SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

GSC - 06
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

GRUPO X
GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO -

SOLICITAÇÕES IMPOSTAS EM DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO INSTALADOS PRÓXIMOS A USINAS GERADORAS

Marta Lacorte * — **ABB**
Angélica da Costa Oliveira Rocha — **CEMIG**
Luiz Henrique Silva Duarte — **CEMIG**

RESUMO

O artigo apresenta uma discussão sobre as solicitações impostas a disjuntores instalados próximos a usinas. As normas pertinentes a disjuntores para sistemas de transmissão são analisadas comparativamente com as normas dedicadas a disjuntores para geradores.

Simulações digitais envolvendo aplicações exemplos são desenvolvidas visando mostrar as solicitações mais importantes, bem como uma metodologia para definir os requisitos especiais pertinentes a esse tipo de aplicação.

PALAVRAS-CHAVE

Disjuntores, curto-circuito, usinas, disjuntor de gerador, tensão de restabelecimento

1.0 - INTRODUÇÃO

A aplicação de disjuntores de alta tensão em subestações de chaveamento de usinas tem sido uma prática nas últimas décadas. Em muitos casos, trata-se de uma solução sistematizada, baseada em aplicações anteriores, sem, contudo, uma análise adequada da aplicação.

Possivelmente, o histórico de sistemas elétricos com baixos níveis de curto-circuito, pouco malhados, com predominante geração hidráulica pode ter contribuído significativamente para o sucesso da maioria das aplicações.

Entretanto, em princípio, disjuntores de alta tensão instalados próximos a usinas geradoras são submetidos a solicitações diferentes a de disjuntores instalados em subestações de chaveamento no meio de um sistema elétrico afastadas de usinas geradoras.

Por exemplo, dependendo da potência dos geradores da usina, do tipo de arranjo da subestação secionadora e do instante do curto-circuito, a corrente pode apresentar uma assimetria tão elevada, inclusive não passando por zeros nos primeiros ciclos, condição básica para interrupção de correntes. Como conseqüência, pode ser experimentada a falha do disjuntor seguida de explosão.

O histórico recente de ampliações do número de interligações do sistema de transmissão brasileiro, e conseqüentemente, das unidades geradoras, aliadas a recentes otimizações dos projetos de disjuntores podem configurar um cenário onde as aplicações sistemáticas de disjuntores de alta tensão operando na proteção de vãos de geradores possam não corresponder de maneira satisfatória.

*Av. Monteiro Lobato 3285
07190-904 Guarulhos SP
Tel.: (011) 6464 8762 - Fax: (011) 6464 8793 - e-mail: marta.lacorte@br.abb.com

Contudo, não se pode afirmar que disjuntores convencionais não possam cumprir essa função, mas a aplicação deve ser adequadamente e preliminarmente analisada através de estudos de transitórios ainda na fase de planejamento.

É possível afirmar, entretanto, que existe uma tendência em aumentar no sistema brasileiro o número de aplicações que demandarão, sob o prisma técnico, a especificação de disjuntores dedicados a geradores.

Cabe ressaltar ainda, que um estudo completo de viabilidade técnico-econômica deve contemplar os custos finais da instalação, considerando manutenção, confiabilidade, disponibilidade e todas as eventuais vantagens comparativas existentes entre as soluções com disjuntores convencionais e de geradores.

Enfim, os esforços das equipes de engenharia em determinar a solução mais adequada para cada aplicação permite analisar os riscos de aplicação e visa garantir os resultados esperados para os empreendimentos de geração.

2.0 - HISTÓRICO

Os arranjos de usinas geradoras eram inicialmente com disjuntores no lado de baixa tensão do transformador, instalados entre o transformador e o gerador, como na Figura 1.

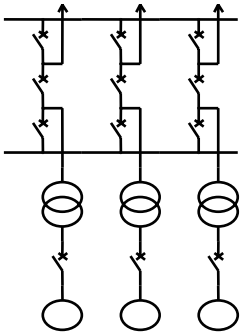


FIGURA 1: Arranjo de usina geradora utilizando disjuntor de gerador (GCB).

Entretanto, com o aumento da potência das máquinas, os disjuntores de média tensão disponíveis no mercado não atendiam mais os requisitos de forma a permitir arranjos de usinas com disjuntor de gerador, como o mostrado na figura 1.

Porém, devido principalmente a solicitação do mercado, disjuntores específicos para utilização como disjuntor de gerador, com capacidade para instalação em usinas geradoras de maior porte foram desenvolvidos.

