



GRUPO IV
GRUPO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA (GAT)

Vantagem da Utilização do Conceito CCC nos Esquemas em HVDC

Sergio Gomes Jr*
CEPEL

Nelson Martins
CEPEL

Wo Wei Ping
CEPEL

Antônio R. C. D. Carvalho
CEPEL

RESUMO

Este artigo apresenta as vantagens de utilização de conversores com capacitor de comutação (CCC), de sistemas em corrente contínua (HVDC), sob o ponto de vista de estabilidade de tensão e desempenho dinâmico. Para esta análise foram utilizados programas de fluxo de potência e de estabilidade transitória. São mostrados resultados referentes a uma interligação entre dois sistemas assíncronos por um elo de corrente contínua em *back-to-back* e uma linha de transmissão. Variou-se o comprimento da linha, reduzindo-se a potência de curto circuito do lado do inversor, procurando-se identificar o limite estático de estabilidade de tensão e o limite de estabilidade dinâmica do elo com capacitores de comutação e do elo convencional.

PALAVRAS-CHAVE

Capacitor de Comutação - CCC - Elo de Corrente Contínua - HVDC - Estabilidade

1.0 INTRODUÇÃO

A operação de sistemas de corrente contínua (HVDC) quando conectados a um sistema elétrico fraco no inversor é reconhecidamente problemática [1,2] e às vezes inviável. Entende-se por sistema fraco aquele em que a razão da potência de curto-circuito e a potência injetada pelo elo (SCR - *short-circuit ratio*) é baixa, em geral abaixo de 2.5. Artigos recentes sugerem a utilização de conversores com capacitor de comutação (CCC) para aplicações de baixo SCR [3,4].

O CCC possui um capacitor série entre a estação conversora e o transformador. O efeito do capacitor de comutação é de contribuir com uma tensão adicional sobre as válvulas, que faz com que seja possível utilizar ângulos de disparo e extinção menores nos retificadores e inversores respectivamente. Desta forma o consumo de potência reativa de uma estação conversora com capacitor de comutação é da ordem de menos de 15% do consumo de potência ativa, bem inferior ao de estações conversoras convencionais que é da ordem de 60%.

A utilização do capacitor de comutação reduz a necessidade de compensação reativa shunt, além de ser mais propício para a utilização em sistemas receptores com baixa relação de curto circuito (SCR), como é o caso do sistema analisado, tanto sob o ponto de vista de estabilidade de tensão como sob o ponto de vista dinâmico.

No trabalho serão apresentados os resultados da análise estática de estabilidade de tensão e da análise de desempenho dinâmico, considerando uma interligação entre dois sistemas assíncronos por um elo de corrente contínua em *back-to-back*. Comparou-se os resultados para os casos de utilização de CCC e de conversores convencionais. Maiores detalhes sobre análise estática de estabilidade de tensão estão em [5,6].

No estudo foram utilizados os programas ANAREDE (cálculo de fluxo de potência) e ANATEM (simulação de transitórios eletromecânicos), que já possuem o modelo do CCC implementado [7].

Considera-se que a relevância deste trabalho está em servir como base para estudos de estabilidade

envolvendo interligações entre o Brasil e outros países da América do Sul. Sistemas HVDC seriam necessários, uma vez que a frequência nominal do Brasil é de 60 Hz, enquanto que dos outros países vizinhos do Brasil, na região sul é de 50 Hz. Nesse caso os conversores com capacitor de comutação seriam aplicáveis, uma vez que os pontos de injeção previstos na Região Sul do Brasil geralmente possuem baixa relação de curto-circuito.

