

## DT419

**Procedimento eventual para limitar a tensão na linha na hipótese de ocorrer defasagem excessiva entre as tensões nas duas extremidades, por exemplo em caso de ocorrência de defeito, ou de abertura de linha, ou de corte de carga**

Neste DT419, analiso alguns condicionamentos básicos de um procedimento, eventual, para limitar a tensão numa linha de pouco mais de meia onda, na hipótese de ocorrer defasagem excessiva entre as tensões nas duas extremidades, por exemplo em caso de ocorrência de defeito, ou de abertura de linha, ou de corte de carga.

Esse procedimento consiste, basicamente, em inserir em série com a linha, nas duas extremidades, rapidamente, reatores em série, mantidos ligados durante um tempo curto. A inserção dos reatores pode ser desencadeada quando seja detectada uma defasagem, ou uma combinação de defasagem e de derivada de defasagem, em relação ao tempo, que, conjugada com a tensão nas extremidades e a relação de transformação dos transformadores nas extremidades da linha, origine ou indique risco iminente de originar sobretensão sustentada excessiva a meio da linha.

Para caracterização exemplificativa básica dos condicionamentos físicos dominantes da hipótese em causa, considero uma linha ideal, sem perdas, em regime balanceado, caracterizada por um comprimento correspondente, a frequência industrial, 60 Hz, a um “ângulo elétrico”  $\theta = 1,05 \pi$ , e reatores trifásicos, balanceados, sem perdas, tendo, cada um dos dois reatores, uma reatância, a frequência industrial, por fase, igual à reatância longitudinal unitária da linha, em regime balanceado, multiplicada por um comprimento equivalente a um ângulo elétrico da linha  $\zeta$  (a frequência industrial).

As tensões nas duas extremidades da linha, sem a inserção dos reatores, consideram-se de amplitude igual ao valor de “referência”,  $|\hat{U}_0|$ , e de defasagem  $\alpha$ . Considera-se “unidade de potência”, e de “potência reativa”, a potência característica da linha para tensão  $|\hat{U}_0|$ . Para os “sentidos” das tensões e correntes nas extremidades da linha, considera-se a convenção de sinais da Fig. 1, o que define, considerando o significado convencional da IEC para sentidos de tensão, corrente, potência e potência reativa, os sentidos convencionais adotados para potência e potência reativa nas extremidades da linha. As diferentes grandezas são expressas em “valores relativos”, tomando com unidade os valores “de referência”, identificando os índices **1**, **2**, **m**, respectivamente, as duas extremidades e o ponto médio da linha. Os terminais do conjunto “linha” e “reatores eventuais nas extremidades da linha”, e as grandezas nesses terminais, são identificados pelos índices **1C** e **2C** (em correspondência, respectivamente, com os terminais **1** e **2** da linha). As grandezas tensão, corrente, potência e potência reativa são representadas, de acordo com a notação preferencial da IEC, respectivamente, por **U**, **I**, **P**, **Q**. As grandezas são representadas em notação complexa, usando-se o símbolo **i** para unidade imaginária. A notação  $\hat{A}$  significa a amplitude complexa de uma grandeza sinusoidal de frequência industrial, genérica, **a(t)**, e, a notação  $|\hat{A}|$ , o módulo de  $\hat{A}$ .

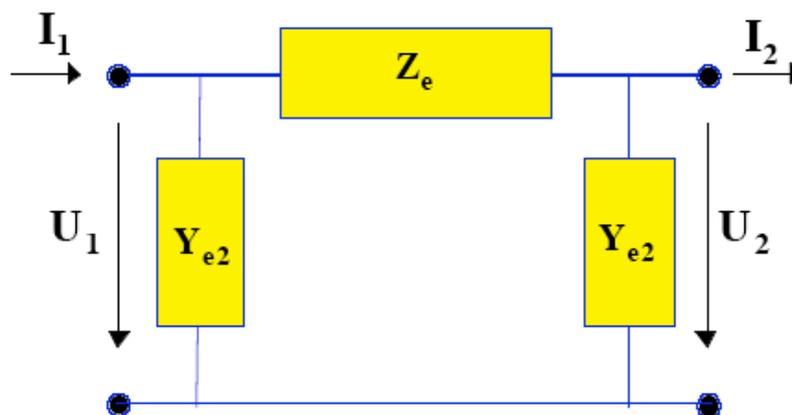


Fig. 1 – Convenção de sinais dos “sentidos” das tensões e correntes nas extremidades da linha.