Disjuntores específicos para aplicação com gerador são projetados para suportar os severos requisitos resultantes de chaveamentos próximos a usinas geradoras. Os requisitos técnicos de um disjuntor de gerador são diversos daqueles para disjuntores de alta ou de baixa tensão. Assim, as normas internacionalmente conhecidas, como **IEC 62271-100** ou **IEEE/ANSI C37.010** ou mesmo a **NBR 7118/1994**, não são aplicáveis para esta aplicação. A única norma existente para disjuntores de gerador é a norma **IEEE/ANSI C37.013-1997**.

A relação X/R em pontos do sistema próximos a usinas geradoras apresenta elevado valor, a corrente de curto-circuito possui, assim, alto grau de assimetria, podendo até resultar em corrente de curto-circuito com zeros atrasados. Em tal situação o zero da corrente de curto-circuito ocorre muitos ciclos após o início do curto-circuito. Porém, um disjuntor só é capaz de interromper uma corrente na passagem desta por zero.

A interrupção de uma corrente de curto-circuito começa com a atuação da proteção que envia um sinal de abertura do disjuntor. O disjuntor recebe a ordem de abertura da proteção, inicia o movimento dos contatos. Assim que os contatos se separam fisicamente um arco elétrico se estabelece entre contatos e a corrente continua fluindo. A corrente é, então interrompida na passagem por zero da corrente.

Em uma situação de corrente de curto-circuito com zeros atrasados, a passagem da corrente por zero ocorre muitos ciclos após a separação dos contatos. O disjuntor chega a sua posição de contatos totalmente abertos sem a que a corrente tenha passado por zero. O disjuntor não consegue interromper a corrente que continua fluindo. Quando a corrente finalmente passa por zero o disjuntor já esta na sua posição totalmente aberta. O arco que se estabelece quando da abertura física dos contatos do disjuntor não é extinto, a pressão interna da câmara cresce a valores que podem até levar a explosão da câmara.

A resistência do arco que se estabelece entre contatos é de grande importância. A resistência de arco pode ter um valor que leva a corrente a passar por zero permitindo a interrupção da corrente. A tecnologia de disjuntores de gerador utilizam da resistência de arco de forma a forçar a passagem da corrente por zero. Por isso estes disjuntores são capazes de interromper correntes com zeros atrasados.

A comprovação da capacidade de interrupção de uma corrente com zeros atrasados em um laboratório de teste é impossível. Desta forma a comprovação se faz por meio de simulação em computador utilizando programas de transitório como EMTP ou ATP. A resistência do arco do disjuntor é obtida em laboratório, a situação de ocorrência de corrente com zeros atrasados é simulada e comprovada se a corrente passa por zero antes do disjuntor atingir sua posição totalmente aberto.

A abertura de corrente de falta por disjuntores instalados próximos a usinas geradores foi tema de estudos realizados no passado. Principalmente quando da elaboração do projeto básico da usina de Itaipu /1/. Naquela época, os disjuntores de alta tensão já utilizavam gás SF6 como meio de extinção do arco elétrico e interrupção da corrente. Os disjuntores de gerador, entretanto, ainda utilizavam ar comprimido como meio de extinção do arco e interrupção da corrente. Desta forma os disjuntores de gerador eram de grande porte e complexidade , sendo os disjuntores de alta tensão mais compactos. Porém, estudos realizados demonstraram a preocupação com a atuação dos disjuntores de alta em situações de alta assimetria da corrente de curto-circuito. Para demonstrar a capacidade de interrupção de corrente com alto grau de assimetria, as resistência de arco dos disjuntores de alta foram determinadas em laboratórios e simuladas as situações de corrente de curto-circuito com alta assimetria. Apesar de utilizarem o gás SF6 como meio de extinção do arco, os disjuntores de alta tensão possuíam muitas câmaras em série. Desta forma a resistência de arco era elevada, possibilitando um atuação mais satisfatória em uma situação de corrente de curto-circuito com alto grau de assimetria. A tendência hoje em dia, porém, é de diminuir o número de câmaras e compactar os disjuntores de alta tensão. A resistência de arco é portanto menor, podendo não ser mais capaz de forçar uma passagem da corrente por zero.