2.0 - SISTEMA DE POTÊNCIA UTILIZADO

A Figura 1 apresenta um diagrama unifilar do sistema exemplo deste artigo. A potência base do sistema em corrente alternada é 100 MVA. O sistema, visto do lado do retificador é representado por uma barra infinita, de tensão 1.02 pu, ligada a uma impedância X_R de 2.02% e uma linha de transmissão com parâmetros do π equivalente dados por: $R_1=0.135\%$ $X_1=1.488\%$ $B_1=135\%$. O inversor fornece uma potência de 1035 MW que alimenta uma carga $P+jQ=800+j100$ MVA e uma barra infinita, de tensão 1 pu. A linha de transmissão do lado do inversor é de 500 kV e é representada por uma cascata de π 's equivalentes, cada um representando trechos de 35 km de linha, com parâmetros: $R_2=0.0329\%$ $X_2=0.437\%$ $B_2=48.9\%$. A variação do comprimento da linha é analisada nos itens seguintes, considerando variações múltiplas de 35 km. A impedância X_{I1} que liga a linha à carga é de 1.5% e a impedância X_{I2} entre a carga e a barra infinita é também de 1.5%. O elo HVDC é um esquema em *back-to-back*, representado por 4 pontes de 6 pulsos (equivalente a 2 pontes de 12 pulsos), com 1100 MW de potência e tensão CC de 280 kV. Destaca-se a presença dos capacitores de comutação

entre as pontes conversoras e os transformadores.

Comparou-se o comportamento do elo convencional, isto é, sem capacitores de comutação e o elo com capacitores de comutação. Considerou-se um fluxo de potência em que a potência transmitida ao elo é de 1035 MW, o retificador CCC possui ângulo de disparo de $-5,7^\circ$, o inversor CCC possui ângulo de margem de comutação [3] de $21,7^\circ$. O capacitor de comutação considerado, para cada ponte de 6 pulsos, é de $850 \mu\text{F}$ e $420 \mu\text{F}$ para respectivamente o retificador e inversor. O reator de alisamento é de 200 mH e possui resistência de $0,4 \Omega$. Os transformadores do retificador e inversor, para cada ponte de 6 pulsos, possuem tensão base de 51.8 kV, potência base de 288 MVA e reatâncias de 12% (retificador) e 14.4% (inversor). Para estes dados, a potência consumida pelo retificador é de $1035+j54$ MVA, e a potência fornecida pelo inversor é de $1029.5+j40$ MVA (note que o inversor está gerando potência reativa).

No caso do elo convencional, o retificador possui ângulo de disparo de 15° e ângulo de extinção de 17° . O potência consumida pelo retificador é de $1035+j450.2$ MVA e a potência fornecida pelo inversor é de $1029.5-j503.3$ MVA.

Nota-se que o consumo de potência reativa nos conversores convencionais é muito maior, comparado com o consumo dos conversores com capacitor de comutação. Esta diferença de consumo deve ser suprida pelos equipamentos de compensação shunt B_{SHR} e B_{SHI} . A compensação shunt, tanto no elo convencional como no elo CCC, foi ajustada de forma que a tensão na barra de corrente alternada de cada conversor fosse igual a 1 pu.

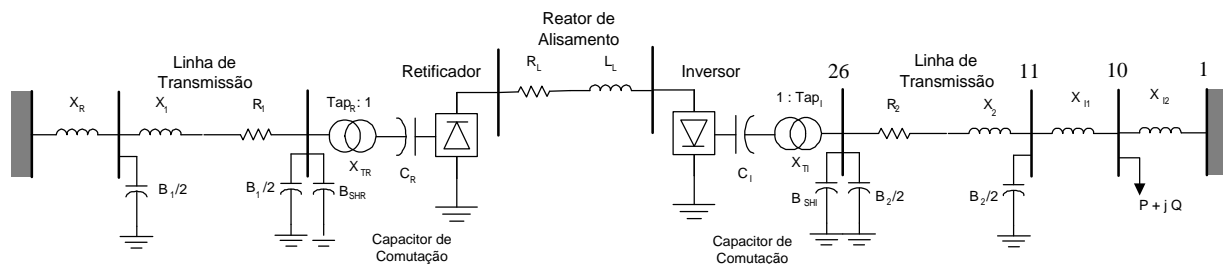


FIGURA 1 - Esquema HVDC back-to-back e sistemas CA. Os conversores convencionais não possuem capacitores de comutação.

3.0 - RESULTADOS DE ANÁLISE ESTÁTICA

Neste item fez-se uma análise do sistema exemplo, sob o ponto de vista estático, isto é, a partir de um programa de fluxo de potência (ANAREDE).

