



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

**UMA NOVA METODOLOGIA PARA ESTUDO DE TRANSITÓRIOS NUM SISTEMA DE TRANSMISSÃO**

**Carlos Medeiros Portela  
COPPE/UFRJ**

**Maria Cristina Tavares \*  
FEEC/UNICAMP**

**RESUMO**

No presente trabalho é mostrado como o uso da análise sistemática trifásica e a varredura na frequência trifásica podem ser ferramentas úteis na análise de transitórios eletromagnéticos. Em algumas situações um procedimento híbrido frequência-tempo é importante, reduzindo ainda mais o número de simulações no domínio do tempo. A presente metodologia foi aplicada no estudo real de expansão de um sistema de transmissão, e permitiu a identificação de algumas faltas extremamente severas, que seriam de difícil identificação através do procedimento usual de estudo de transitórios.

**PALAVRAS-CHAVE**

Transitórios Eletromagnéticos, Planejamento da Transmissão, Metodologia de Análise, EMTTP.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Muitas vezes, durante um estudo de transitórios em um sistema elétrico, a combinação das possibilidades de situações de manobras e de defeitos que podem ser danosas ao sistema é muito extensa, o que implica, na maioria das vezes, em :

- Necessidade de processamento de um número extremamente elevado de casos, considerando os diferentes tipos de faltas que podem ocorrer, a localização das faltas, as condições prévias da rede, e a influência das seqüências de chaveamento (entre diferentes disjuntores e polos dos disjuntores, incluindo eventuais falhas ou bloqueio de polos, e religamento e alternativas associadas ao religamento).
- Não identificação de casos que podem ser extremamente críticos.
- Erro de interpretação quando se analisa a influência dos instantes de fechamento e abertura dos disjuntores.

No presente trabalho é mostrado como a análise sistemática da resposta sustentada do sistema elétrico para as diversas situações citadas pode ser uma importante ferramenta de identificação de situações potencialmente críticas. O Simulador Trifásico Sistemático (STS) que analisa a resposta sustentada do sistema em conjunto com a análise trifásica na frequência podem ser utilizados como ferramentas auxiliares num estudo de transitórios eletromagnéticos.

O objetivo é efetuar um primeiro desbaste identificando as possíveis condições críticas que possam vir a existir através de uma análise trifásica tanto na frequência fundamental quanto no domínio da frequência, e depois reprocessar as situações mais severas com o auxílio de um programa de transitórios. Também, em algumas situações, um procedimento híbrido frequência-tempo pode ser útil, reduzindo ainda mais o número de simulações no domínio do tempo, e permitindo realizar estas simulações com representação detalhada dos elementos da rede.

Com a análise sistemática na frequência fundamental e a varredura na frequência é possível detalhar a parte do sistema para a qual é importante estudar e simular faltas ao longo de uma linha (faltas deslizantes). É possível, também, observar o comportamento do sistema durante a operação incorreta dos disjuntores, como quando ocorre um eventual atraso na manobra de um ou mais polos. Estas situações são importantes para identificar condições de ressonância.

Esta metodologia foi aplicada num estudo de expansão do sistema elétrico de Moçambique, tendo sido possível identificar casos severos que seria difícil detectar somente através de um estudo de transitórios usual. Alguns resultados do estudo acima mencionados serão apresentados.

## 2.0 - SISTEMA DE TRANSMISSÃO ANALISADO

O sistema de transmissão analisado é baseado numa linha de 420 kV de 865 km de comprimento, frequência fundamental de 50 Hz, com uma concepção “não convencional”, conectando o Terminal 1 ao Terminal 2, sendo as suas principais características apresentadas a seguir:

- Concepção de linha de transmissão de 420 kV “não convencional”. A estrutura é externa às três fases, o que permite redução das distâncias entre as fases e uma adequação nas características da linha para a transmissão analisada.
- Parâmetros do solo dependentes da frequência, sendo a condutividade a baixa frequência aproximadamente 0,5 mS/m [1-2].
- Compensação reativa em série correspondente a 0,5 vezes a reatância longitudinal direta da linha.
- Compensação reativa em derivação (para as componentes direta e inversa) correspondente a 0,8 vezes a admitância transversal direta da linha.
- O sistema de compensação reativa, tanto em série quando em derivação, é distribuído conforme apresentado na Fig. 1, com uma instalação de compensação no meio da linha, e dois pontos de compensação em derivação em ambos os extremos da linha.
- Carga máxima futura de 800 MW no Terminal 2.

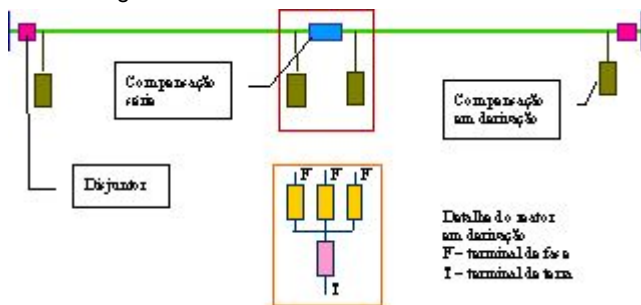


FIGURA. 1 – Esquema básico da transmissão, incluindo os sistemas de compensação em série e em derivação.

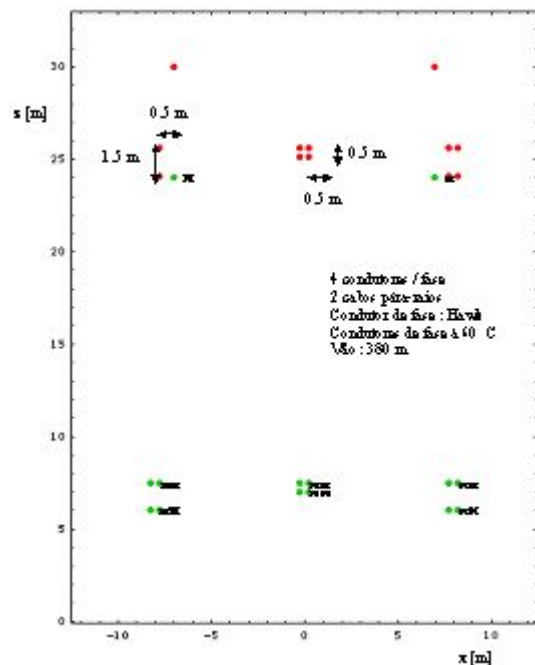


FIGURA. 2 – Representação esquemática da linha de transmissão. O símbolo x representa as posições dos condutores no meio do vão. Os pontos (●) representam os condutores junto às torres.