Na Tabela 1 indica-se parâmetros correspondentes a diversas condições de operação da linha considerada como exemplo. Em todas as condições desta tabela considera-se iguais amplitudes da tensão nas duas extremidades da linha (igual ao valor de “referência”,  $|\hat{U}_0|$ ) e diferentes valores da defasagem,  $\alpha$ , entre as tensões nas duas extremidades. Portanto, esta tabela, indica parâmetros de operação da linha na ausência ou estando desligados (ou curto-circuitados) os eventuais reatores em série com a linha.

Nas hipóteses consideradas na Tabela 1, tem-se cinco valores de  $\alpha$ , de  $1\pi$  a  $1,1\pi$ , e, correspondentemente, potências transmitidas de  $0$  a  $1,975 P_c$  (sendo  $P_c$  a potência característica com tensão  $|\hat{U}_0|$ ) e amplitudes de tensão a meio da linha de  $0$  a  $1,994 |\hat{U}_0|$ .

Na Tabela 2 indica-se parâmetros correspondentes a diversas condições de operação da linha considerada como exemplo, tendo eventualmente em série, nas duas extremidades, reatores, balanceados, destinados a limitar as sobretensões sustentadas a meio da linha, em caso de perturbação. Em todas as condições desta tabela considera-se iguais amplitudes (iguais ao valor de “referência”,  $|\hat{U}_0|$ ) e igual defasagem,  $\alpha$ , entre as tensões nas duas extremidades do conjunto linha e reatores, e diferentes valores da reatância (caracterizada pelo parâmetro  $\zeta$ ) dos reatores ligados em série com a linha (idênticos nas duas extremidades da linha).

Na Tabela 2 considerou-se

$$\alpha = 1,0666666... \pi$$

valor para o qual, nas hipóteses consideradas e na ausência de reatores em série, a potência transmitida e a amplitude da tensão a meio da linha são

$$P = 1,32907 P_c$$

$$|\hat{U}_m| = 1,33227 |\hat{U}_0|$$

Na Tabela 2, para este mesmo valor de  $\alpha$ , considerou-se, além da hipótese de ausência de reatores ( $\zeta = 0$ ), três alternativas de reatores ligados em série com a linha (idênticos nas duas extremidades da linha). Tem-se, portanto, quatro variantes de reatores, com reatância caracterizada pelos seguintes valores de  $\zeta$ :

$\zeta$	$0$	$0,006 \pi$	$0,008 \pi$	$0,01 \pi$
---------	-----	-------------	-------------	------------

Tem-se, respectivamente, os seguintes valores de  $P$  e de  $|\hat{U}_m|$ :

$P$	$1,32907 P_c$	$1,07385 P_c$	$1,00937 P_c$	$0,952245 P_c$
$ \hat{U}_m $	$1,33227  \hat{U}_0 $	$1,07484  \hat{U}_0 $	$1,00980  \hat{U}_0 $	$0,952179  \hat{U}_0 $

Estes resultados mostram que a eventual inserção, rápida, de reatores em série com a linha, para limitar sobretensões sustentadas a meio da linha, em caso de perturbação, mantendo-os ligados durante um tempo curto, necessário para atuação de reguladores de velocidade, e inerente adaptação da defasagem de tensão entre as extremidades da linha, constitui uma solução simples e potencialmente interessante.

