” (requisitos de suportabilidade do disjuntor ao nível de lcc) e “monofásicas quilométricas francas para a terra”, ou com impedância de falta nula (requisitos de suportabilidade do disjuntor à TRT).

Nesta análise apresentada na Tabela 1 cabe ressaltar que a severidade para o disjuntor imposta pela falta (nível de lcc e/ou TRT) é afetada pela presença do DLC, dependendo da sua localização, princípio de funcionamento, configuração do sistema de potência e arranjo de barramentos.

Dependendo do tipo de DLC utilizado, conforme classificação do item 2 acima, os conceitos atuais da proteção devem ser adaptados ou revisados para assegurar a seletividade e a coordenação apropriadas. Deve ser estabelecida uma relação entre os DLCs e os esquemas da proteção considerando as condições específicas da proteção da rede, o impacto de tecnologias diferentes de DLC, conceitos de proteção existentes e novos, seletividade, coordenação, ajustes e configurações de rede. Na Figura 3 é apresentada uma rede de típica alta tensão a partir da qual é possível a análise das principais dificuldades na aplicação de DLCs em um SEP, em termos da sua posição, do grau de confiabilidade e da coordenação do tempo de eliminação da falta (clearing time).

TIPOS DE PROTEÇÃO	GRANDEZAS FÍSICAS PROCESSADAS	POSSÍVEIS IMPACTOS CAUSADOS AO SISTEMA DE PROTEÇÃO PELA INSTALAÇÃO DE DLC
SOBRECORRENTE DE FASE OU NEUTRO (50/51N), DIRECIONAIS DE FASE OU NEUTRO (67/67N)	CORRENTE DE LINHA (I_{EFF}) OU CORRENTE DE FASE ($I_{50/60HZ}$), FORMA DE ONDA DA CORRENTE NO TEMPO ($I(T)$ TIME SIGNAL), CORRENTE DE SEQUÊNCIA NEGATIVA E ZERO (I_0, I_2); TENSÃO FASE-FASE (U_{EFF}) OU TENSÃO FASE-NEUTRO ($U_{50/60HZ}$) (DIRECTION, SENSITIVE FAULT DETECTION); SINAIS LÓGICOS LOCAIS OU REMOTOS (LOGIC SIGNALS LOCALLY OR FROM REMOTE END)	SUA ATUAÇÃO PODE SER AFETADA PELA INSTALAÇÃO DE DLC, JÁ QUE SEU PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO BASEIA-SE NO SENTIDO DE FLUXO DA GRANDEZA FÍSICA "CORRENTE ELÉTRICA", E TAMBÉM NOS SEUS VALORES RMS. NESTE CASO PODE SE FAZER NECESSÁRIO UM RE-ESTUDO DA COORDENAÇÃO DESTES TIPO DE PROTEÇÃO EM FUNÇÃO DA INSTALAÇÃO DE DLC.
FALHA DO DISJUNTOR (50BF)	CORRENTE DE FASE ($I_{50/60HZ}$); SINAIS LÓGICOS LOCAIS OU (LOGIC SIGNALS LOCALLY OR FROM REMOTE END)	SUA ATUAÇÃO NÃO É AFETADA PELA INSTALAÇÃO DE DLC, JÁ QUE SEU PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO NÃO SE BASEIA-NO VALOR DA GRANDEZA FÍSICA "CORRENTE ELÉTRICA"; NÃO SE FAZ NECESSÁRIA UMA RE-COORDENAÇÃO DESTES TIPO DE PROTEÇÃO.
