

DT521

Análise básica de alguns condicionamentos de operação de linhas muito longas e do eventual uso de compensação reativa

1– Introdução

Basicamente com o objetivo de exemplificar alguns dos condicionamentos de operação de linhas muito longas e do eventual uso de compensação reativa, apresenta-se um extrato da formulação aplicável e alguns exemplos.

No item 2 admite-se a hipótese de linha “ideal” sem perdas, que permite considerar menos parâmetros e evidenciar, aproximadamente, mas de forma bastante simples, alguns aspectos importantes.

No item 3 admite-se a hipótese de linha com perdas, o que é necessário para tratar e evidenciar alguns aspectos que não são considerados com precisão adequada com a simplificação de desprezar as perdas, feita no item 2.

No item 4 considera-se a resposta de uma linha com níveis elevados de compensação em função da frequência, no sentido de evidenciar a razão física básica dos problemas relativos a fenômenos do tipo ressonância e similares, típicos de soluções adotadas no Brasil nos últimos anos e dos troncos de corrente alternada previstos no documento R1.

Na Fig. 1 representa-se, esquematicamente, a linha considerada nos exemplos, com 2500 km.

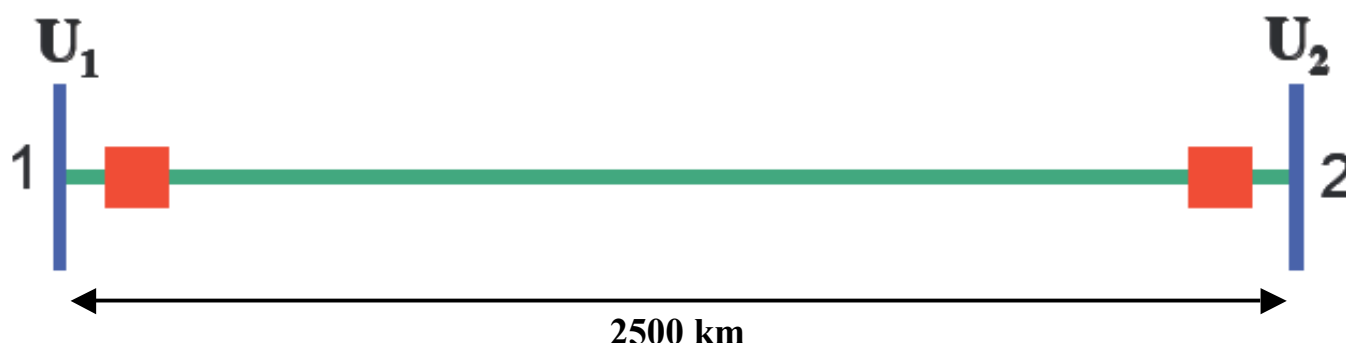


Fig. 1 – Representação esquemática da linha considerada nos exemplos, com e sem compensação, com 2500 km e tensão “nominal” 800 kV.

2– Linha “ideal” sem perdas

2.1– Relações básicas

2.1.1– Linha “ideal” “sem perdas”, sem compensação:

$$\Theta = \Theta_0 = \sqrt{XY} L \quad v = \frac{\omega}{\sqrt{XY}}$$

$$Z_c = Z_{c0} = \sqrt{\frac{X}{Y}} \quad P_c = P_{c0} = \frac{U_0^2}{Z_c} = \sqrt{\frac{Y}{X}} U_0^2$$

2.1.2– Linha “ideal” “sem perdas”, com compensação:

$$X = \xi X_0 \quad Y = \eta Y_0$$

$$\Theta = \Theta_0 = \sqrt{\xi \eta} \Theta_0 \quad Z_c = \sqrt{\frac{\xi}{\eta}} Z_{c0} \quad P_c = \sqrt{\frac{\eta}{\xi}} P_{c0}$$

Fatores de compensação em série e em derivação

$$\xi^* = 1 - \xi \quad \eta^* = 1 - \eta$$

2.1.3– Exemplo, baseado em linha de 2500 km, 800 kV, “desprezando perdas”

$$\Theta_0 = 3,26721 \text{ rad} = 187,197 \text{ grau} \quad P_{c0} = 4,849 \text{ GW}$$