Disjuntores de alta tensão são desenvolvidos para atuar em situações com menor grau de assimetria. A IEC e a ABNT correspondente especificam um grau de assimetria de 54%, correspondendo a uma constante de tempo da componente contínua da corrente de curto-circuito de 45 ms e X/R de 17. A nova versão da IEC e a ABNT que esta sendo traduzida, propõem dois outros valores de constate de tempo, 75 e 120 ms, justamente para cobrir aplicações próximas a usinas geradoras.

Em um estudo realizado pelo ONS /2/ no ano passado avaliou a superação dos disjuntores instalados no sistema brasileiro quando da entrada das térmicas no sistema. A entrada destas térmica resultará em um aumento da relação X/R, resultando em corrente com maior nível de assimetria. Neste estudo é sugerido um fator para avaliação do disjuntor quando testado segundo as normas IEC ou ANSI com um grau de assimetria baixo, mais comum em pontos do sistema distantes de usinas geradoras, para atuarem quando próximos de usinas geradoras.

Este fator é obtido pela comparação das energias de arco de cada situação. Isto é, o arco elétrico entre contatos tem uma energia que é igual a integral da corrente ao quadrado no tempo. Para comprovar a capacidade de interrupção com uma constante de tempo mais elevada, as duas energias de arco devem ser iguais. Assim:

$$\boxed{\int_{t_{0\tau}-t_{arco_\max}}^{t_{0\tau}} I_{\tau}^{2} \cdot dt \leq \int_{t_0-t_{arco_\max_\tau}}^{t_0} I_{45ms}^{2} \cdot dt}$$

Desta forma para constantes de tempo maiores que as das normas, igualando as energias por meio da formula acima obtemos o fator de redução da corrente nominal.

Outra característica de manobras de corrente próximas a usinas geradoras é a tensão de restabelecimento transitória TRT, que apresenta uma elevada taxa de crescimento (kV/μs).

Quando um disjuntor interrompe uma corrente, uma tensão se apresenta entre os contatos, a tensão de restabelecimento transitória.

Para que uma interrupção de corrente ocorra com sucesso o disjuntor deve interromper a corrente e suportar a tensão transitória entre seu contatos, sem restabelecimento da corrente.

Dependendo da carga interrompida e da posição do disjuntor no sistema, esta tensão de restabelecimento pode ser mais ou menos severa.

A tensão de restabelecimento transitória tem dois aspectos a serem considerados, o valor de crista e a taxa de crescimento. A taxa de crescimento é muito importante. A capacidade de suportar a tensão de restabelecimento pelo disjuntor depende da suportabilidade dielétrica entre contatos após a interrupção da corrente, ou da recuperação da suportabilidade. Assim a taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória é um fator decisivo para uma interrupção com sucesso.

A taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória em pontos do sistema próximos de usinas geradoras é muito mais elevada que aquelas resultante de manobras em pontos do sistema distantes de usinas geradoras.

A força tarefa 13.00.2 do grupo de CIGRE CE13 fez um estudo de TRT para disjuntor de gerador baseado em pesquisa de campo e resultados experimentais. Os resultados deste estudos estão no documento /4/.

3.0 - SIMULAÇÕES

Simulações utilizando o programa de transitórios ATP com dados reais de um ponto do sistema brasileiro foram realizadas.

Os dados de sistema da usina de Irapé do sistema Cemig foram considerado como base nas simulações.

A Usina Irapé possui um arranjo com uma linha de transmissão de aproximadamente 2 km entre a usina e a subestação de alta tensão.

As simulações foram realizadas considerando a presença da linha e também sem a linha, procurando simular situações mais típicas.

As simulações de manobras de abertura dos disjuntores foram realizadas com o programa ATP para as seguintes condições:

- Eliminação de falta
  - Abertura do disjuntor de alta
  - Abertura do disjuntor de gerador

As simulações demonstram o alto valor de assimetria da corrente de curto e o alto valor da taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória após a interrupção do curto-circuito.

O modelo utilizado nas simulações é mostrado na figura 3.