DISTÂNCIA (21)	CORRENTE DE FASE ($I_{50/60HZ}$) E TENSÃO FASE-NEUTRO ($U_{50/60HZ}$); CORRENTE DE SEQUÊNCIA POSITIVA, NEGATIVA E ZERO (I_1, I_2 AND I_0); LOOP IMPEDANCE, DI/DT JUMP DETECTOR; SINAIS LÓGICOS LOCAIS OU REMOTOS (LOGIC SIGNALS LOCALLY OR FROM REMOTE END)	SUA ATUAÇÃO PODE SER AFETADA PELA INSTALAÇÃO DE DLC, JÁ QUE SEU PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO BASEIA-SE NO VALOR RMS DAS GRANDEZAS FÍSICAS "CORRENTE E TENSÃO ELÉTRICAS"; PODE SER NECESSÁRIA UMA RE-COORDENAÇÃO DESTES TIPO DE PROTEÇÃO, DEPENDENDO DA SUA LOCALIZAÇÃO, PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA E ARRANJO DE BARRAMENTOS, DEVIDO À INFLUÊNCIA QUE PODE OCORRER NOS VALORES DAS GRANDEZAS FÍSICAS "I" E "V".
DIFERENCIAL ALTA/BAIXA IMPEDÂNCIA (87)	SOMATÓRIO DE CORRENTES DE FASE ($\Delta I_{50/60HZ}$), SOMATÓRIO DA FORMA DE ONDA DA CORRENTE NO TEMPO ($\Delta I(T)$ PER PHASE), Q(T), TENSÃO FASE-NEUTRO ($U_{50/60HZ}$ FOR INCREASED SENSITIVITY); ESTABILIZADOR DE VALORES ESTÁTICOS E DINÂMICOS (STATIC AND DYNAMIC STABILIZING VALUES I_{STAB_STATIC} AND I_{STAB_DYN})	SUA ATUAÇÃO NÃO É AFETADA PELA INSTALAÇÃO DE DLC, JÁ QUE SEU PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO BASEIA-SE NO SOMATÓRIO DOS VALORES RMS DA GRANDEZA FÍSICA "CORRENTE ELÉTRICA"; NÃO SE FAZ NECESSÁRIO UM RE-ESTUDO DE COORDENAÇÃO DESTES TIPO DE PROTEÇÃO.
SUB/SOBRE TENSÃO (27/59)	TENSÃO FASE-NEUTRO ($U_{50/60HZ}$ PER PHASE), TENSÃO DE SEQUÊNCIA POSITIVA, NEGATIVA OU ZERO (U_1, U_2 OR U_0)	SUA ATUAÇÃO NÃO É AFETADA PELA INSTALAÇÃO DE DLC, JÁ QUE SEU PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO BASEIA-SE APENAS NO VALOR DA GRANDEZA FÍSICA "TENSÃO ELÉTRICA"; NÃO SE FAZ NECESSÁRIA UMA RE-COORDENAÇÃO DESTES TIPO DE PROTEÇÃO.
FREQÜÊNCIA (81) / SOBREFLUXO (24)	TENSÃO FASE-NEUTRO ($U_{50/60HZ}$ PER PHASE), RELAÇÃO TENSÃO/FREQÜÊNCIA (U/F PROTECTION)	SUA ATUAÇÃO NÃO É AFETADA PELA INSTALAÇÃO DE DLC, JÁ QUE SEU PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO NÃO SE BASEIA-NO VALOR DA GRANDEZA FÍSICA "CORRENTE ELÉTRICA"; NÃO SE FAZ NECESSÁRIA UMA RE-COORDENAÇÃO DESTES TIPO DE PROTEÇÃO.
FUNÇÕES ESPECÍFICAS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS (GERADORES/MOTORES)	CORRENTE DE FASE ($I_{50/60HZ}$), TENSÃO FASE-FASE ($U_{50/60HZ}$), P, Q, F, Δ ,	SUA ATUAÇÃO PODE SER AFETADA PELA INSTALAÇÃO DE DLC, JÁ QUE ALGUNS DE SEUS PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO BASEIAM-SE NA GRANDEZA FÍSICA "CORRENTE ELÉTRICA", E TAMBÉM NOS SEUS VALORES RMS. NESTE CASO PODE SE FAZER NECESSÁRIO UM RE-ESTUDO DA COORDENAÇÃO DESTES TIPO DE PROTEÇÃO EM FUNÇÃO DA INSTALAÇÃO DE DLC.