Potência reativa (indutiva) em derivação para “compensação total” com tensão nominal em toda a linha

$$Q_{dtotal} = 15,844 \text{ Gvar}$$

Potência reativa (capacitiva) em série para “compensação total” com potência característica e tensão nominal em toda a linha

$$Q_{stotal} = 15,844 \text{ Gvar}$$

2.2– Hipótese de compensação apenas em derivação

Na hipótese de compensação apenas em derivação ($\xi^* = 0$, $\xi = 1$)

$$\Theta = \sqrt{\eta} \Theta_0 = \sqrt{1-\eta^*} \Theta_0 \quad P_c = \sqrt{\eta} P_{c0} = \sqrt{1-\eta^*} P_{c0}$$

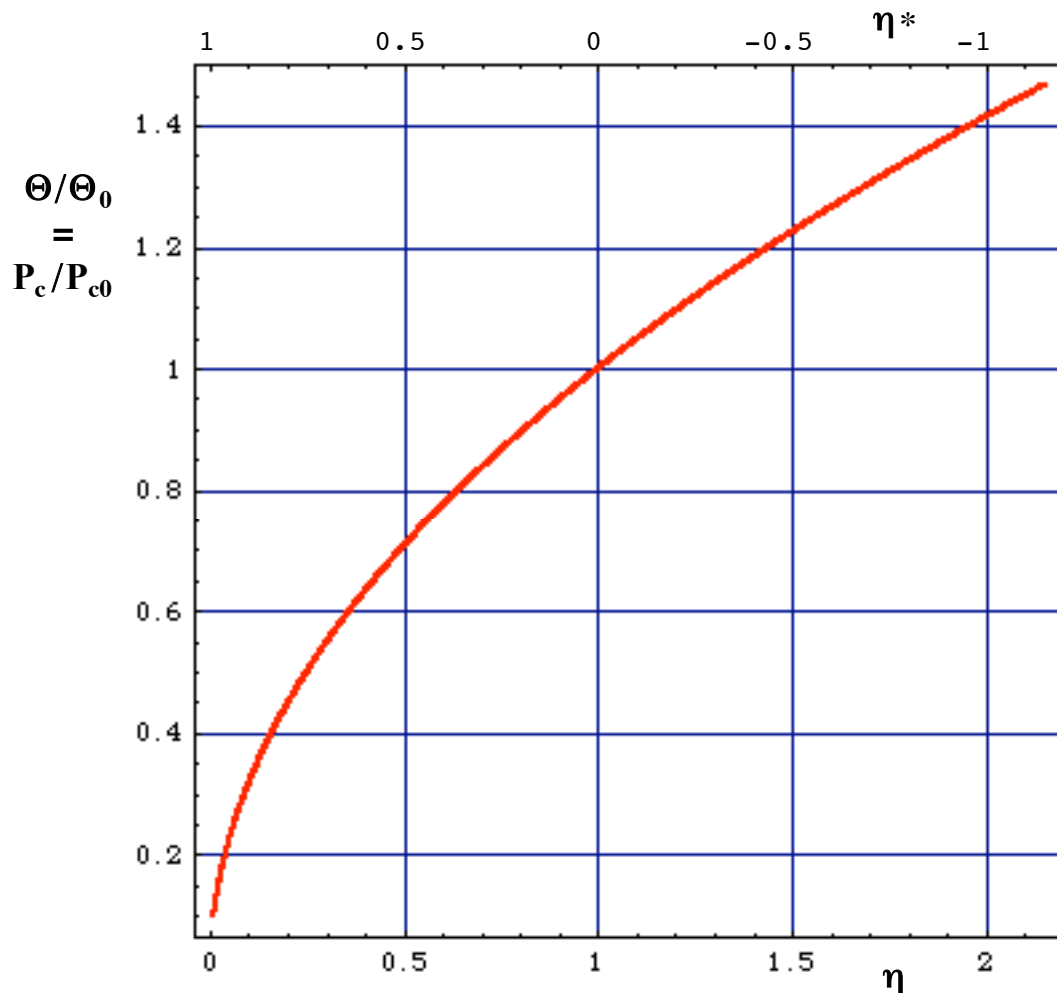


Fig. 2 – Relação entre os parâmetros $[\eta^*, \eta]$, caracterizando o efeito da compensação reativa em derivação, para uma linha “ideal sem perdas” “com compensação reativa em derivação” e sem compensação em série ($\xi^* = 0$, $\xi = 1$), e as relações Θ/Θ_0 e P_c/P_{c0} .

Nota – Para η da ordem de 10^{-2} ou inferior, a hipótese de supor a linha sem perdas introduz desvios importantes em relação à realidade.