A análise consistiu em variar o comprimento da linha de transmissão, do lado do inversor, de forma a buscar

um limite estático de estabilidade de tensão. Este limite foi aqui definido como o ponto em que a sensibilidade de tensão em relação a uma variação de potência reativa torna-se negativa.

Os gráficos a seguir mostram as diversas grandezas em função da variação do comprimento da linha de transmissão no lado do inversor. Este comprimento foi variado de 35 km a 420 km.

Nas Figuras 2 e 3 apresenta-se o valor ajustado de compensação shunt B_{SHI} , no lado do inversor, para que a tensão na barra 26 fosse igual a 1 pu. A Figura 2 é relativa ao elo CCC e a Figura 3, ao elo convencional. Para o lado do retificador, para que a tensão da barra CA do mesmo fosse igual a 1 pu, a compensação shunt B_{SHR} utilizada foi 117 Mvar para o elo CCC e 514 Mvar para o elo convencional. Nota-se que para o elo CCC o nível de compensação necessária nos terminais dos dois conversores é bem menor.

Com a variação destas compensações shunt, em função do tipo do conversor e do comprimento da linha, o fluxo de potência do sistema de corrente alternada é igual para o elo convencional e o elo CCC.

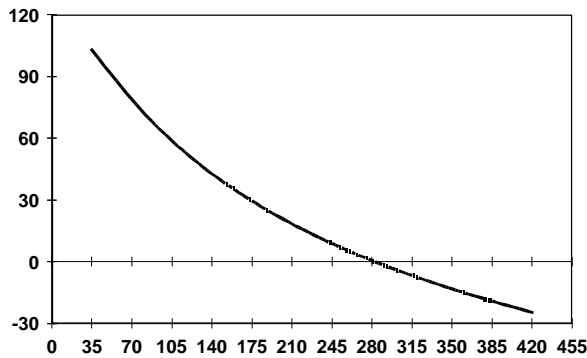


FIGURA 2 - Compensação shunt B_{SHI} (Mvar) em função do comprimento da linha (km) para o elo CCC.

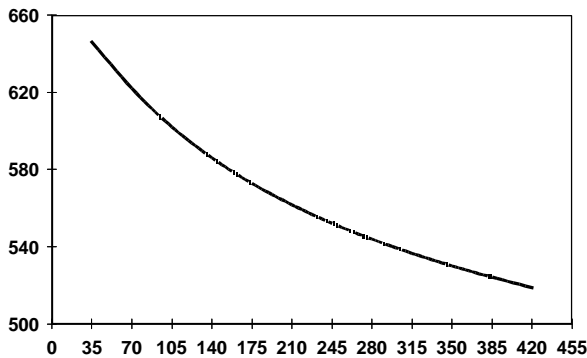


FIGURA 3 - Compensação shunt B_{SHI} (Mvar) em função do comprimento da linha (km) para o elo convencional.

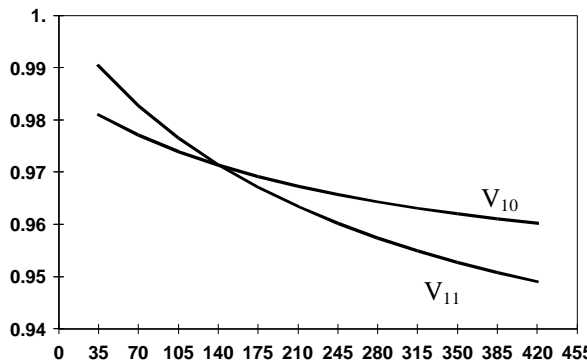


FIGURA 4 - Tensões (pu) nas barras 10 e 11 em função do comprimento da linha (km).

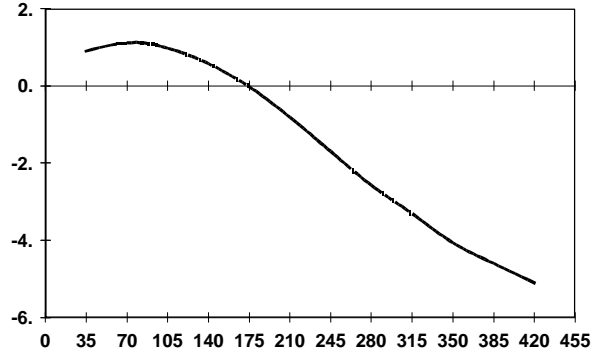


FIGURA 5 - Potência Reativa (Mvar) consumida pela linha em função do seu comprimento (km).