Na Fig. 1 apresenta-se o esquema básico da transmissão, incluindo os equipamentos de compensação em série e em derivação. Na Tabela 1 é apresentado um resumo das características básicas da linha e dos equipamentos de compensação reativa, em série e em derivação, à frequência fundamental. Os parâmetros relacionados ao reator de neutro do reator de compensação em derivação, que aparecem na tabela, foram escolhidos utilizando os procedimentos discutidos na próxima seção. Na Fig. 2 é apresentada, esquematicamente, a linha considerada.

## 3.0 - ANÁLISE DA CORRENTE DE ARCO SECUNDÁRIO

Na transmissão de grandes blocos de energia através de troncos de transmissão, a confiabilidade da transmissão é aumentada se a maioria dos curto-circuitos for eliminada através da abertura e religamento monofásico, na fase em que ocorreu a falta, quase sem afetar a continuidade da transmissão [3]. Isto significa que um tronco de transmissão otimizado necessita ter o religamento monofásico apropriadamente projetado. Desta forma, quando um tronco de transmissão otimizado está sendo projetado, o religamento monofásico deve ser considerado.

Exceto em situação anômalas, a grande maioria das faltas de um sistema de transmissão é devida a faltas monofásicas originadas por descargas atmosféricas. Numa linha bem projetada e construída, a maioria das descargas que resultam em curto-circuitos, originam uma disrupção entre a fase e o solo (incluindo as partes aterradas do sistema, como as torres e os cabos pára-raios), originando um arco elétrico. Após um fenômeno transitório rápido, a

corrente no arco tende para um regime de tipo sustentado, traduzindo uma corrente de curto-circuito, essencialmente de frequência industrial, que subsiste até a abertura dos dois terminais da fase da linha afetada pelo arco.

TABELA 1 – Parâmetros básicos, à frequência fundamental (50 Hz)

Variável	Valor	
	Componente não homopolar	Componente homopolar
Impedância longitudinal por unidade de comprimento	0,0350 + i0,2267 $\Omega/\text{km}$	0,2955 + i1,2282 $\Omega/\text{km}$
Admitância transversal por unidade de comprimento	i5,162 $\mu\text{S}/\text{km}$	i3,003 $\mu\text{S}/\text{km}$

<sup>11</sup> Com condutor de fase a 60°C, sem os efeitos da compensação, e considerando valores médios para uma linha transposta.

**Parâmetros básicos para reatores em derivação, à frequência fundamental:**  
 Admitância de cada reator de fase, à 50 Hz : 2,3 - i909,7  $\mu\text{S}$  (-0, +10 %)  
 Admitância de cada reator de neutro : 7,3 - i2873  $\mu\text{S}$  (-0, +10 %)  
 Tensão máxima em operação normal, 50 Hz, valoreficaz, entre as fases :  $U_{n,m} = 420 \text{ kV}$

**Parâmetros básicos do capacitor série, à frequência fundamental:**  
 Impedância, por fase, à 50 Hz : 0,095 - i9454  $\Omega$  (-0, +10 %)

Depois da abertura da fase sob falta nos dois extremos, a corrente de arco sofre uma grande redução, indo para condição normalmente chamada de “arco secundário”. Estas condições estão associadas ao acoplamento eletromagnético entre a fase aberta e as demais fases, e ao acoplamento resultante do sistema de compensação em derivação, que é mantido galvanicamente conectado à fase interrompida. A extinção natural do arco secundário, se ocorrer, permite o religamento da fase onde ocorreu a falta, sem originar um novo curto-circuito.

A idéia básica para limitar a corrente de arco secundário e a tensão de restabelecimento é projetar adequadamente a relação,  $r_h$ , entre a impedância homopolar e não homopolar dos bancos de reatores do sistema de compensação em derivação. Esta abordagem é construtivamente simples e de custo moderado. Com a adoção de grupos de reatores formados por reatores trifásicos e um reator de neutro, esta relação pode ser obtida, definindo assim a impedância do reator de neutro. Esta definição está em concordância com o valor desejado da relação  $r_h$ , com alguma flexibilidade, e tem um efeito moderado no custo do sistema de compensação em derivação.

O parâmetro escolhido, para a seleção característica básica do reator de neutro, é a relação  $r_h$ :

$$r_h = \frac{Z_h}{Z_d} = \frac{Z_f + 3Z_n}{Z_f} = \frac{1/Y_f + 3/Y_n}{1/Y_f}$$

sendo  $Y_f$ ,  $Y_n$  as admitâncias dos reatores de fase e de neutro, a 50 Hz, e  $Z_f$ ,  $Z_n$  as correspondentes impedâncias, a 50 Hz (em notação complexa), e  $Z_d$ ,  $Z_h$  as impedâncias, respectivamente, não-homopolar e homopolar do reator de compensação em derivação, a 50 Hz (em notação complexa).

Na Fig. 3 representa-se os valores eficazes das componentes a frequência industrial da corrente de arco secundário (não considerando o efeito da tensão do arco na corrente) e da tensão de restabelecimento entre terminais do arco secundário, em função da relação  $r_h$ . Foram aplicadas faltas monofásicas ao longo da linha, a cada 20 km de linha, como uma falta deslizante. Os maiores valores de corrente de arco secundário ao longo da linha para cada local de falta são apresentados. Nestes casos a linha foi energizada, estando os polos do disjuntor no Terminal 2 abertos (não havia carga no Terminal 2). Somente o polo da fase A do disjuntor do Terminal 1 estava aberto, simulando a abertura monofásica. O sistema elétrico ligado à linha foi modelado.

