

EFEITOS DOS ELOS DE TRANSMISSÃO DE CORRENTE CONTÍNUA NA ESTABILIDADE TRANSITÓRIA DOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

J. R. Cogo
IEE-EFEI

J. E. M. de La-Rocque
DE - UFPA

Artigo apresentado no Seminário de Pesquisa EFEI - 1983

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo apresentar os resultados da inclusão dos efeitos dinâmicos de Elos de Corrente Contínua desenvolvido pelas empresas de consultoria e de energia elétrica no programa de estabilidade transitória da EFEI. O estudo foi conduzido no sentido de incluir Elos de Transmissão em Corrente Contínua num sistema de corrente alternada, somente para transmissões ponto-a-ponto omitindo-se a possibilidade de inclusão de interconexões DC à multiterminais e a sistemas de frequências diferentes. A utilização deste é propícia em estudos de planejamento de sistemas AC/DC.

ABSTRACT

This paper has the purpose of presenting the inclusion of D.C. links dynamics effects, developed by consultants on EFEI Transient Stability Program. The study was conducted in order to include DC transmission links on an AC System, only for transmission point to point, being omitted the possibility of inclusion of DC ties to multiterminals and different frequencies systems. Its utilization is suitable for AC/DC planning studies.

1. INTRODUÇÃO

Uma das principais características da atuação dos Elos de transmissão em corrente contínua (Elos DC) é o reforço que os mesmos oferecem ao amortecimento de oscilações eletromecânicas, entre máquinas síncronas componentes de uma rede de corrente alternada.

A maneira pela qual este reforço é efetuado, baseia-se no princípio da modulação de potência transmitida pelo elo, de modo a aumentar ou diminuir o fluxo de potência quando de uma aceleração ou desaceleração de determinadas máquinas do sistema.

Neste artigo, está indicada a experiência obtida na inclusão da representação dinâmica de Elos DC em um programa de estabilidade transitória, no caso, o da EFEI [1].

2. FILOSOFIA DO CONTROLE PARA ANÁLISE DA ESTABILIDADE TRANSITÓRIA USADA NO PROGRAMA DESENVOLVIDO

Os programas de estabilidade transitória em geral são compostos basicamente de duas partes principais, que trocam informações continuamente: a resolução das equações da rede ("solução direta da rede") e a resolução no tempo das equações diferenciais das máquinas.

Na simulação dos elos DC tem-se da mesma maneira duas atividades principais:

- i - o ajuste dos parâmetros de regime dos elos, face a resolução das equações AC;
- ii - a determinação da potência a ser transmitida pelos elos, face às variações da frequência nas barras conversoras.

A implementação desta filosofia busca resolver as partes AC e DC separadamente, isto é, a cada iteração a rede AC fornece os valores de tensão para as rotinas DC, e estas, por sua vez, calculam os valores de potências ativa e reativa nas barras conversoras fixando-as como cargas para o sistema AC.

Em estudos de fluxo de cargas nos quais os valores das tensões estão sempre próximos do valor nominal a representação da característica estática ($V_d \times I_d$) dos Elos de Corrente Contínua, pode ser efetuada de maneira relativamente simples.

Neste caso, no entanto, tal fato não ocorre.

Na simulação de defeito (falta trifásica ou monofásica) e, mesmo após sua eliminação, ocorrem em geral grandes variações na tensão das diversas barras do sistema. Torna-se de fundamental importância, portanto uma representação tão detalhada quando possível da característica de atuação dos elos, perante essas variações.

Sob o ponto de vista do sistema AC, os elos DC tem um comportamento equivalente ao de uma carga de potência ou corrente constante, conforme o tipo de controle empregado. E é desta maneira, nesta filosofia de controle, que a rotina de solução da rede AC deve considerar os equivalentes (P, Q) referentes ao elo.

É sabido, que cargas de potência ou corrente constantes apresentam um comportamento "pior" que às de impedância constante sob o ponto de vista de estabilidade. Sendo assim, o desempenho dos elos DC fica, em princípio, prejudicado principalmente no que se refere ao período transitório (vizinhanças dos instantes de aplicação e eliminação das faltas), em que os elos DC podem provocar maiores oscilações

relativas entre máquinas do sistema AC, quando da realização de estudos comparativos de sistemas com elos DC e sistemas sem elos DC.