Naturalmente, o valor da reatância dos reatores e o tempo de inserção dos mesmos devem ser definidos considerando os condicionamentos da rede, com particular atenção quanto ao comportamento eletromecânico, gama de situações e ocorrências e quanto aos diferentes requisitos e procedimentos operacionais.

Para situar ordens de grandeza dos parâmetros físicos destes reatores, considera-se as condições do exemplo aplicadas, aproximadamente, a uma linha não convencional, com fases formadas por feixes de oito condutores Bittern, de tensão 800kV, tendo uma potência característica  $P_c = 4,865 \text{ GW}$  a 800 kV e parâmetros tais que, a 60 Hz, para  $\theta = 1,05 \pi$ , o comprimento da linha é  $L = 2524 \text{ km}$ .

A compensação de cerca de 100% da reatância em derivação desta linha, solução que (além da compensação em série e da compensação controlada, usadas cumulativamente com a compensação em derivação, vem sendo usada no Brasil, para linhas longas) conduziria a reatores em derivação com potência reativa, a 800 kV,  $Q = 15,993 \text{ Gvar}$ , em regime “permanente”.

As variantes de reatores nas extremidades da linha acima mencionadas (caracterizadas pelos correspondentes valores de  $\zeta$ ) correspondem aos seguintes comprimentos  $L$  de linha, multiplicados pela reatância longitudinal unitária da linha, às seguintes reatâncias  $X$  dos reatores (por fase) e às seguintes potências reativas trifásicas dos reatores  $Q_x$ , se percorridas pela corrente na linha correspondente à potência característica a 800 kV:

$\zeta$	<b>0</b>	<b>0,006 <math>\pi</math></b>	<b>0,008 <math>\pi</math></b>	<b>0,01 <math>\pi</math></b>
$L$	<b>0</b>	<b>14,42 km</b>	<b>19,23 km</b>	<b>24,03 km</b>
$X$	<b>0</b>	<b>2,487 <math>\Omega</math></b>	<b>3,316 <math>\Omega</math></b>	<b>4,145 <math>\Omega</math></b>
$Q_x$	<b>0</b>	<b>91,29 Mvar</b>	<b>121,7 Mvar</b>	<b>152,2 Mvar</b>

Trata-se, portanto, de potências reativas de compensação cerca de duas ordens de grandeza menores que a compensação reativa de compensação que vem sendo usada normalmente no Brasil, para linhas longas.

Salienta-se que, além de se tratar de potência reativa de compensação muito reduzida, a operação destes reatores será meramente eventual, em caso de perturbações na rede que justifiquem a sua inserção em série com a linha, e que, em cada uma dessas ocorrências, os reatores ficarão ligados apenas durante um tempo da ordem de  $10^0$  s a  $10^1$  s, o que conduz a que o seu custo seja muito inferior ao de um reator caracterizado pela mesma potência reativa e mesma corrente, mas para operação em longa duração (como é o caso dos reatores usados nos sistemas convencionais de compensação reativa de linhas).

Em conclusão:

- A eventual inserção, rápida, de reatores em série com a linha, para limitar sobretensões sustentadas a meio da linha, em caso de perturbação, mantendo-os ligados durante um tempo curto, necessário para atuação de reguladores de velocidade, e inerente adaptação da defasagem de tensão entre as extremidades da linha, constitui uma solução simples e potencialmente interessante.
- Naturalmente, o valor da reatância dos reatores e o tempo de inserção dos mesmos devem ser definidos considerando os condicionamentos da rede, com particular atenção quanto ao comportamento eletromecânico, gama de situações e ocorrências e quanto aos diferentes requisitos e procedimentos operacionais.
- Pode ser também potencialmente interessante a eventual inserção de reator apenas numa das extremidades da linha, ou a inserção de reatores nas duas extremidades, mas com diferentes valores da reatância dos reatores das duas extremidades. A solução mais adequada depende das características específicas da rede.