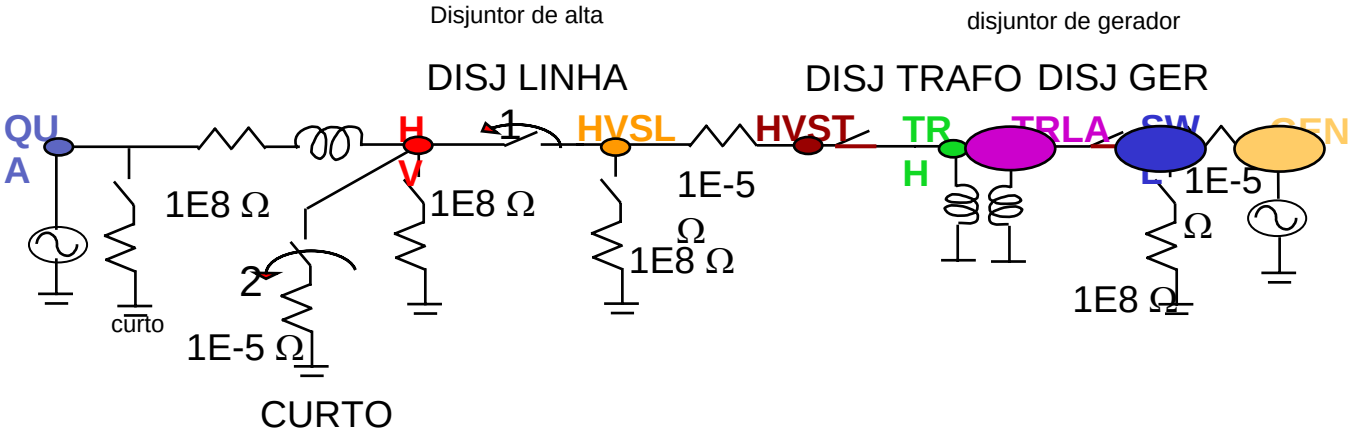


FIGURA 3 - modelo utilizado nas simulações

4.0 - METODOLOGIA

Nas simulações de eliminação de falta, foram analisadas faltas terminais trifásicas não aterradas do lado da linha, considerando-as já aplicadas em regime permanente.

Os geradores da Usina de Irapé foram representados, nessas simulações, pelo modelo 14 do ATP para simulação de abertura do curto-circuito e modelo 59 do ATP, que leva em conta as características transitórias desses equipamentos, para simulação da corrente de curto, sem interrupção.

Nas simulações, foram consideradas capacitâncias representativas da barra de 345kV, transformadores elevadores e a linha de transmissão que interliga a subestação à Usina.

5.0 - RESULTADOS

A tabela 1 apresenta os resultados das simulações de abertura da corrente de curto-circuito.

A taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória é apresentada para os casos com abertura do disjuntor de alta e de gerador.

A taxa de crescimento da tensão de restabelecimento após a interrupção da corrente pelo disjuntor de alta apresenta valores elevados, por outro lado quando esta mesma corrente é interrompida pelo disjuntor de gerador a taxa de crescimento da tensão de restabelecimento é bem menor.

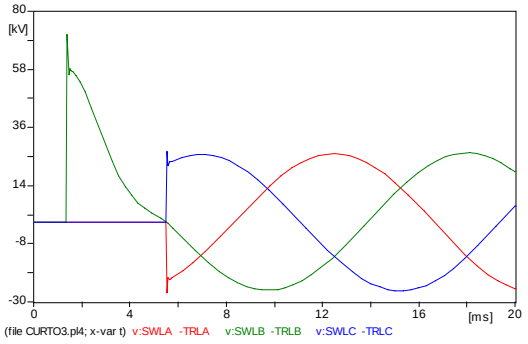
TABELA 1 - resultados das simulações de abertura da corrente de curto-circuito

				abertura do disjuntor de alta tensão						
Casos	Tensão de Crista E1 kV		Tempo (µs)		Tensão de Crista E2 k V		Tempo (µs)		TCTRT kV/µs	
Parâmetros TRT	com linha	sem linha	com linha	sem linha	com linha	sem linha	com linha	sem linha	com linha	sem linha
Fase A 3F Terminal	339	423	364	127	487	-	2490	-	0,9	3.3
Fase B 3F Terminal	269	388	210	85	562	-	622	-	1,3	4.6
Fase C 3F Terminal	483	294	606	84	483	353	606	2164	0.8	3.5