TABELA 1: Tipos de proteção

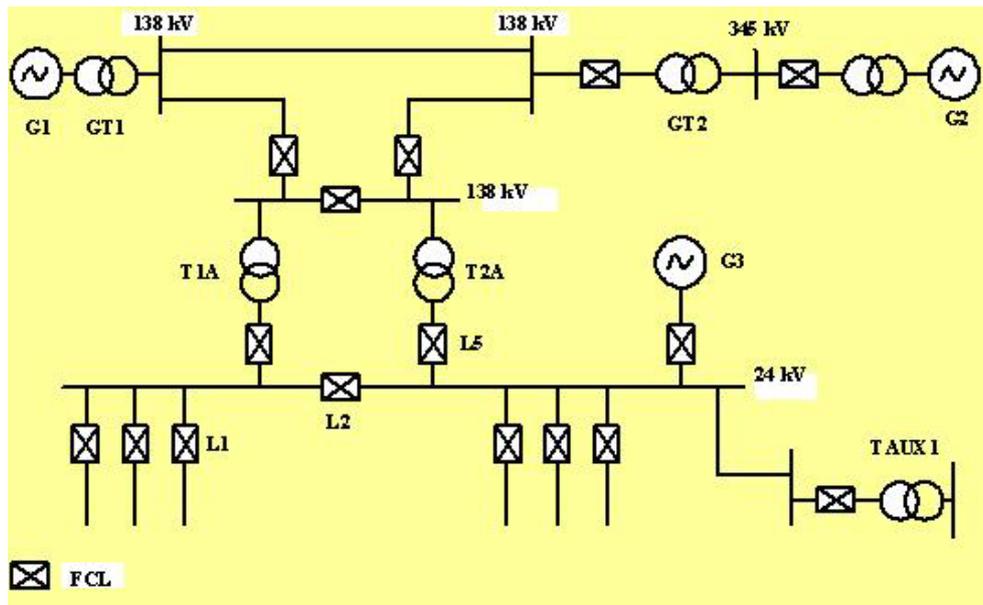


FIGURA 3: Sistema de potência típico

4.2 Modelagem

Um método adequado para se estudar o comportamento transitório dos DLCs em SEP deve usar um modelo baseado no seu princípio físico de funcionamento. Entretanto, incorporar todos os detalhes possíveis ao modelo baseado no princípio físico de funcionamento do DLC em estudos do sistema pode nem sempre ser a aproximação mais prática ou exequível. Na descrição do comportamento transitório de um DLC durante um evento de limitação de corrente de curto-circuito devem ser contemplados parâmetros tais como o ângulo da fase e das distorções harmônicas causadas na corrente por algum DLC de estado sólido. Tais modelos de DLCs serão adequados para a maioria de estudos do sistema de proteção. Entretanto, pode ser difícil obter informação detalhada das características específicas de um determinado relé de proteção quanto ao seu comportamento transitório. Uma forma possível para superar a dificuldade de modelagem acurada dos algoritmos do relé é usar a simulação em tempo real.

Na Figura 4 é mostrado o diagrama utilizado numa simulação em tempo real do impacto de DLC em sistema de proteção descrito na referência (3).