A extinção da corrente de arco secundário requer uma escolha adequada da relação  $r_h$  para definir o reator de neutro. Há uma região de  $r_h$  bem definida associada à corrente de arco secundário e tensão de restabelecimento aproximadamente mínimas. Os valores de  $r_h$  que resultam nas menores correntes de arco secundário e nas menores tensões de restabelecimento encontram-se na faixa de 1,93-1,95. O valor adotado para  $r_h$  foi de 1,95, que corresponde a um reator de neutro de 348,1  $\Omega$ .

#### 4.0 - ANÁLISE DE VARREDURA NA FREQUÊNCIA

É importante analisar os aspectos básicos relacionados com fenômenos transitórios e suas conseqüências, para :

- Registrar os parâmetros relevantes básicos para análises e estudos de fenômenos transitórios num sistema de transmissão.
- Caracterizar os aspectos básicos do comportamento do sistema de transmissão, que têm influência relevante no desempenho na linha e nas solicitações dos equipamentos, e na identificação de condições ou estados potencialmente críticos.
- Verificar se as escolhas realizadas estão corretas, relativamente à concepção do sistema de transmissão, e detectar eventuais conseqüências potencialmente desfavoráveis.
- Identificar parâmetros de equipamentos e características do sistema de transmissão que têm influência relevante no seu comportamento, especialmente nos aspectos desfavoráveis, e que possam ou devam ser otimizados para uma melhor característica do sistema de transmissão.

Deve ser mencionado que vários aspectos tratados neste artigo são normalmente ignorados ou tratados superficialmente. No entanto, se eles não forem apropriadamente analisados, existe o risco de não detectar condições críticas e de obter resultados incorretos ou projetos não-otimizados, com conseqüências que, em muitos casos reais, são muito sérias.

O sistema de transmissão apresentado no artigo tem características não-convencionais; uma das quais, importante, é

o comprimento da linha. Por este motivo, a otimização do preço e desempenho depende de uma concepção “integrada”. Se fossem aplicados os procedimentos usuais, o risco de não detectar condições críticas seria muito grande.

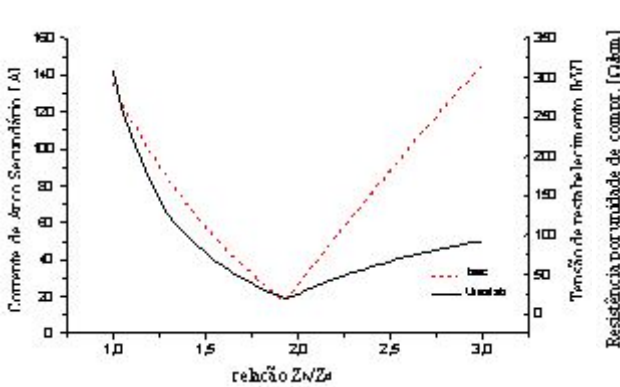


FIGURA 3 – Máximas corrente de arco secundário e tensão de restabelecimento para falta aplicada ao longo da linha

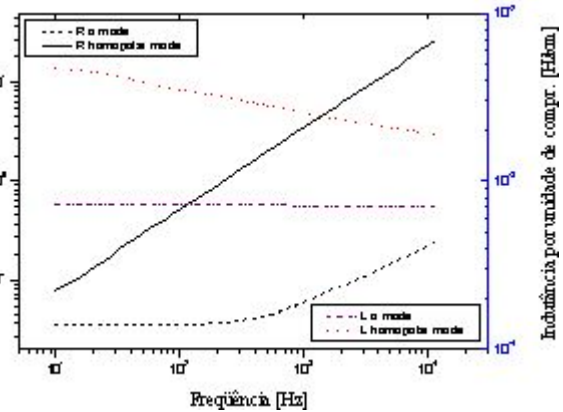


FIGURA 4 – Resistência e indutância por unidade de comprimento da linha de transmissão.

Na Fig. 4 são apresentados os parâmetros da linha por unidade de comprimento no domínio da frequência na faixa de 10 Hz a 10 kHz. A análise gráfica caracteriza, direta e imediatamente, os parâmetros básicos da linha, que não apresentam nenhuma situação anômala. Existem algumas diferenças quando comparadas aos resultados freqüentemente apresentados na literatura principalmente porque o modelo de solo utilizado inclui a permissividade dielétrica e porque os parâmetros elétricos do solo variam com a frequência [1-2]. Deve ser enfatizado que a variação dos parâmetros da linha com a frequência é muito importante para o comportamento transitório da linha. As metodologias para estudo de fenômenos transitórios que não consideram esta variação de forma correta não devem ser utilizadas [3].

Outro aspecto analisado foi: impedância homopolar e não homopolar vista de um terminal, com o outro terminal aberto, considerando ou não a compensação série e em derivação. Alguns resultados são apresentados nas Figs. 5 e 6.