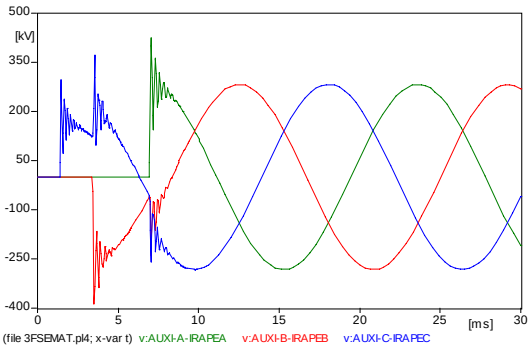
abertura do disjuntor de gerador

Casos	Tensão de Crista		Tempo		Tensão de Crista		Tempo		TCTRT	
Parâmetros TRT		sem linha		sem linha		sem linha		sem linha		sem linha
Fase A 3F Terminal		26.7		0.03		-		-		0.89
Fase B 3F Terminal		71.3		0.04		-		-		1.78
Fase C 3F Terminal		26.8		0.03		353		2164		0.89

As figuras 4 a e b apresentam os resultados das simulações de abertura do curto pelo disjuntor de alta e pelo disjuntor de gerador, respectivamente.



a) disjuntor de gerador



b) disjuntor de alta

FIGURA 4 - resultados das simulações de abertura do curto

A figura 5 apresenta a corrente de curto-circuito sem interrupção. O alto grau de assimetria é evidente.

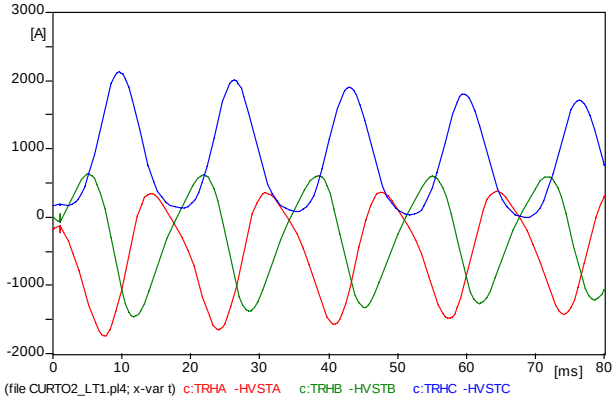


FIGURA 5 - corrente de curto-circuito sem interrupção

6.0 - CONCLUSÃO

Pelos resultados das simulações apresentados é possível observar que interrupção de curto-circuito próximo a usinas geradoras possuem características que devem ser investigadas com mais cuidado quando da definição do arranjo da usina e principalmente quando da especificação dos disjuntores.

Disjuntores de alta tensão devem ser questionados para atuarem em tais situações uma vez que estes não são projetados nem testados para atuarem em situações deste tipo.

Já os disjuntores de gerador não necessitam de maiores comprovações pois estes são projetados para atuarem em situações de curto-circuito próximas a usinas geradores. A norma de disjuntores de gerador segundo a qual o disjuntor de gerador deve ser projetado e testado cobre situações extremas de corrente de curto-circuito, com elevado grau de assimetria e taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória.

Os disjuntores de gerador além de serem mais adequados para interromper curto-circuito próximos a usinas geradoras apresentam vantagens de operação da usina e maior proteção par ao transformador e para o gerador.

Um curto circuito localizado entre o transformador e o gerador ou mesmo no transformador, é alimentado por duas fontes distintas. Uma componente do sistema e outra do gerador. A abertura do disjuntor do lado de alta do transformador elimina a contribuição do sistema para o curto-circuito. Porém, o gerador permanece alimentando o curto circuito durante o tempo de de-excitação do gerador. O curto permanece alimentado pelo gerador por mais alguns segundos podendo levar a explosão do transformador.
O disjuntor de gerador não pode impedir que ocorra o curto circuito, nem tampouco alterar a probabilidade de ocorrência de curto circuito. Porém, de toda forma a utilização de disjuntor de gerador elimina a possibilidade de danos conseqüente de maior porte , como ruptura do tanque do transformador, incêndio, impacto no meio-ambiente.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) Interrupção de Correntes de Falta com Zeros Atrasados pelos disjuntores de 550 kV de Foz de Iguaçu , Sergio Morais, Erich Ruoss, Rui Mendes, VII SNPTEE, Brasília, 1983.

(2) Critérios para Verificação de Superação de Disjuntores e Equipamentos Associados devido ao Aumento da Relação X/R do Sin, Antonio Carlos Carvalho, Roberto Rocha, SEPOP, Rio de Janeiro, 2004

(3) CIGRE CE13, Generator circuit-breaker Transient recovery voltage in most severe short-circuit conditions, ELECTRA N°113

(4) Análise das Sobretensões Transitórias das Manobras de Abertura dos Disjuntores da LT Irapé – Montes Claros 2 345 Kv, Angélica Costa O. Rocha, CEMIG, 2005