3. REPRESENTAÇÃO DA CARACTERÍSTICA ESTÁTICA DOS ELOS DC

A característica de operação $V_d \times I_d$, corresponde a representação do controle físico principal existente no elo DC. Por isto, o projeto da mesma depende, exclusivamente, do fabricante. Havendo inclusive muitos pontos polêmicos que um ou outro fabricante interpreta de maneira distinta.

As hipóteses assumidas e raciocínios empregados neste trabalho são válidos basicamente para regime permanente e transitórios não rápidos.

Para operação a dois terminais, a característica utilizada neste trabalho é a indicada na FIGURA 1, extraída da literatura técnica [5]. O fluxograma usado para desenvolver esta característica, é mostrado na FIGURA 2 [2].

A característica do retificador é formada pelas curvas 1, 4, 6 e 8.

A característica do inversor é formada pelas curvas 2, 3, 5, 7 e 8.

O ponto de operação normal P_O é determinado pelo cruzamento das curvas 4 (controle de corrente no retificador) e 2 (controle do ângulo de extinção no inversor). O modo de operação do mesmo, bem como, uma rotina para efetuar-se o controle básico pode ser encontrada em [2] e [5].

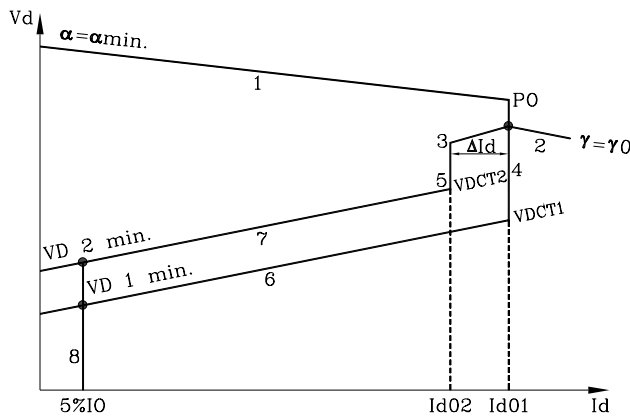


FIGURA 1 - Característica estática $V_d \times I_d$ [5] e [2]

Na FIGURA 1 percebe-se que o controle de corrente pode ser definido pela estação retificadora (curva 4, na FIGURA 1), ou inversora (curva 5, na FIGURA 1). Tem-se ainda a possibilidade de efetuar-se o “controle do erro de corrente” (CEC) (curva 3, na FIGURA 1).

Se a tensão na estação inversora cair abaixo de um valor mínimo (VDCT1) necessário para manter a ordem de corrente (I_{d01}), o controle reduzirá a ordem

de corrente até encontrar um ponto de operação estável para o elo DC (curva 6, na FIGURA 1).

Neste caso caracteriza-se o modo de operação “com tensão reduzida no inversor”.

Quando o inversor está controlado a corrente na linha DC, e tensão na estação retificadora começa a cair passando de um valor mínimo (VDCT2), necessário para manter a ordem da corrente (I_{d02}), o controle reduzirá a ordem de corrente até encontrar um ponto de operação estável para o elo DC (curva 7, na FIGURA 1).

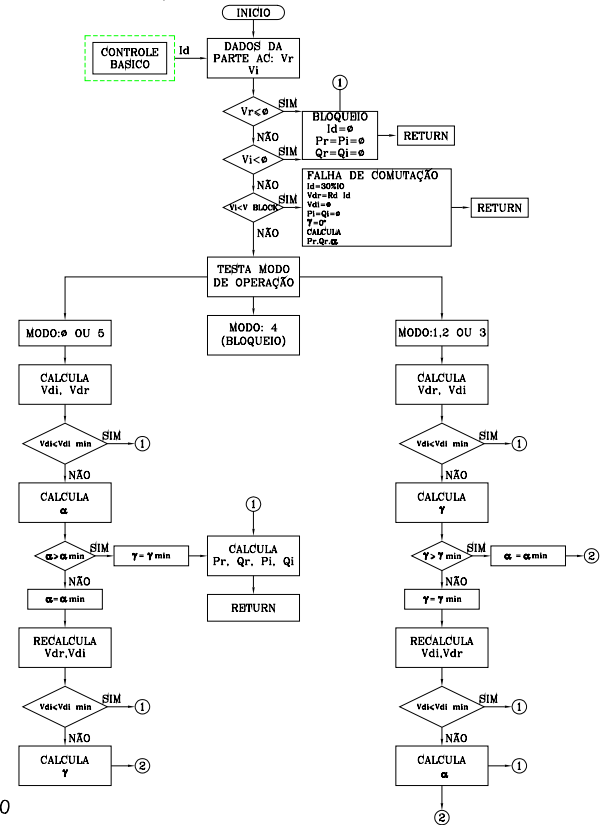


FIGURA 2 - Fluxograma para rotina de solução do elo DC [2].