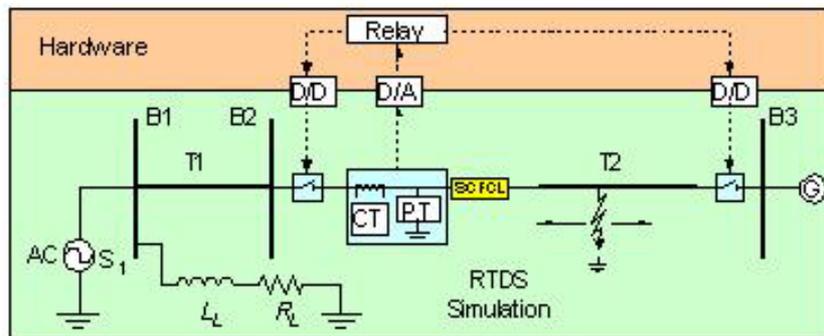


FIGURA 4: Simulação em tempo real do impacto de DLC em sistema de proteção

Um modelo simples de um SEP incorporando o comportamento transitório de um DLC é executado num ambiente de simulação digital em tempo real. O dispositivo da proteção, neste exemplo um relé de distância, recebe sinais de tensão e corrente de uma extremidade de uma linha de transmissão T2 e emite sinais do disparo aos disjuntores em ambas as extremidades. Sem DLC presente, o relé dispara os disjuntores corretamente para falhas dentro de 80% do comprimento da linha. Entretanto, se um DLC for introduzido entre a posição do transformador de potencial (PT) e a linha, o algoritmo de impedância do relé interpreta a impedância adicional do DLC como parte da impedância da linha. O algoritmo coloca a falha fora de sua zona de proteção e consequentemente não dispara os disjuntores. Se, entretanto, o transformador de potencial (PT) estiver colocado entre o DLC e a linha, o relé pode determinar corretamente a impedância da linha sob falta no sentido direto e disparar os disjuntores adequadamente. Entretanto, por outro lado, falhas reversas serão detetadas com alguns problemas, já que esta configuração produzirá um sub-alcance (underreaching) reverso, acarretando, conseqüentemente, um mau funcionamento do esquema do tele-proteção, para a qual também terá que ser providenciada uma solução.

5.0 SOLUÇÃO DE CONFIGURAÇÃO PROPOSTA EM FURNAS PARA A PRÓXIMA APLICAÇÃO DE DLC

O seguinte exemplo corresponde ao próximo projeto importante de FURNAS a respeito do uso de um DCL no sistema de FURNAS, sendo utilizado um dispositivo do tipo passivo (reator limitador de corrente série).

A próxima ampliação prevista para a Subestação de Tijuco Preto, terminal receptor do sistema de transmissão de Itaipu em corrente alternada, acarretará a elevação dos níveis de curto-circuito nesta subestação acima do valor de 50 kA, para o qual foram dimensionados todos os equipamentos e o próprio setor de 345 kV da mesma, caracterizando, assim, a superação dos equipamentos. Tal fato deflagrou estudos conduzidos por FURNAS com o objetivo de analisar possíveis soluções de mitigação (4) a serem aplicadas.

As soluções de mitigação avaliadas compreenderam desde a revisão das premissas adotadas nos estudos iniciais, de acordo com avaliações mais apuradas, passando pela adoção de medidas operativas, tais como o chaveamento seqüencial ou a modificação da configuração da rede próxima à instalação com superação, pela instalação de dispositivos limitadores de curto-circuito até, finalmente, a substituição do equipamento superado por outro de maior capacidade.

A solução escolhida para este caso, tanto do ponto de vista técnico quanto econômico, é o seccionamento do barramento de 345 kV da subestação de Tijuco Preto em dois trechos, acompanhado do remanejamento

adequado de alguns circuitos entre estes trechos de barramento, para melhor equilíbrio na distribuição e compartilhamento das cargas em condições normais de operação, além da instalação de dois reatores de núcleo de ar entre esses trechos, a fim de causar a redução do nível de curto-circuito de 54kA para 45kA. Assim, esta solução proposta evitará a necessidade de substituição de 37 disjuntores de 345kV e de equipamentos associados (chaves seccionadoras, TC, barramentos, etc) por novos, e com capacidade de curto-circuito mais elevada, o que tornaria esta solução muito mais cara e demorada, correspondendo a um custo de cerca de 2,5 milhões de Reais apenas para cada disjuntor substituído (considerando inclusive os custos de montagem e comissionamento no campo). Neste caso, há que se incluir ainda os custos de substituição de chaves seccionadoras, transformadores de corrente, trechos de barramento, malha de terra, etc

A solução proposta do FURNAS, além da vantagem econômica, já que o custo de dois reatores corresponde, aproximadamente, ao de um disjuntor apenas, a experiência no uso de tais dispositivos, descrita nas referências (2) e (5), mostra que esta configuração escolhida para os reatores de núcleo de ar em relação ao barramento da subestação acarreta vários outros benefícios e vantagens, como perdas por efeito joule mínimas, melhor regulação da tensão e redução de ruídos e de poluição por campos eletromagnéticos, quando comparada a outras possíveis posições (em série com circuitos, alimentadores, etc, que chegam ou partem da referida subestação). Devido à instalação dos 2 reatores de núcleo de ar mostrados na Figura 5, diversos estudos de avaliação foram realizados a fim de determinar os novos requisitos de TRT impostos aos atuais disjuntores da subestação de Tijuco Preto, devido à introdução de uma nova impedância no circuito quando sob a condição de faltas. É importante mencionar aqui que apenas um dos dois reatores ficará inserido permanentemente entre os dois trechos de barramento. O outro ficará de reserva, para substituir o primeiro sempre que necessário e para fins de manutenção.