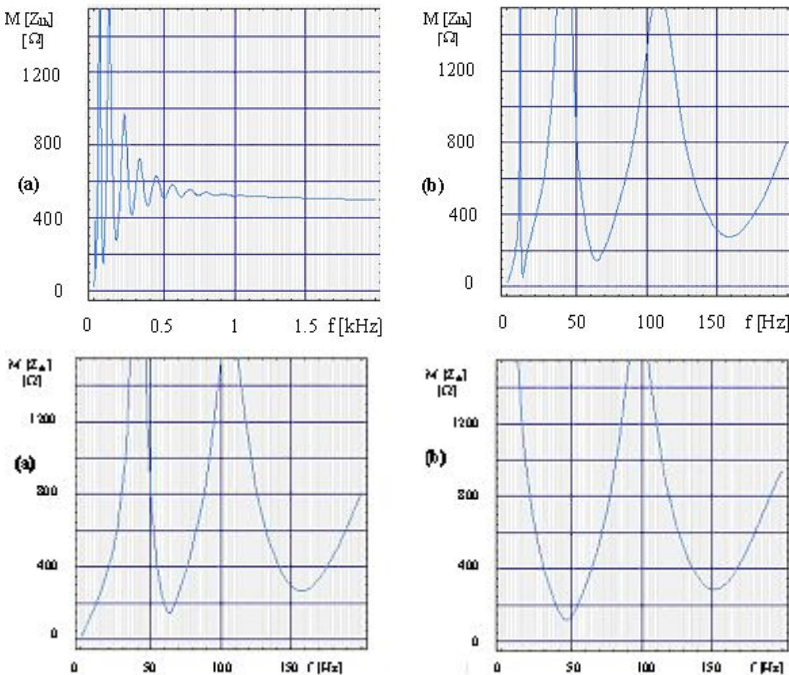


FIGURA 5 – Módulo da impedância homopolar da linha vista de um terminal com o outro terminal aberto, com compensação em série e em derivação. Faixa de frequência: (a) [1 Hz a 2000 Hz]; (b) [1 Hz a 200 Hz].

FIGURA 6 – Módulo da impedância homopolar da linha vista de um terminal com o outro terminal aberto: (a) com compensação em derivação e sem compensação em série; (b) sem compensação em derivação e em série. Faixa de frequência [1 Hz a 200 Hz].

Em relação ao comportamento homopolar em termos de impedância da linha vista de um terminal, com o outro aberto, e com compensação:

- A compensação em série muda drasticamente o comportamento da linha compensada para frequências baixas (em módulo), até cerca de 100 Hz. À medida que a frequência aumenta o efeito da compensação para o comportamento da linha compensada decresce rapidamente, com o seu efeito sendo notado até cerca de 300 Hz, mas sendo muito baixo para frequências maiores.
- Para frequências até 100 Hz, a atenuação do modo homopolar, na linha compensada, é moderada, com as condições de um terminal influenciando bastante o outro.

Como exemplo, apresenta-se na Fig. 7 alguns resultados para um tronco de transmissão, em 60 Hz, de 1000 km de

extensão, constituído por um único circuito, com 100 % de compensação em derivação e sem compensação em série, dividido em quatro trechos de igual comprimento, separados por subestações de manobra. As subestações nos extremos da linha e no meio têm 02 transformadores cada para conectar a linha com outros sistemas elétricos. Esta expansão foi planejada de acordo os métodos usuais e não os propostos no presente trabalho, resultando numa solução não otimizada e na não identificação de problemas que poderiam ser evitados e eliminados ainda na fase de projeto. Por exemplo, quando um dos transformadores da subestação central é energizado, com o segundo transformador da mesma subestação desenergizado, e os transformadores da subestação num dos extremos da linha em vazio, tem-se, em diversas gamas de condições, valores elevados da corrente de magnetização desse transformador, e, também, das correntes de magnetização dos transformadores das outras duas subestações (a 500 km do transformador manobrado). Com a ajuda da análise da varredura na frequência, é possível identificar uma ressonância homopolar para todas as subestações para frequências em torno de 120 Hz. Se a linha tivesse sido otimizada, e se a análise na frequência tivesse sido executada, o problema poderia ter sido evitado através de uma adequada especificação dos parâmetros dos equipamentos que não iria influenciar os principais requisitos operacionais, e provavelmente não afetaria os custos. Por exemplo, o problema poderia ser evitado através da escolha adequada da impedância homopolar dos transformadores (antes da especificação, projeto e construção do equipamento).