Neste caso tem-se o modo de operação “com tensão reduzida no retificador”.

Em todos os modos de operação citados anteriormente, se a tensão de operação do elo DC (VDOP) cair abaixo dos valores mínimos de tensão para desligamento do elo VD1MIN e VD2MIN ou a corrente no elo cair abaixo de 5% da corrente nominal, o elo automaticamente será desenergizado.

A ordem de corrente calibrada para o terminal retificador (I_{d01}) deve ser maior que a do inversor (I_{d02}). A diferença entre estas correntes denomina-se “margem de corrente - ΔI_d ”. Este método pressupõe que em nenhum momento o valor de $\Delta I_d = I_{d01} - I_{d02}$ possa assumir valores nulos ou negativos. A transição do controle de corrente do retificador para o inversor pode ser feita segundo a curva 3 (FIGURA 1). Esta curva é comumente denominada “corrente de erro de corrente (CEC)”, tendo sua necessidade sido detectada

primeiro por J.D. Ainsworth [3], dada a possibilidade do aparecimento da “Instabilidade dos três pontos” (Three-point crossover instability).

As curvas 6 e 7 são acionadas quando da redução das tensões DC, por ocasião de faltas. Ambas possuem como intuito principal a diminuição do fluxo de corrente DC.

4. ROTINA PARA SOLUÇÃO DO ELO DC

Normalmente representa-se Elos de transmissão em corrente contínua e respectivos controles principais.

Para simulação digital do sistema de controle da FIGURA 1, utilizou-se o modelo desenvolvido na literatura [5] visando a representação do elo.

Um fluxograma simplificado desta rotina é apresentado na FIGURA 2.

As equações utilizadas para o cálculo das potências injetadas pelo elo DC, podem ser obtidas em [2], [5] e [6].

5. MODULAÇÃO OU “DAMPING CONTROL”

Modular um sistema híbrido AC/DC, é alterar a ordem de potência (ou corrente) do elo DC, segundo parâmetros representativos das perturbações do sistema AC. O elo DC auxilia sua parte AC da seguinte maneira: Se a frequência do sistema AC aumentar, o elo DC deve injetar menos potência no lado AC. Se a frequência do sistema AC diminuir, o elo DC deve injetar mais potência no lado AC.

Esta variação na potência do elo DC é conseguida através da modulação de sua potência, por um sistema de controle, em resposta a qualquer sinal que dê uma indicação do estado do sistema AC. Como exemplo pode-se citar: variação da frequência do sistema, variação dos ângulos de fase das barras do sistema, mudanças de velocidade das máquinas do sistema, variação da frequência das barras do sistema, etc.

Neste trabalho o sinal utilizado para modulação do elo DC, foi a variação da frequência das barras das estações conversoras.

Na FIGURA 3 apresenta-se um diagrama de interação ([2], [5]) da modulação com a ordem de corrente. Assumindo-se que o controle principal (“Master Control”) esteja situado junto ao terminal inversor, que é o caso no qual o sistema gerador é uma usina isolada (caso de Itaipu).

A ordem I_d tem de atingir ambas as estações “simultaneamente”, principalmente se ela atuar no sentido de diminuir a margem de corrente.

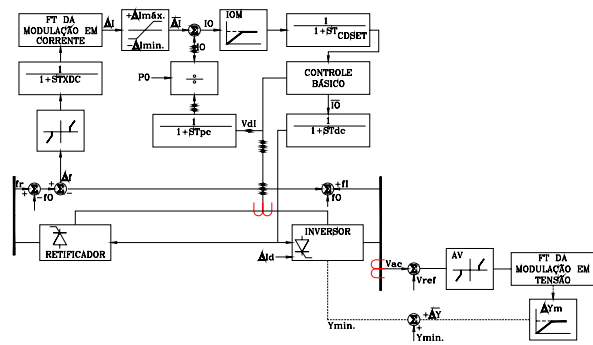


FIGURA 3 - Diagrama simplificado do “Máster Control” [5] e [6]

6. FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DA MODULAÇÃO

Observou-se, na elaboração do modelo matemático, a prioridade em relação à flexibilidade na escolha da função de transferência com a finalidade estabelecida no item anterior.