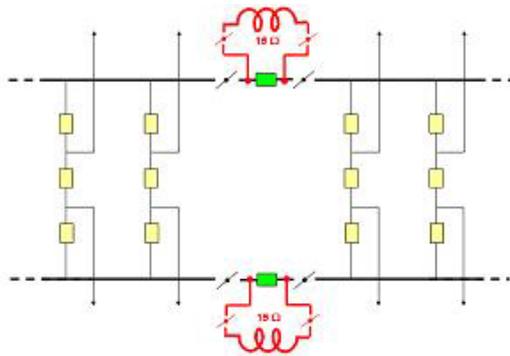


FIGURA 5: Barramentos seccionados e interligados através de 2 reatores de núcleo de ar

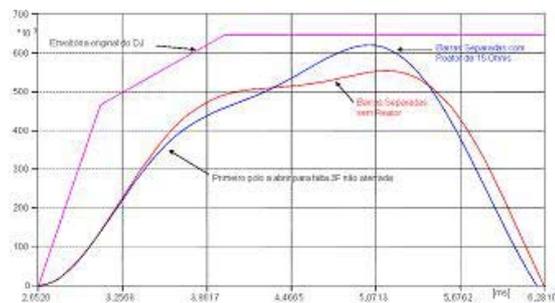


FIGURA 6: Requisitos de TRV para as diversas configurações de barras

Como pode-se ver na Figura 6, os novos requisitos valor de pico da TRV aumentarão quando o reator limitador estiver em operação. Estes novos requisitos de TRV diferentes daqueles para a configuração sem o reator limitador inserido, ocorrem devido às propagações e reflexões das ondas trafegantes causadas pelo reator durante a aplicação dos curto-circuitos. Todavia, os novos requisitos de TRV ainda são atendidos pela Norma IEC de disjuntores, condição que é necessária para atestar a viabilidade da solução.

Cabe salientar que esta solução, além da viabilidade técnica e da atratividade econômica, não causa impacto no sistema de proteção maior do que exigir somente alguns novos ajustes fixos em função da nova topologia de rede, por envolver o uso apenas de dispositivo limitador do tipo passivo.

6.0 CONCLUSÕES

O livre-acesso de novos agentes de geração à rede de transmissão acarreta uma tendência à elevação dos níveis de curto-circuito, normalmente nas proximidades dos centros de carga, não prevista pelas avaliações de planejamento do passado, anteriores à existência destes novo contexto institucional para o setor elétrico. Com isto, como uma solução possível para esta questão, tornou-se crescente a possibilidade da utilização de dispositivos limitadores de curto-circuito (DLCs) para mitigar os efeitos da elevação dos níveis de curto circuito nos SEP. Com isto, como uma solução possível para esta questão, tornou-se crescente a necessidade da utilização de dispositivos limitadores de curto-circuito (DLCs) para mitigar os efeitos da elevação dos níveis de curto circuito nos SEP.

Um levantamento realizado pelo grupo de trabalho WG A3.16, do CIGRÉ, em 2004, envolvendo 14 países, constatou uma crescente necessidade de se limitar os níveis de curto-circuito dos sistemas elétricos, especialmente nas tensões entre 110 kV e 145 kV.

As interações entre os sistemas de proteção do SEP e o DLC (e vice-versa) devem ser amplamente investigadas, com o objetivo de se minimizar os efeitos indesejáveis inerentes a esse tipo de solução.

Existem diferentes tipos de proteção que processam diferentes grandezas físicas do SEP. Dependendo do tipo de DLC utilizado, os conceitos atuais da proteção devem ser adaptados ou revisados para assegurar a seletividade e coordenação apropriadas, considerando condições específicas, tais como, o impacto de diferentes tecnologias de DLC, conceitos de proteção existentes e novas configurações propostas.