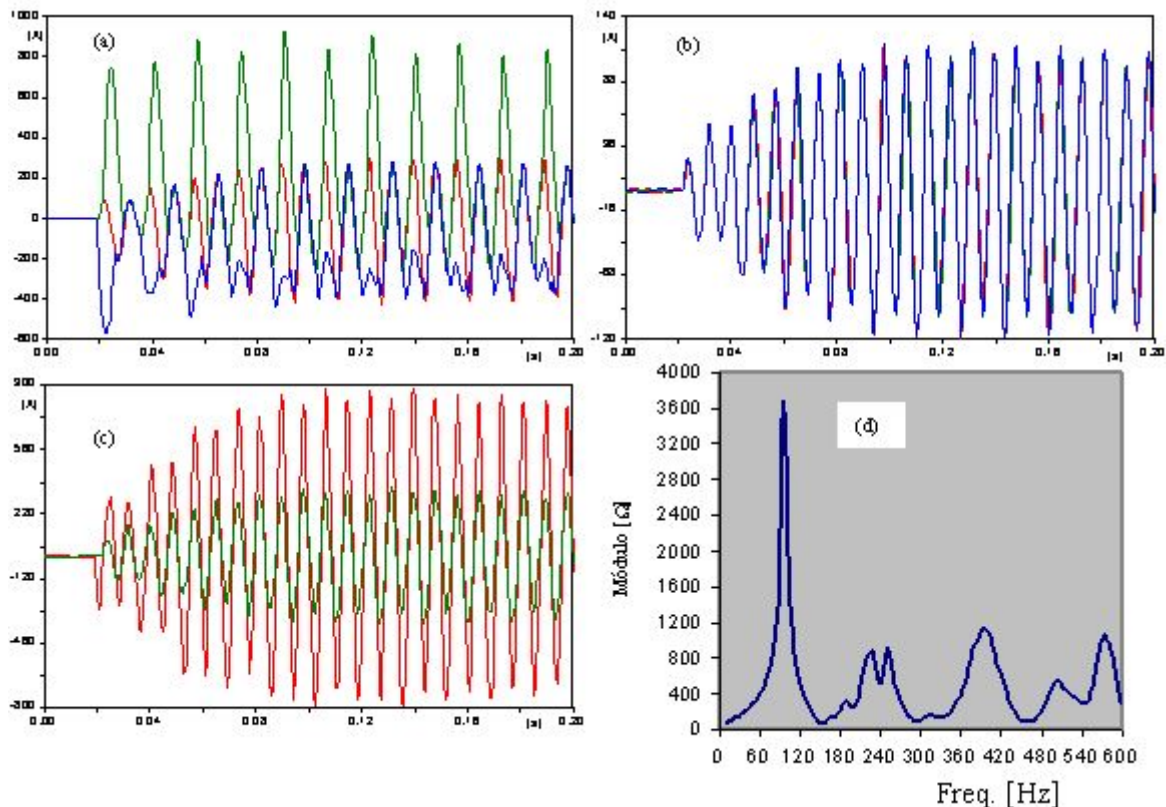


FIGURA. 7 – Linha de Transmissão não otimizada, de frequência nominal 60 Hz – (a) corrente de magnetização do transformador energizado; (b) corrente de magnetização de transformador a 500 km de distância; (c) corrente de neutro de ambos os transformadores; (d) impedância homopolar vista da subestação no meio da linha

Resumindo, o procedimento proposto caracteriza os aspectos básicos do comportamento de um sistema de transmissão, que têm uma influência relevante no seu comportamento, nas perturbações na linha e nos equipamentos, o que permite identificar condições ou estados potencialmente críticos, como, por exemplo: condições de ressonância em frequências críticas, associadas com manobras de transformadores (especificamente em relação a ferro-ressonância ou comportamentos similares) e com manobras de linhas, devem ser evitadas.

## 5.0 - COMPORTAMENTO DO SISTEMA NA FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL

Para detectar e caracterizar situações potencialmente desfavoráveis relacionadas com sobretensões, foi realizada uma análise sistemática de ocorrências. Este estudo foi implementado somente à frequência fundamental, e permitiu identificar situações de ressonância e definir as soluções para estes casos.

Não seria possível implementar uma análise tão detalhada num estudo de transitórios eletromagnéticos, através da variação sistemática de um grande número de parâmetros, como foi possível realizar na frequência fundamental.

Para realizar esta análise sistemática, desenvolveu-se uma ferramenta trifásica, com a qual se representou o sistema elétrico existente e a expansão em análise.

A linha analisada foi dividida em seções de 50 km, para permitir uma observação em todos os pontos de: tensão fase-terra; tensão fase-fase; corrente em cada fase e corrente através do capacitor série. Os tipos de falta simulados foram: monofásica; bifásica e trifásica (incluindo ou não a terra). As faltas foram aplicadas do Terminal 1 ao Terminal 2 a cada

50 km de linha.

Uma importante variável da análise sistemática foi o estado dos polos dos disjuntores manobrados. Foram simuladas todas as variantes de estado da abertura de cada disjuntor manobrado, como fotografias da seqüência completa de abertura desde que a ordem de abertura foi recebida até que o disjuntor se encontrasse totalmente aberto, em todas as fases. Os estados intermediários, e. g. quando um dos polos se encontra aberto e os demais ainda estão fechados, podem ser entendidos como uma condição intermediária ou uma condição muito severa, como um bloqueio de polo do disjuntor. Estes casos, no entanto, podem representar configurações de ressonância do sistema, que seria difícil detectar com um estudo “típico” de transitórios.

Devido ao grande número de possíveis combinações, o estado de cada disjuntor manobrado foi variado supondo que o disjuntor no outro terminal se encontrava ou totalmente fechado ou totalmente aberto. Os casos em que o disjuntor no Terminal 2 se encontrava totalmente aberto representam a situação de energização da linha.

Um outro parâmetro variado foi o estado do reator no Terminal 2, se estaria conectado ou não. A condição de operação normal era que o reator junto ao Terminal 2 deveria estar desconectado quando o disjuntor do Terminal 2 estivesse fechado e a carga no terminal sendo atendida. O reator do Terminal 2 deveria ser conectado toda vez que qualquer um dos polos do disjuntor do Terminal 2 abrisse. Na análise sistemática esta condição não foi respeitada para identificar condições severas ou quando o procedimento recomendado não fosse atendido. Os demais reatores em derivação, junto ao Terminal 1 e nos dois extremos do capacitor em série, encontravam-se sempre conectados.

TABELA 2 – Capacitor série operando em todas as fases.

TABELA 3 – Capacitor série curto-circuitado na fase sob falta.