A função de transferência escolhida, tem a seguinte forma geral [2] e [5].

$$FT = \frac{KS (1 + ST4)}{(1 + ST1) (1 + ST2) (1 + ST3)}$$

- Esta função varia desde o tipo mais simples
- $\frac{KS}{1 + ST1}$; até outros mais complexos
 - $\frac{KS (1 + ST4)}{(1 + ST1) (1 + ST2)^2}$.

Como no programa é desejável que cada função apresente duas características combinadas: forte atuação no início e fraca retenção ao longo do tempo. A função do tipo (b), a estas características satisfaz plenamente.

Faz-se necessário ressaltar que nem sempre características com polo duplo são fundamentais à estabilização do sistema global. Entretanto, na maioria dos casos as funções com polo duplo proporcionam um maior amortecimento para o sistema global.

7. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Como o objetivo deste trabalho é obter informações da experiência adquirida na implementação do modelo de Elo de Transmissão de Corrente Contínua para programa de estabilidade eletromecânica escolheu-se para teste, o sistema mostrado na FIGURA 4, com a finalidade de aquilatar e comprovar os resultados obtidos.

Discute-se a estabilidade transitória do sistema quando um curto circuito trifásico é aplicada na barra 3, através de uma impedância de falta $ZF = 0 + j0,01$ [pu] durante 100 [mseg].

As curvas obtidas para 3 máquinas do sistema (barral, barra 4 e barra 11), estão apresentadas nas FIGURAS 5 a 10.

Baseado nas FIGURAS, nota-se claramente um amortecimento, consideravelmente mais acentuado, nos sistemas com modulação, em particular, aqueles com polo duplo na função de transferência.

Por serem os elos DC semelhante a cargas de potência ou corrente constante, a modulação praticamente não afeta o 1º swing das máquinas (até aproximadamente 1.5 seg) pode inclusive piorá-lo, e, desde que a modulação seja devidamente ajustada, o comportamento dinâmico do sistema, (2º swing em diante), melhora sensivelmente. Entretanto, o comportamento transitório pode ser modificado, com o ajuste de outros parâmetros do sistema, sejam estes em corrente alternada ou com os elos de corrente contínua.

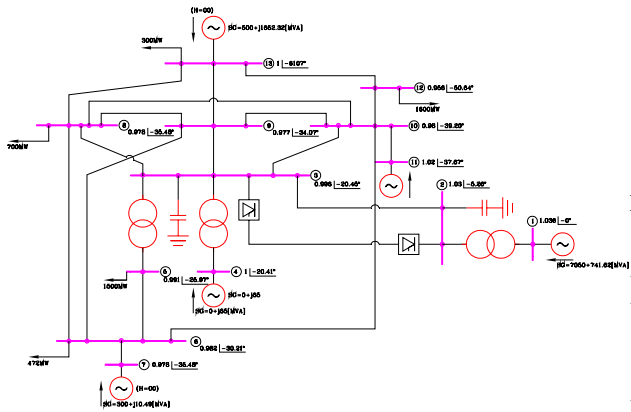


FIGURA 4 - Caso Base de Fluxo de potência do sistema. Potência ativa dada em [MW] e potência reativa em [MVar]