Na Figura 4 são apresentadas as tensões das barras 10 e 11. A potência reativa consumida pela linha é mostrada na Figura 5. Verifica-se que este valor é muito pequeno, pois a potência ativa transmitida é de valor próximo ao da potência característica (SIL) da linha.

Para a configuração dada, há uma outra solução para o fluxo de potência. A tensão da barra 26 para esta outra solução, que antes era 1 pu, é apresentada na Figura 6. O ponto de cruzamento das curvas com a tensão de 1 pu, em que o sistema só possui uma solução, é denominado um ponto de nó-sela e identifica o limite de estabilidade de tensão de uma análise estática. Neste ponto, há uma inversão do sinal da sensibilidade da tensão em relação a uma variação de potência reativa na barra. Se houver certos equipamentos dinâmicos, tais como transformadores com comutação de tap sob carga, compensadores estáticos de reativo, algumas cargas dinâmicas, etc., o sistema será instável se estes equipamentos estiverem em pontos cuja sensibilidade da tensão em relação à potência reativa é negativa.

As curvas de sensibilidade de tensão na barra 26, para uma variação infinitesimal de potência reativa nesta barra, são mostradas nas Figuras 7 (elo CCC) e 8 (elo convencional). Verifica-se que a inversão do sinal de sensibilidade de tensão ocorre para um comprimento de linha em torno de 180 km para o elo convencional e 380 km para o elo CCC, mostrando que o elo CCC é menos propenso a causar colapso de tensão. Quando há a inversão do sinal das sensibilidades, a mesma passa de infinito a menos infinito. As curvas tracejadas apresentadas nas Figuras 7 e 8 procuram indicar as assíntotas em que as sensibilidades tornam-se infinitas.

Convém ressaltar, que dependendo do comprimento da linha, não é tecnicamente possível operar na outra solução (tensão da barra 26 diferente de 1 pu), quando esta possui sensibilidade positiva, uma vez que o nível

de tensão torna-se muito alto, com o crescimento do comprimento da linha.

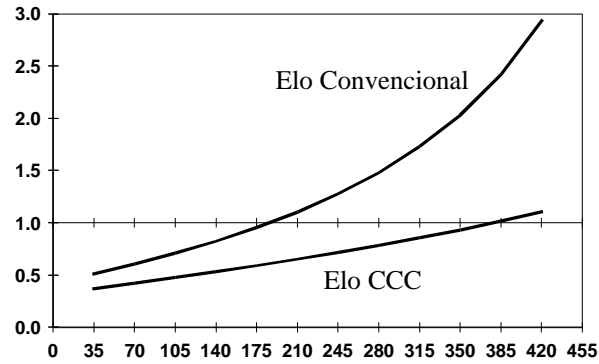


FIGURA 6 - Tensão da barra 26 (pu) da solução de tensão diferente de 1 pu em função do comprimento da linha (km).

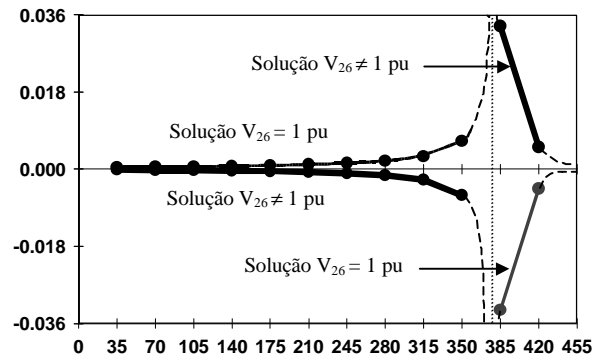


FIGURA 7 - Sensibilidade $\partial V/\partial Q$ (pu/Mvar) da barra 26 em função do comprimento da linha (km) para o elo CCC.