2.3– Hipótese de compensação em derivação e em série

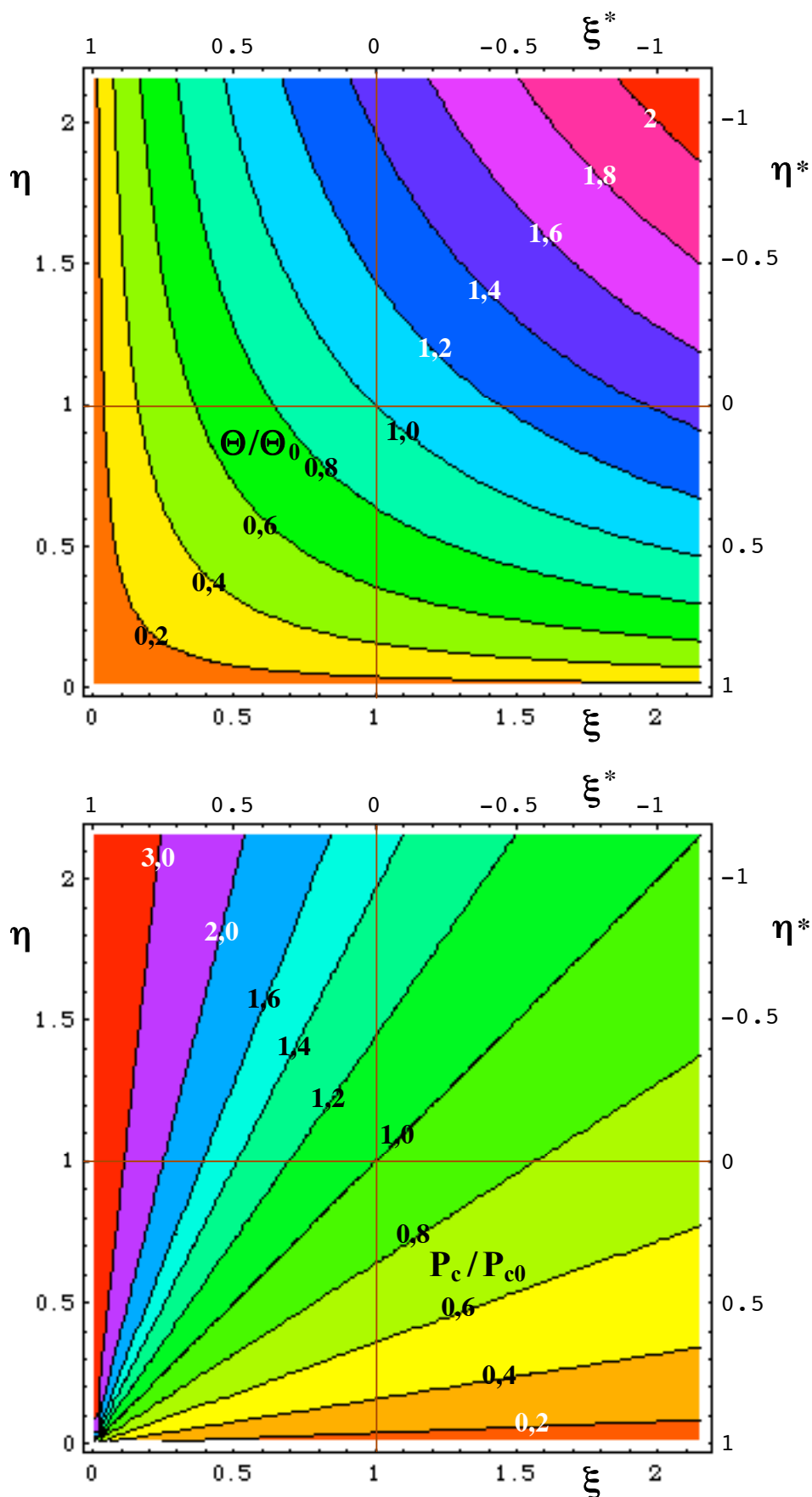


Fig. 3 – Relações Θ/Θ_0 e P_c/P_{c0} em função dos parâmetros ξ , η , ou ξ^* , η^* , caracterizando o efeito da compensação reativa em série e em derivação, para uma linha “ideal sem perdas”.

Nota – Para ξ e ou η da ordem de 10^{-2} ou inferior, a hipótese de supor a linha sem perdas introduz desvios importantes em relação à realidade.

3– Linha “com perdas” e com compensação reativa

3.1– Parâmetros de linha considerada como exemplo

Exemplo, baseado em linha de 2500 km, 800 kV, “considerando perdas”

$$\Theta_0 = 3,26780 \text{ rad} = 187,231 \text{ grau}$$

$$P_{c0} = 4,847 \text{ GW}$$

Potência reativa (indutiva) em derivação para “compensação total” com tensão nominal em toda a linha

$$Q_{dtotal} = 15,844 \text{ Gvar}$$

Potência reativa (capacitiva) em série para “compensação total” com potência característica e tensão nominal em toda a linha

$$Q_{stotal} = 15,844 \text{ Gvar}$$

3.2– Compensação apenas em derivação

Fatores de compensação em série e em derivação

$$\xi^* = 1 - \xi$$

$$\eta^* = 1 - \eta$$

Hipótese de compensação apenas em derivação ($\xi^* = 0$, $\xi = 1$), sendo a “compensação” caracterizada por