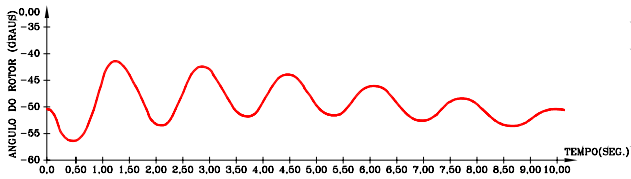


FIGURA 5 - Característica $\delta = f(t)$ (barra 4), sem modulação DC

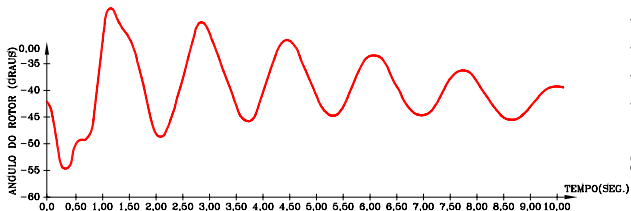


FIGURA 6 - Característica $\delta = f(t)$ (barra 11), sem modulação DC

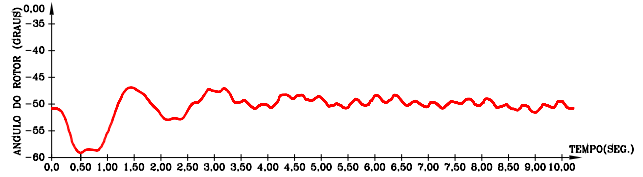


FIGURA 7 - Característica $\delta = f(t)$ (barra 4), com modulação combinada de potência e tensão DC - Função de transferência: F3 - Sinal de entrada: tensão e variação de frequência - Modulação de potência: $K_c = 400, T_1 = 0,038, T_2 = T_3 = 0,11$ - Modulação de tensão: $K_g = 400, T_1 = 0,058, T_2 = T_3 = 0,018$

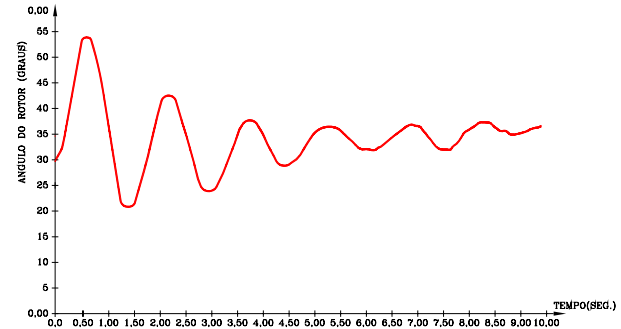


FIGURA 8 - Característica $\delta = f(t)$ (barra 1), com modulação combinada de potência e tensão DC

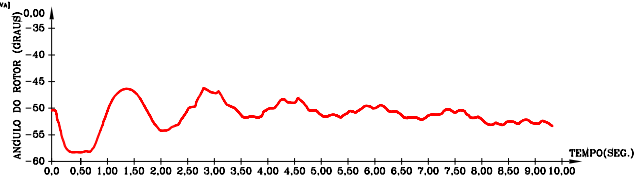


FIGURA 9 - Característica $\delta = f(t)$ (barra 4), com modulação combinada de potência e tensão DC

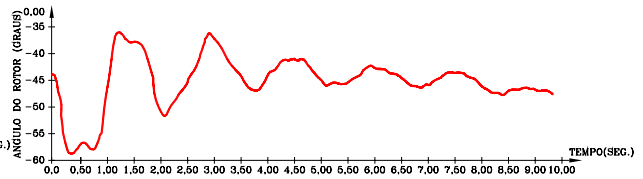


FIGURA 10 - Característica $\delta = f(t)$ (barra 11), com modulação combinada de potência e tensão DC

- Função de transferência: F2
- Sinal de entrada: tensão e variação de frequência
- Modulação de potência: $K_c = 400, T_1 = 0,038, T_2 = 0,001$
- Modulação de tensão: $K_g = 400, T_1 = 0,058, T_2 = 0,008$

8. BIBLIOGRAFIA

[1] CHULL G. SHIN - "Simulação Digital para Estudos de Estabilidade Transitória e Rejeição de Carga em Sistemas Elétricos de Potência", Tese de Mestrado, EFEI, 1981, Itajubá /MG - Brasil.

- [2] JOSÉ EDISON M. DE LA-ROCQUE - “Implementação de um Modelo para o Elo de Transmissão em Corrente Contínua em um Programa de Estabilidade Transitória”, Tese de Mestrado, EFEI, 1983, Itajubá-MG-Brasil.
- [3] CARTER, G. K; GRUND, C.E; HAPP H. H; POHL, R. Y - “The Dynamics of AC/DC Systems with Controlled Multi-Terminal HVDC Transmission IEEE TES Summer Meeting, Portland Oregon, Julho/1976, (Discussão de J.D. Ainsworth).
- [4] JOTTEN, R; BOWLES, J. P; LISS, G; MARTIN, C. J. B; RUPINS, E - “Control em HVDC Systems the State of the Art. Part I: Two Terminal System”, Cigré, Report 14-10, agosto/1978.
- [5] SZECHTMAN, M; QUARINE, A.T; SOBRINHO, E.S - “Programa de Estabilidade Eletromecânica - Versão D.C” - Rel. Final - CEPEL - 07/79.
- [6] 36 - LOPES, J.C - “Modelagem de Ligações em Corrente Contínua” , Tese de Mestrado, COPPE - UFRJ, Rio de Janeiro, 1982.