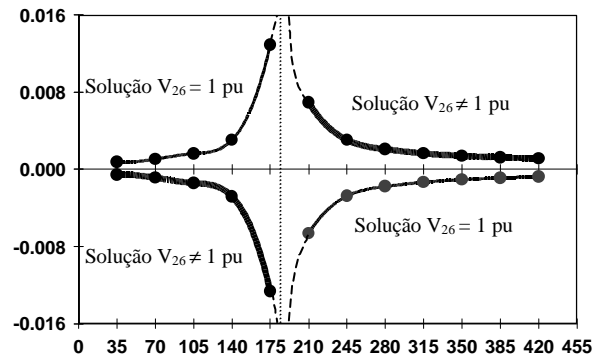


FIGURA 8 - Sensibilidade $\partial V/\partial Q$ (pu/Mvar) da barra 26 em função do comprimento da linha(km) para o elo convencional.

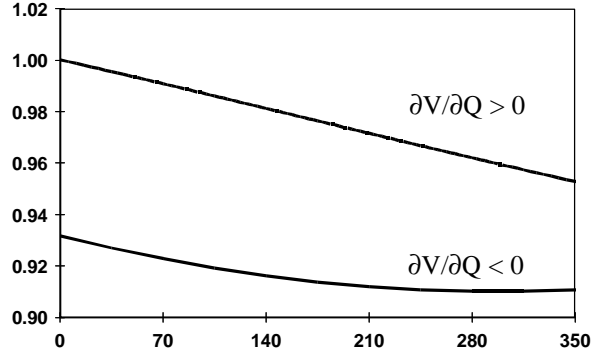


FIGURA 9 - Tensão ao longo da linha, para um comprimento de 350 km, elo CCC.

A Figura 9 apresenta o perfil de tensão, ao longo de uma linha de 350 km de comprimento, elo CCC, para as duas soluções do fluxo de potência. Mesmo considerando que a linha está transmitindo aproximadamente a potência característica, devido à sua resistência, há uma queda de tensão considerável, ao longo da linha.

4.0 - RESULTADO DAS SIMULAÇÕES

Neste item são mostrados os resultados de simulação do programa ANATEM para os elos convencional e CCC. A estrutura de controle do elo convencional é semelhante à do elo de Itaipu, enquanto que para o CCC utilizou-se uma estrutura de controle sugerida pela ABB. Ambos os conversores tiveram os seus parâmetros de controle otimizados em função do comprimento da linha.

O modelo dinâmico do sistema, cujas simulações são mostradas a seguir, não é completamente compatível com o utilizado no fluxo de potência. Isto se deve à modelagem dinâmica do sistema se restringir a efeitos de mais curta duração, não refletindo o comportamento do sistema a longo termo

Não é objetivo deste item estudar o fenômeno de colapso de tensão do ponto de vista dinâmico, o que iria requerer a modelagem dinâmica da carga e dos controles de tap dos transformadores. O objetivo deste item é confirmar que o esquema HVDC/CCC também resulta em um comportamento dinâmico de curta duração mais adequado que o obtido com o esquema HVDC convencional.

Sabe-se que reduzindo-se a potência de curto-circuito do sistema AC no lado do inversor, pode-se tornar o sistema instável devido à dinâmica do elo. Para o CCC, verificou-se que o caso de linha com 14 trechos de 35 km (490 km) é estável, embora oscilatório e o caso com 15 trechos de 35 km (525 km) é instável. Para o elo convencional, o caso com 8 trechos (280

km) é estável oscilatório e o caso com 9 trechos (315 km) é instável.

A seguir são mostrados os casos dos elos CCC e convencional que estão próximos ao limite de estabilidade. As Figuras 10 e 11 apresentam a resposta no tempo da corrente contínua do elo (I_d), para a aplicação de um degrau de 1% na ordem de corrente. O comprimento da linha considerado na simulação do elo CCC é de 490 km e na simulação do elo convencional é de 280 km. Na Figura 12 é apresentado o resultado da mesma simulação para o elo CCC, considerando a linha com 420 km. O elo CCC é estável e bem amortecido, enquanto que o elo convencional, a partir de 315 km é instável, como mostrado na Figura 13.