Estado do Terminal 2	Tipo de curto-circuito	Fases abertas		$\hat{U}_f$ [kV]	$\hat{U}_{ff}$ [kV]	$\hat{I}_c$ [A]		
		No Terminal 1	No Terminal 2					
conectado	mono-fásico	A	B C	329.6	381.9	2075.4		
			A B C	485.8	433.9	3196.1		
			A B C	213.2	433.9	331.3		
		B	A B C	391.5	381.8	3285.6		
			A B C	486.4	389.6	3281.9		
			A B C	212.4	215.6	336.5		
		C	A B C	212.4	215.6	336.5		
			A B C	212.4	215.6	336.5		
			A B C	212.1	235.3	3386.5		
		desconectado	mono-fásico	A	B C	325.6	381.9	2309.0
					A B C	226.3	381.9	694.3
					A B C	321.1	405.5	2015.2
B	A B C			232.3	483.5	135.6		
	A B C			322.2	482.6	2006.1		
	A B C			425.8	488.3	3511.8		
C	A B C			238.3	238.8	583.2		
	A B C			238.8	238.4	493.1		
	A B C			232.4	235.5	3561.9		
conectado	bifásico com taxa			A B	C	340.5	405.5	2240.2
					A B C	238.8	483.5	185.9
					A B C	237.8	456.2	825.6
		A C	B	335.3	351.6	3511.6		
			A B C	192.4	1404.3	1625.4		
			A B C	181.2	1404.3	1462.3		
		B C	A	180.4	1404.3	1455.1		
			A B C	182.2	1404.1	1456.1		
			A B C	821.3	1404.3	1461.2		
		desconectado	bifásico com taxa	A B	C	801.9	1404.4	1601.4
					A B C	809.2	1404.2	1601.1
					A B C	141.6	1404.3	1439.6
A C	B			363.9	329.2	426.2		
	A B C			363.9	329.3	426.8		
	A B C			218.8	256.3	335.1		
B C	A			331.6	428.6	391.9		
	A B C			363.3	459.1	429.3		
	A B C			805.9	1404.3	1474.1		
conectado	trifásico com taxa			A B C	A B C	802.1	1404.3	1709.0
					A B C	232.6	383.2	548.3
					A B C	235.2	99.3	556.4
		A	B C	233.8	354.4	481.1		
			A B C	251.9	488.4	888.9		
			A B C	281.3	438.2	989.5		
		B	A B C	144.6	1404.3	1471.1		
			A B C	5.2	8.9	34.1		
			A B C	193.0	1404.3	1545.0		
		desconectado	trifásico com taxa	A B C	A B C	112.2	527.2	1536.6
					A B C	809.6	1402.1	8566.0
					A B C	809.6	1402.6	8567.9
A	B C			232.4	325.9	3518.3		
	A B C			115.6	1402.6	1571.1		
	A B C			809.6	1402.1	8566.0		
B	A B C			809.6	1402.1	8566.0		
	A B C			809.6	1402.1	8566.0		
	A B C			809.6	1402.1	8566.0		
conectado	trifásico com taxa			A B C	A B C	809.6	1402.1	8566.0
					A B C	232.4	325.9	3518.3
					A B C	115.6	1402.1	1571.1
		A	B C	809.6	1402.1	8566.0		
			A B C	809.6	1402.1	8566.0		
			A B C	809.6	1402.1	8566.0		
		B	A B C	809.6	1402.1	8566.0		
			A B C	809.6	1402.1	8566.0		
			A B C	809.6	1402.1	8566.0		
		C	A B C	809.6	1402.1	8566.0		
			A B C	809.6	1402.1	8566.0		
			A B C	809.6	1402.1	8566.0		

Estado do Terminal 2	Tipo de curto-circuito	Fases abertas		$\hat{U}_f$ [kV]	$\hat{U}_{ff}$ [kV]	$\hat{I}_c$ [A]		
		No Terminal 1	No Terminal 2					
conectado	mono-fásico	A	B C	219.2	381.9	3335.2		
			A B C	318.8	433.9	251.6		
			A B C	213.4	433.9	331.3		
		B	A B C	358.5	385.1	352.4		
			A B C	343.5	382.6	348.8		
			A B C	212.5	214.1	336.5		
		C	A B C	212.5	214.1	336.5		
			A B C	212.5	214.1	336.5		
			A B C	235.8	249.8	28.2		
		desconectado	mono-fásico	A	B C	219.2	381.9	3835.6
					A B C	223.8	381.9	682.8
					A B C	289.2	483.5	1231.8
B	A B C			251.9	483.5	135.2		
	A B C			286.6	483.5	1223.5		
	A B C			316.3	393.3	3395.1		
C	A B C			231.2	254.3	499.8		
	A B C			231.2	252.1	492.3		
	A B C			235.5	86.8	48.2		
conectado	bifásico com taxa			A B	C	293.9	483.5	1344.8
					A B C	253.9	483.5	152.8
					A B C	572.2	456.2	592.6
		A C	B	233.2	323.8	21.6		
			A B C	231.3	316.4	513.9		
			A B C	231.3	319.6	383.9		
		desconectado	bifásico com taxa	A B	C	385.9	315.1	329.9
					A B C	388.5	315.8	328.8
					A B C	262.3	313.5	346.6
				A C	B	231.2	311.3	486.3
					A B C	231.2	311.9	481.6
					A B C	329.2	314.6	134.4
B C	A			443.2	414.5	10.3		
	A B C			443.2	414.5	10.3		
	A B C			218.8	256.2	335.1		
conectado	trifásico com taxa			A B C	A B C	433.2	489.2	325.3
					A B C	443.5	536.9	92.1
					A B C	286.5	341.8	5.9
		A	B C	229.9	389.3	689.8		
			A B C	235.6	85.8	65.2		
			A B C	233.5	14.2	66.6		
		B	A B C	235.8	355.2	485.8		
			A B C	268.6	394.9	813.3		
			A B C	259.8	398.8	685.9		
		C	A B C	285.2	341.8	34.1		
			A B C	256.4	432.8	343.3		
			A B C	1202.5	919.0	38.2		
desconectado	trifásico com taxa	A B C	A B C	288.8	341.8	8.8		
			A B C	288.8	341.8	8.8		
			A B C	233.5	83.3	8.8		
		A	B C	285.3	341.8	8.8		
			A B C	288.8	341.8	8.8		
			A B C	288.8	341.8	8.8		
		B	A B C	288.8	341.8	8.8		
			A B C	288.8	341.8	8.8		
			A B C	288.8	341.8	8.8		
		C	A B C	288.8	341.8	8.8		
			A B C	288.8	341.8	8.8		
			A B C	233.5	83.3	8.8		

Alguns resultados são reproduzidos na Tabela 2. Somente alguns tipos de faltas são apresentados. Os valores da tabela são os maiores, considerando as três fases, à medida que o local de falta era variado:

- $\hat{U}_f$  : A maior tensão fase-terra, valor eficaz, nos pontos de “medida” ao longo da linha.
- $\hat{U}_{ff}$  : A maior tensão fase-terra, valor eficaz, nos pontos de “medida” ao longo da linha.
- $\hat{I}_c$  : A maior corrente, valor eficaz, no capacitor série.

Em alguns casos a tensão fase-terra é extremamente elevada, enquanto que em outros a corrente no capacitor é maior

do que o valor máximo de corrente de operação, sendo estes limites:  $U_{ft} = 455,4 \text{ kV}$ ;  $I_{\text{capac } 500 \text{ s}} = 1710 \text{ A}$ .