$$\eta^* = 1 - \eta$$

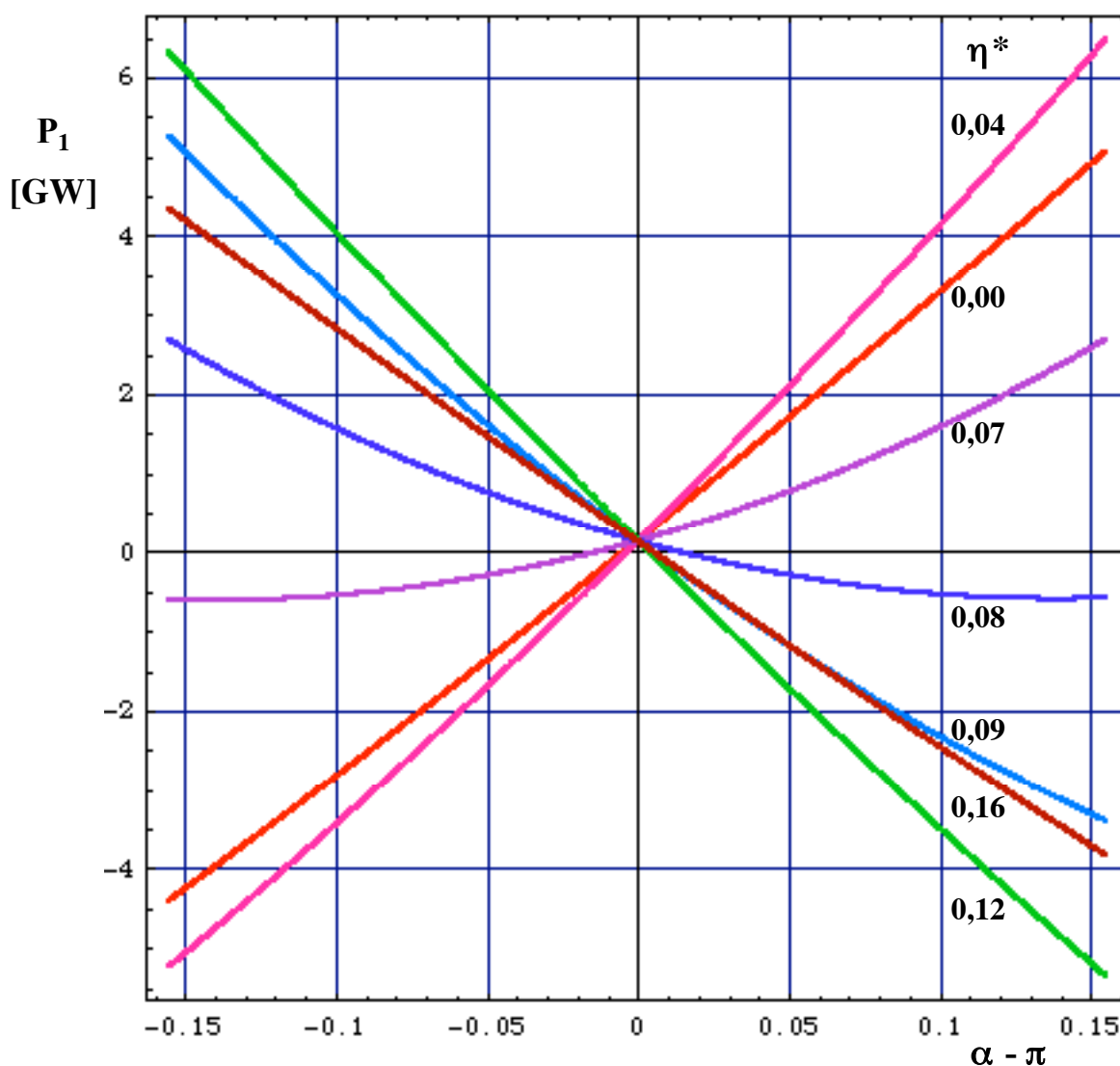


Fig. 4 – Exemplo de linha com compensação reativa em derivação e sem compensação em série ($\xi = 1$, $\xi^* = 0$), considerando “perdas”, na linha e na compensação. Valor relativo da compensação reativa em derivação expresso pelo parâmetro $\eta^* = 1 - \eta$. Tensões nas duas extremidades da linha, de igual módulo, igual ao valor nominal da tensão da linha.

Potência, P_1 , no terminal 1, expressa, em função da defasagem, α , entre as tensões nas duas extremidades da linha, para diversos valores de η^* , para α na gama $[\pi - 0,155 , \pi + 0,155]$.

A figura evidencia que, nas condições do exemplo, e para valores reduzidos de η^* , uma variação moderada de η^* pode originar, ou “impedir”, uma condição de instabilidade para operação da linha com α na vizinhança de π , e que, para níveis de compensação tais que $\Theta < \pi$, ou $\Theta \cong \pi$, a operação, com α na vizinhança de π , é, em princípio, instável (salvo eventuais sistemas de controle normalmente não necessários em redes de transmissão).