**Tabela 1 – Parâmetros correspondentes a diversas condições de operação da linha considerada como exemplo. Em todas as condições desta tabela considera-se iguais amplitudes da tensão nas duas extremidades da linha e diferentes valores da defasagem,  $\alpha$ , entre as tensões nas duas extremidades.**

**Os valores numéricos da tabela estão expressos nas seguintes “unidades” (pu):**

- Tensões ( $\hat{U}_k$  e  $|\hat{U}_k|$ ), “amplitude da tensão  $|\hat{U}_0|$ , nas duas extremidades da linha”;
- Potências ( $P_k$ ) e potências reativas ( $Q_k$ ): “ $P_{c0}$ , potência característica com tensão  $|\hat{U}_0|$ ”;
- Correntes ( $\hat{I}_k$ ,  $|\hat{I}_k|$ ): “amplitude da corrente com amplitude da tensão  $|\hat{U}_0|$ , potência igual à potência característica com essa tensão,  $P_{c0}$ , e potência reativa nula”.

$\alpha / \pi$	$\hat{U}_1$	$\hat{U}_2$	$\hat{I}_1$	$\hat{I}_2$	$P_1$	$P_2$	$Q_1$	$Q_2$	$\hat{U}_m$	$\hat{I}_m$
	$ \hat{U}_1 $	$ \hat{U}_2 $	$ \hat{I}_1 $	$ \hat{I}_2 $					$ \hat{U}_m $	$ \hat{I}_m $
1	-1	1	-0,0787017 i	-0,0787017 i	0	0	-0,0787017	0,0787017	0	1,00309 i
	1	1	0,0787017	0,0787017					0	1,00309
1,05	-0,987688 - -0,156434 i	1	-0,987688 - -0,156434 i	1	1	1	0	0	-0,0784591 + +0,996917 i	-0,0784591 + +0,996917 i
	1	1	1	1					1	1
1,1	-0,951057 - -0,309017 i	1	-1,95106 - -0,387719 i	1,97538 + +0,234167 i	1,97538	1,97538	0,234167	-0,234167	-0,311904 + +1,96929 i	-0,154986 + +0,978545 i
	1	1	1,98921	1,98921					1,99383	0,990742
1,0333333	-0,994522 - -0,104528 i	1	-0,659967 - -0,113289 i	0,668193 - -0,0436832 i	0,668193	0,668193	-0,0436832	0,0436832	-0,0349106 + + 0,666133 i	-0,0524258 + + 1,00034 i
	1	1	0,669620	0,669620					0,667048	1,00172
1,0666667	-0,978148 - -0,207912 i	1	-1,31270 - -0,216672 i	1,32907 + +0,0609887 i	1,32907	1,32907	0,0609887	-0,0609887	-0,13926 + +1,32497 i	-0,104277 + +0,992132 i
	1	1	1,33046	1,33046					1,33227	0,997597

**Tabela 2 – Parâmetros correspondentes a diversas condições de operação da linha considerada como exemplo, tendo eventualmente em série, nas duas extremidades, reatores, balanceados, destinados a limitar as sobretensões sustentadas a meio da linha, em caso de perturbação. Em todas as condições desta tabela considera-se iguais amplitudes (iguais ao valor de “referência”,  $|\hat{U}_0|$ ) e igual defasagem,  $\alpha$ , entre as tensões nas duas extremidades do conjunto linha e reatores, e diferentes valores da reatância (caracterizada pelo parâmetro  $\zeta$ ) dos reatores ligados em série com a linha (idênticos nas duas extremidades da linha).**

Os valores numéricos da tabela estão expressos nas seguintes “unidades” (pu):

- Tensões ( $\hat{U}_k$  e  $|\hat{U}_k|$ ), “amplitude da tensão  $|\hat{U}_k|$ , nas duas extremidades da linha”;
- Potências ( $P_k$ ) e potências reativas ( $Q_k$ ): “ $P_{c0}$ , potência característica com tensão  $|\hat{U}_0|$ ”;
- Correntes ( $\hat{I}_k$ ,  $|\hat{I}_k|$ ): “amplitude da corrente com amplitude da tensão  $|\hat{U}_0|$ , potência igual à potência característica com essa tensão,  $P_{c0}$ , e potência reativa nula”.