Embora os DLCs passivos não causem impactos nos sistemas de proteção, além da necessidade de um reajuste permanente de alguns parâmetros, os DLCs ativos, devido aos seus comportamentos dinâmico e transitório, modificam momentaneamente a topologia do sistema de potência e podem acarretar operação indevida do sistema de proteção, uma vez que estes últimos possuem ajustes fixos para uma determinada configuração de topologia do SEP.

Um método adequado para se estudar o comportamento transitório dos DLCs em SEP deve usar um modelo baseado no seu princípio físico de funcionamento. Todavia, nem sempre é possível tal solução como a aproximação mais prática para simular matematicamente tais dispositivos. Assim, uma técnica estabelecida para superar a necessidade de modelagem matemática acurada dos algoritmos e do comportamento transitório do relé, é usar a simulação em tempo real.

A experiência de FURNAS no uso de tais dispositivos mostra que a configuração proposta para os reatores de núcleo de ar em relação ao barramento da subestação de Tijuco Preto acarreta, além de uma grande economia de recursos financeiros e de tempo, vários outros benefícios e vantagens, como perdas por efeito joule mínimas, melhor regulação da tensão e redução de ruídos e de poluição por campos eletromagnéticos, quando comparada a outras possíveis posições (em série com circuitos, alimentadores, etc, que chegam ou partem da referida subestação).

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) AMON F.,J., HARTUNG K. H. – “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” – XVI SNPTEE, Campinas, outubro de 2001

(2) 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, maio de 2001

(3) CIGRE WG A3.16: “Fault Current Limiters – Application, Principles and Experience”, CIGRE SC A3&B3 Joint Colloquium “Present and Future of High Voltage Equipment and Substation Technologies”, Tokyo 26-27 September 2005, paper 205, proceedings pages 187-192

(4) AMON F.,J., Fernandes, P. C. A., Pimenta, D. G. – “Análise da superação das características nominais de equipamentos: métodos para a identificação da possibilidade de ocorrência e estudo de soluções de mitigação face as regras do atual modelo do setor elétrico” – XVIII SNPTEE, Curitiba, outubro de 2005

(5) AMON F.,J., D’AJUZ, A., Castanheira, A., Fernandez, P. C., Rose, E. H. – “Brazilian successful experience in the usage of current limiting reactors for short-circuit limitation” – IPST 2005, Montreal, Canada.

7.0 DADOS BIOGRÁFICOS

Jorge Amon Filho

Nascido no Rio de Janeiro, RJ em 08 de agosto de 1952.

Mestrado (1986) e Graduação (1975) em Engenharia Elétrica: PUC-Rio de Janeiro

Empresa: FURNAS Centrais Elétricas, desde 1976.

Gerente da Divisão de Estudos de Equipamentos do Departamento de Planejamento de Transmissão

Coordenador do Comitê de Estudos A3 do CIGRÉ-Brasil e do Comitê Brasileiro de Usuários do EMTP/ATP

Membro do SC A3 e do WG A3.16 do CIGRÉ e coordenador do Comitê de Estudos A3 do CIGRÉ-Brasil

Paulo Cesar Fernandez

Nascido no Rio de Janeiro, RJ em 09 de agosto de 1958.

Mestrado (1995), pela Universidade Federal de Itajubá-EFEL (Itajubá -MG) e Graduação (1981), pela Universidade Federal do Rio de Janeiro-UFRJ (Rio de Janeiro-RJ) em Engenharia Elétrica.

Empresa: FURNAS Centrais Elétricas, desde 1979 nas áreas de planejamento da operação, operação em tempo real e atualmente no Gabinete da Presidência.

Membro do WG A3.16 do CIGRÉ Internacional e secretário do Comitê de Estudos A3 do CIGRÉ-Brasil

Roberto Campos de Lima

Nascido no Rio de Janeiro, RJ em 05 de outubro de 1956.

Graduação (1980) em Engenharia Elétrica: Universidade Federal Fluminense - UFF

Empresa: FURNAS Centrais Elétricas, desde 1980.

Gerente da Divisão de Análise da Proteção do Departamento de Estudos Elétricos