Os casos mais severos, associados à ressonância, ocorrem para algumas condições de falta e de situação dos polos do disjuntor, com a falta localizada a jusante do capacitor série no lado do Terminal 2. Pode ser observado que além do elevado nível de sobretensão, a corrente no capacitor é extremamente elevada. A principal razão está associada com o fato de que com compensação série de 50 % e sem o efeito da impedância de rede, ocorre uma condição de ressonância para faltas a jusante da estação do capacitor em série, no meio da linha. A rede nos terminais da linha, tipo de falta, local de falta e condição do polo do disjuntor também influenciam o comportamento da rede e condições similares de ressonância podem ocorrer. Para reduzir este efeito, algumas medidas foram tomadas, como, por exemplo, a escolha da impedância homopolar dos transformadores nos terminais da linha. Foi necessário remover o capacitor do circuito rapidamente para sair da condição de ressonância. A solução para eliminar a sobretensão sustentada e para proteger o capacitor foi curto-circuitar longitudinalmente o capacitor. Este procedimento foi implementado por fase e afeta somente a(s) fase(s) envolvida(s) na falta.

Na Tabela 3 apresentam-se os mesmos casos da Tabela 2, curto-circuitando o capacitor nas fases sob. Na maioria dos casos o procedimento de curto-circuitar o capacitor série na fase sob falta reduziu as sobretensões, eliminando a ressonância.

Nos casos onde a tensão era alta, mas a corrente no capacitor era reduzida, a remoção do capacitor não afetou o resultado e em outros casos o procedimento gerou inclusive um caso pior, com uma maior tensão fase-terra. Estas condições particulares foram tratadas com medidas adicionais, que não estão discutidas no presente trabalho.

## 6.0 - SIMULAÇÃO DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS

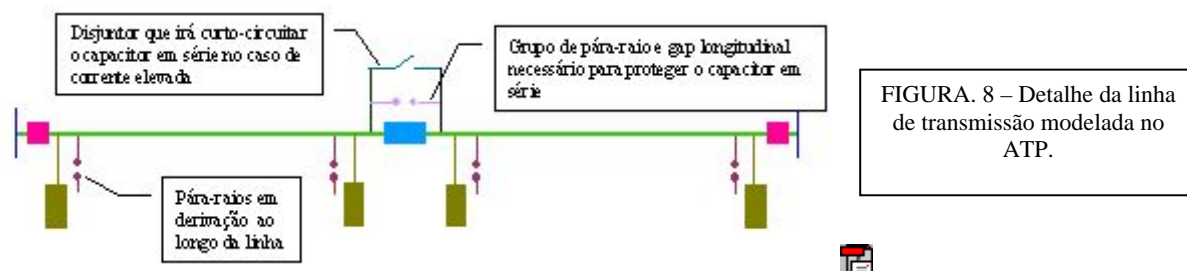
Foram implementados dois tipos diferentes de estudos de transitórios eletromagnéticos, cujos resultados detalhados não são aqui apresentados. No primeiro tipo, foi utilizado um procedimento híbrido frequência-tempo, realizando varredura na frequência, como mostrado anteriormente, e obtendo resposta no tempo. Foram utilizadas duas variantes principais do método híbrido:

- Transformação Direta de Fourier. Este método é bastante útil quando as condições não lineares são simples, e.g., o fechamento ou abertura de pólos de disjuntor em instantes definidos. Este procedimento permitiu a identificação de aspectos relacionados a: sensibilidade das sobretensões, associadas à resposta em frequência e ressonância a frequências diferentes da frequência industrial, chaveamento sincronizado dos disjuntores, e alternativas básicas de limitar sobretensões de manobra.
- Conversão da frequência como um passo intermediário para obter a transformada de Fourier. Este método é útil para uma excitação no tempo tipo degrau, que possibilita o uso de procedimentos de convolução muito adequados para considerar um número pequeno de condições não-lineares, e.g., pára-raios, arcos no ar e arcos nos disjuntores. Esta variante foi usada no presente sistema de transmissão para análises específicas, mas não como um procedimento de uso geral. Apesar disso aparenta ser bastante promissor.

Os demais estudos de transitórios eletromagnéticos utilizam os programas de simulação de transitórios de uso geral, que trabalham no domínio do tempo [5]. Esta análise foi executada para algumas condições específicas escolhidas com o procedimento descrito acima, com dois objetivos básicos:

- Considerar detalhes que não são levados em conta num estudo sistemático (orientado mais para encontrar eventuais condições severas, do que para implementar uma análise completa detalhada), e obter resultados precisos para algumas condições escolhidas.
- Avaliar aspectos para os quais os procedimentos e programas de simulação no domínio do tempo são bastante mais adequados.

O sistema de transmissão completo foi representado no ATP. Na Fig. 8, mostra-se como a linha foi modelada.



Para ilustrar como a análise anterior é útil é apresentado um caso de transitério. A condição modelada consiste em: Linha de transmissão operando sob condições normais quando uma falta (envolvendo as fases A e B) ocorre a jusante do capacitor série (direção Terminal 1 – Terminal 2), aos 20 ms. Este caso corresponde ao primeiro caso nas Tabelas 2 e 3: reator no Terminal 2 desconectado, falta bifásica sem terra, todos os polos dos disjuntores fechados nos Terminais 1 e 2. A seqüência de operação é descrita abaixo:

- A proteção do capacitor série opera e remove o capacitor série das fases envolvidas na falta.
- Depois da corrente dos "equipamentos de proteção" (explicitados mais adiante) ter atingido um valor definido, a chave de curto-circuito remove tanto o capacitor série quanto os equipamentos de proteção (somente nas fases envolvidas na falta).
- A linha é aberta (abertura trifásica) nos dois extremos, primeiro no Terminal 1, em 80 ms, e depois no Terminal 2, em 120 ms. O disjuntor do reator no Terminal 2 identificou que o polo do disjuntor 2 estava aberto e conectou o

reator.