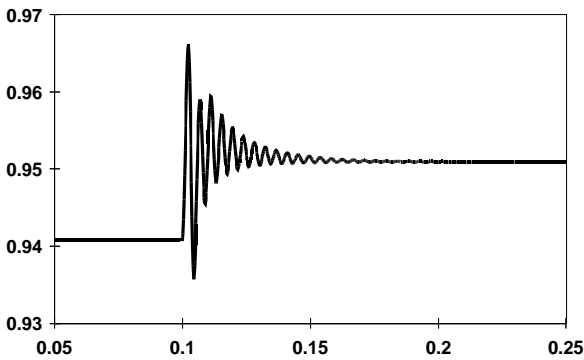


FIGURA 10 - Corrente I_d (pu) para um degrau de 1% na ordem de corrente do elo convencional, linha de 280 km.

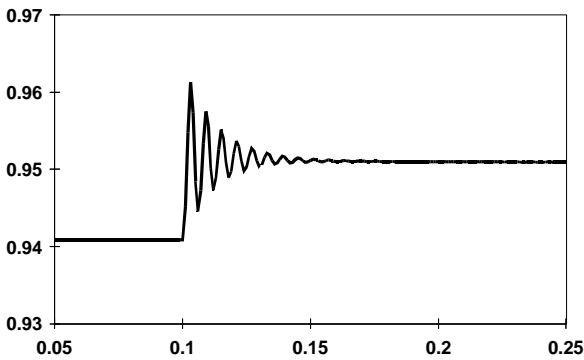


FIGURA 11 - Corrente I_d (pu) para um degrau de 1% na ordem de corrente do elo CCC, linha de 490 km.

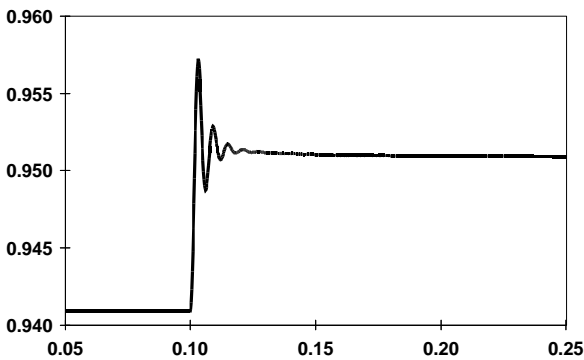


FIGURA 12 - Corrente I_d (pu) para um degrau de 1% na ordem de corrente do elo CCC, linha de 420 km.

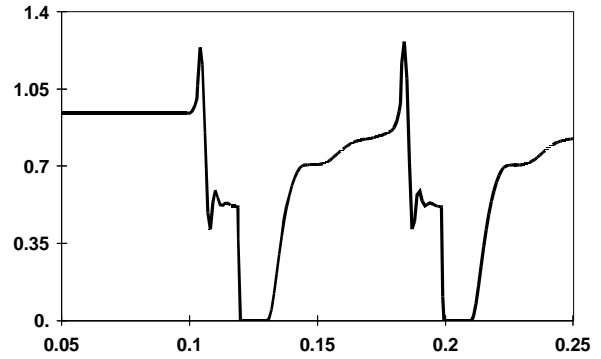


FIGURA 13 - Corrente I_d (pu) para um degrau de 1% na ordem de corrente do elo convencional, linha de 315 km.

A seguir são mostrados os resultados de curto-circuito trifásico na barra CA do inversor, para a linha de 420 km, para o elo CCC. O elo convencional, como visto na Figura 13, é instável para comprimentos de linha superiores a 350 km.

As Figuras 14 a 17 apresentam as variáveis tensão alternada da barra terminal do inversor (V_{ac}), corrente contínua (I_d), ângulo de disparo do retificador (α), tensão contínua do inversor (V_{dc}) para o curto-circuito trifásico franco na barra 26 (barra do inversor). Após 100 ms, a falta é retirada. Verifica-se que o elo é estável para a simulação do curto-circuito, recuperando de forma rápida e sem oscilações pouco amortecidas.