#### A – Parâmetros na linha

$\alpha / \pi$	$\hat{U}_1$	$\hat{U}_2$	$\hat{I}_1$	$\hat{I}_2$	$P_1$	$P_2$	$Q_1$	$Q_2$	$\hat{U}_m$	$\hat{I}_m$
$\zeta / \pi$	$ \hat{U}_1 $	$ \hat{U}_2 $	$ \hat{I}_1 $	$ \hat{I}_2 $					$ \hat{U}_m $	$ \hat{I}_m $
<b>1,0666667</b> <b>0</b>	-0,978148 - -0,207912 i	1	-1,31270 - -0,216672 i	1,32907 + +0,0609887 i	1,32907	1,32907	0,0609887	-0,0609887	-0,13926 + +1,32497 i	-0,104277 + +0,992132 i
	1	1	1,33046	1,33046					1,33227	0,997597
<b>1,0666667</b> <b>0,006</b>	-0,981728 - -0,187979 i	0,999358 + +0,0202415 i	-1,05746 - -0,189962 i	1,07385 + +0,0340473 i	1,07385	1,07385	0,0122891	-0,0122891	-0,112351 + +1,06895 i	-0,104432 + +0,993606 i
	0,999563	0,999563	1,07439	1,07439					1,07484	0,999079
<b>1,0666667</b> <b>0,008</b>	-0,982753 - -0,182956 i	0,999316 + + 0,0253682 i	-0,992971 - -0,183223 i	1,00937 + +0,027231 i	1,00937	1,00937	0,00160663	-0,00160663	-0,105553 + +1,00426 i	-0,104484 + +0,994099 i
	0,999638	0,999638	1,00973	1,00973					1,00980	0,999574
<b>1,0666667</b> <b>0,01</b>	-0,983716 - -0,178511 i	0,999334 + +0,0299157 i	-0,935842 - -0,177258 i	0,952245 + +0,0211882 i	0,952245	0,952245	-0,00731292	0,00731292	-0,0995298 + +0,946963 i	-0,104536 + +0,994591 i
	0,999782	0,999782	0,952481	0,952481					0,952179	1,00007

(continua na página seguinte)

Tabela 2 – continuação

## B – Parâmetros nos terminais do conjunto linha e reatores nas extremidades da linha

$\alpha / \pi$	$\hat{U}_{1C}$	$\hat{U}_{2C}$	$\hat{I}_{1C}$	$\hat{I}_{2C}$	$P_{1C}$	$P_{2C}$	$Q_{1C}$	$Q_{2C}$
$\xi / \pi$	$ \hat{U}_{1C} $	$ \hat{U}_{2C} $	$ \hat{I}_{1C} $	$ \hat{I}_{2C} $				
1,0666667 <b>0</b>	-0,978148 - -0,207912 i	1	-1,31270 - -0,216672 i	1,32907 + +0,0609887 i	1,32907	1,32907	0,0609887	-0,0609887
	1	1	1,33046	1,33046				
1,0666667 <b>0,006</b>	-0,978148 - -0,207912 i	1	-1,05746 - -0,189962 i	1,07385 + +0,0340473 i	1,07385	1,07385	0,0340473	-0,0340473
	1	1	1,07439	1,07439				
1,0666667 <b>0,008</b>	-0,978148 - -0,207912 i	1	-0,986829 - -0,212807 i	1,00788 + +0,0574088 i	1,00937	1,00937	0,00160663	-0,00160663
	1	1	1,00951	1,00951				
1,0666667 <b>0,01</b>	-0,978148 - -0,207912 i	1	-0,935842 - -0,177258 i	0,952245 + +0,0211882 i	0,952245	0,952245	0,0211882	-0,0211882
	1	1	0,952481	0,952481				

Rio de Janeiro, 06 de Maio de 2008

Carlos Portela