As sobretensões medidas entre os terminais do capacitor série, nas fases envolvidas na falta, foram extremamente elevadas, como identificado através do simulador trifásico. Esta análise prévia permitiu o estabelecimento de medidas para proteger o capacitor série. Especificamente, o capacitor série foi protegido (longitudinalmente) colocando em paralelo com o capacitor um pára-raios, um espinterômetro e uma chave. O espinterômetro tem como função limitar a energia dissipada no pára-raios, que, sem ele, poderia ser excessiva para o pára-raios. A chave “curto-circuita” o capacitor, o pára-raios e o espinterômetro e, ao ser aberta, re-insere o capacitor em série. As atuações do sistema de proteção do capacitor são efetuadas por fase, nas fases afetadas.

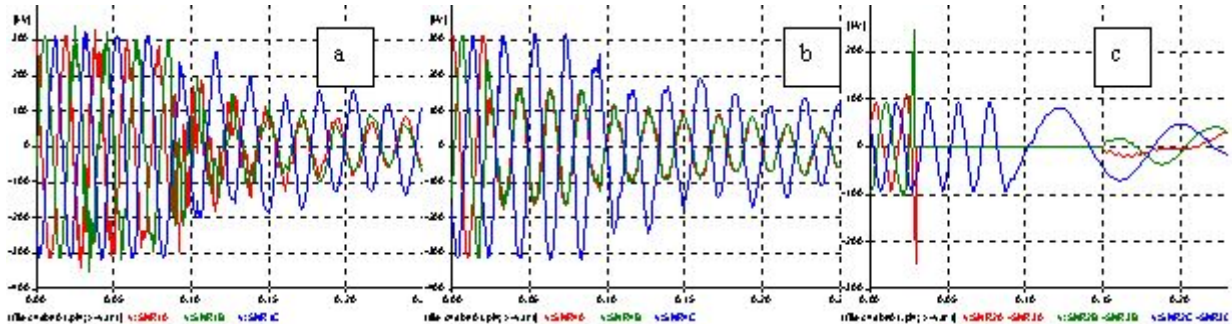


FIGURA 9 – Tensão: (a) Terminal 1, (b) Terminal 2 e Tensão entre os terminais do capacitor série (c) – unidade de tempo [s].

Na Fig. 9 são apresentadas as tensões nos Terminais 1 e 2, e a tensão entre os terminais do capacitor série. A energia dissipada no pára-raios do capacitor série foi de 42 kJ. Os casos simulados com o ATP confirmam as soluções definidas e apresentadas no artigo.

## 7.0 - CONCLUSÕES

No presente artigo é apresentado como a análise trifásica sistemática e a varredura na frequência trifásica podem ser ferramentas úteis num estudo de transitórios eletromagnéticos. Em algumas situações um procedimento híbrido frequência-tempo é importante, reduzindo ainda mais o número de simulações no domínio do tempo. Com as ferramentas trifásicas é possível cobrir um grande número de condições, detectando casos críticos ou severos, e.g., considerando:

- Combinação de: tipo de falta, local de falta ao longo da linha, local de medida da tensão, situação dos polos dos disjuntores, curto-circuitar longitudinalmente o capacitor série, religamento monofásico, manobra de reator nos casos de falta ou associada com os disjuntores de linha;
- Variação sistemática de elementos da rede, para obter soluções otimizadas, e.g. parâmetros da linha, localização da compensação reativa em série e em derivação e os seus parâmetros, procedimentos de manobra.

A análise sistemática elimina a possibilidade de não detectar condições críticas ou severas. Para um pequeno número de casos selecionados uma análise mais detalhada pode ser aplicada, utilizando procedimentos adequados para estas análises, de acordo com os seus aspectos específicos.

A presente metodologia foi aplicada a um estudo real de expansão do sistema elétrico, e permitiu a identificação de alguns casos bastante severos, que seria muito difícil identificar com o procedimento usual de estudo de transitórios. Este sistema de transmissão tinha algumas restrições desfavoráveis (e.g. 865 km), comparadas com os sistemas de transmissão mais “comuns”, e para obter uma solução otimizada foi necessário realizar uma análise sistemática cobrindo um grande número de opções e parâmetros. Com este procedimento de estudo usado foi encontrada uma solução para uma linha não-convencional, na qual foi possível conciliar aparente requisitos e soluções contraditórios. Estas soluções permitiram um custo relativamente baixo do sistema de transmissão com um bom desempenho operacional. Alguns aspectos do sistema de transmissão proposto são:

- Só há compensação reativa nos extremos e no meio da linha. A manobra de energização da linha de 865 km era realizada diretamente de uma extremidade, sem chaveamento em subestações intermediárias.
- O arranjo das torres foi otimizado para o comprimento específico da linha e da potência transmitida.
- A abertura e o religamento monofásicos foram estudados assegurando uma alta probabilidade de extinção do arco secundário para faltas monofásicas, aumentando a confiabilidade da transmissão.
- Uma otimização conjunta de critérios de projeto e operacionais permitiu uma redução importante do custo.

## 8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Portela C.M., Tavares M.C. e Pissolato J., “Quasi-Modes Frequency Dependent Three-Phase Transmission Line Model - Analyzing the Earth Conductivity Influence to Electromagnetic Transient Phenomena”, 2000 IEEE Winter Meeting, January 2000, Singapore.
- (2) Portela, C. – Grounding Requirement to Assure People and Equipment Safety Against Lightning - Proceedings IEEE 2000 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 969-974, August 2000, Washington DC, United States.
- (3) Tuan, TQ; Hadj-Said, N.; Sabonnadiere, J.C.; Feuillet, R., “Reducing dead time for single-phase auto-reclosing on a series-capacitor compensated transmission line”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No 1, pp. 51-56, Jan. 2000.
- (4) Tavares, M.C., Pissolato, J. e Portela, C., “Mode Domain Multiphase Transmission Line - Use in Transient Studies” - IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, No. 4, pp. 1533-1544, Oct. 1999.
- (5) Dommel, H.W., “Electromagnetic Transients Program Reference Manual (EMTP Theory Book)”, Portland, OR, Bonneville Power Administration, Aug. 1986.