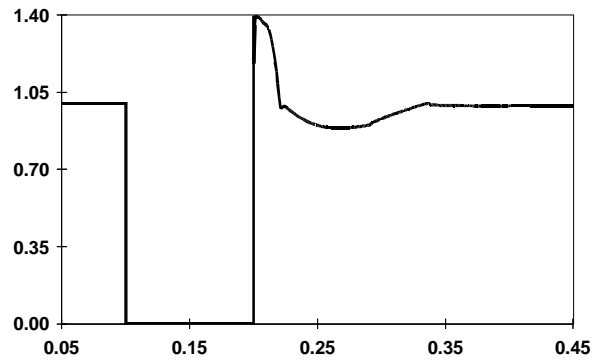


FIGURA 14 - Tensão V_{ac} (pu) para uma falta no inversor, elo CCC, linha de 420 km.

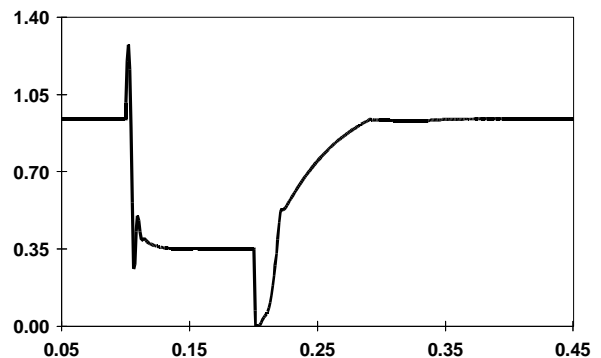


FIGURA 15 - Corrente I_d (pu) para uma falta no inversor, elo CCC, linha de 420 km.

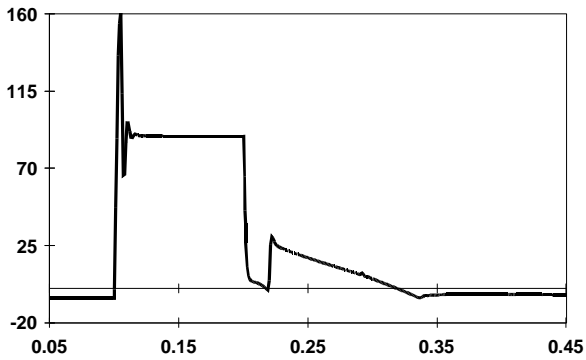


FIGURA 16 - Ângulo α (graus) para uma falta no inversor, elo CCC, linha de 420 km.

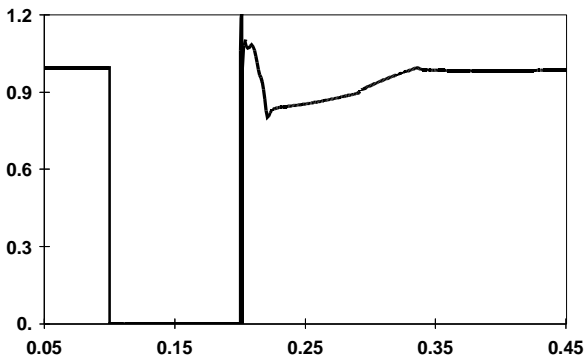


FIGURA 17 - Tensão V_{dc} (pu) para uma falta no inversor, elo CCC, linha de 420 km.

Nota-se que há uma sobretensão na barra AC do conversor (pouco menor que 1.4 pu), porém de curta duração (menor que 20 ms). Esta sobretensão ocorre devido ao grande comprimento da linha. Quando o elo tem baixa corrente (ver Figura 15), ele injeta pouca potência no sistema CA. Desta forma, a linha trabalha em vazio durante este pequeno período de tempo (≈ 20 ms) após a retirada do curto-circuito, causando a sobretensão.

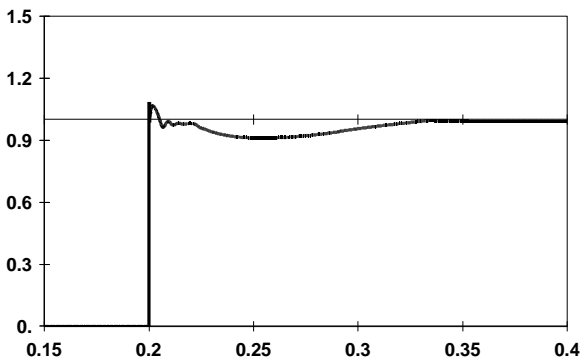


FIGURA 18 - Tensão V_{ac} (pu) para uma falta no inversor, elo CCC, linha de 140 km.

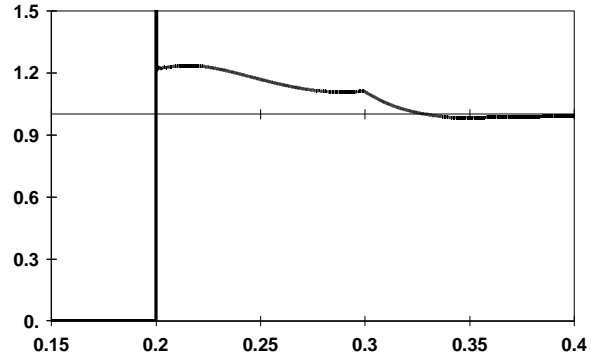


FIGURA 19 - Tensão V_{ac} (pu) para uma falta no inversor, elo convencional, linha de 140 km.

Convém ressaltar que o elo CCC tende a produzir menores sobretensões pois a compensação shunt é bem menos capacitiva que no caso do elo convencional. Para que fosse possível comparar a sobretensão da barra 26 para o caso do elo convencional e do elo CCC, considerou-se uma linha de comprimento de 140 km, pois neste caso ambos os elos são estáveis. Nas Figuras 18 e 19 são apresentadas as tensões da barra 26 para os dois casos de elos. Nota-se que enquanto no elo CCC não houve praticamente sobretensão, no elo convencional houve uma sobretensão de curtíssima duração de 1.5 pu e, logo após, uma sobretensão que varia de 1.2 pu a 1.1 pu por aproximadamente 100 ms.

5.0 - CONCLUSÕES

O elo CCC, comparado com o elo convencional possui maior limite estático de estabilidade de tensão e maior limite de estabilidade dinâmica, para uma variação no comprimento da linha no inversor.

Além disso, o elo convencional necessita de uma compensação shunt bem maior nas barras dos conversores que, além de representar maiores custos, fazem com que haja maiores sobretensões transitórias no sistema.

Considerando que a importação de energia pelo Brasil de países vizinhos deve ser assíncrona, devido à diferença entre as frequências de operação nos dois sistemas, e considerando que esta interligação seria feita em pontos extremos do sistema, em que a potência de curto-circuito normalmente é muito baixa, os elos com capacitores de comutação apresentam-se como uma ótima alternativa de projeto.

6.0 - BIBLIOGRAFIA

[1] CIGRÉ WG 14.07; IEEE WG 15.05.05 - *Guide for Planning DC Links Terminating at AC Systems Locations Having Low Short-Circuit Capabilities*, CIGRÉ, Paris, França, Junho 1992.

[2] Pillotto, L. A. S.; Szechtman, M.; Hammad, A. E. - *Transient AC Voltage Related Phenomena for HVDC Schemes Connected to*

Weak AC Systems, IEEE Summer Meeting, San Diego, USA, Julho 1991.

[3] **Jonsson, T.; Björklund, P-E.** - *Capacitor Commutated Converters for HVDC*, IEEE/KTH Stockholm Power Tech Conference, Stockholm, Sweden, June 1995.

[4] **Carlsson, L. C.; Persson, A.; Jonsson, T.; Liss G.; Björklund, P-E.** - *New Concepts in HVDC Converter Station Design*, CIGRÉ, 1996.

[5] **Pilotto, L. A. S.; Szechtman, M.; Salgado, E.** - *Análise de Estabilidade de Tensão em Sistemas de Transmissão em Corrente Contínua*, IX SNPTEE, Belo Horizonte, Brasil, 1987.

[6] **Wey, A.** - *Operation of AC Systems Interconnected to DC Links: Voltage Instability and Collapse Analysis*, in Proceedings of I Symposium of Specialists in Electrical Operation and Expansion Planning, Brasil, 1987.

[7] **Gomes Jr., S. ; Martins, N.; Ljungqvist, R.; Jonsson, T.; Pinto, H. J. C. P.; Rangel, R. D.; Carvalho, A. R. C. D.** - *Modeling ABB's HVDC/CCC into the CEPEL Simulation Package*, in Proceedings of VI Symposium of Specialists in Electrical Operation and Expansion Planning, Salvador, Brasil, 1998.