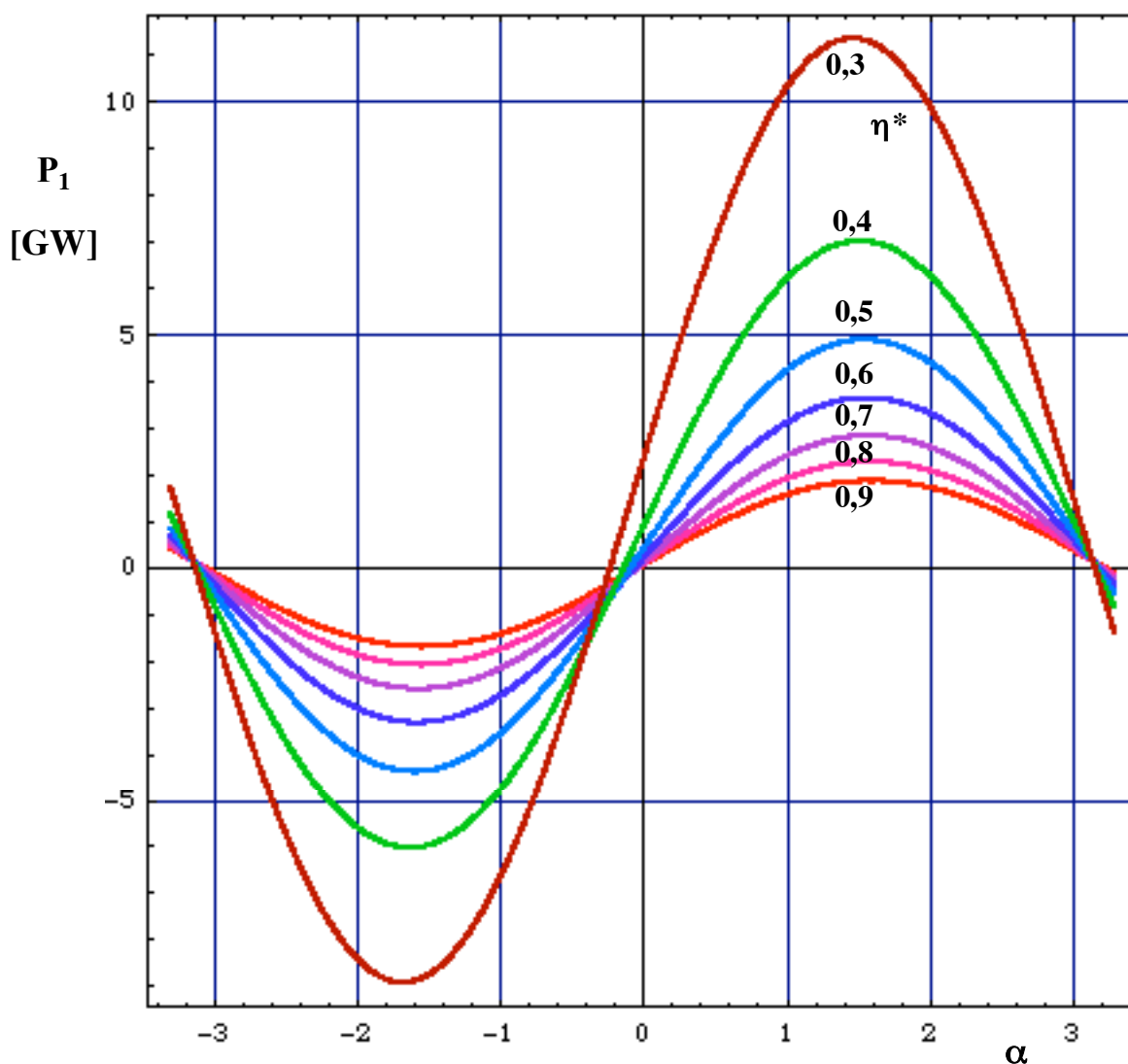


Fig. 5 – Exemplo de linha com compensação reativa em derivação e sem compensação em série ($\xi = 1$, $\xi^* = 0$), considerando “perdas”, na linha e na compensação. Valor relativo da compensação reativa em derivação expresso pelo parâmetro $\eta^* = 1 - \eta$. Tensões nas duas extremidades da linha, de igual módulo, igual ao valor nominal da tensão da linha.

Potência, P_1 , no terminal 1, expressa, em função da defasagem, α , entre as tensões nas duas extremidades da linha, para diversos valores de η^* , para α na gama $[-\pi - 0,155, \pi + 0,155]$.

A figura evidencia que, nas condições do exemplo, e para valores de η^* superiores a cerca de 0,5 a potência máxima transmitida é inferior à potência característica da linha sem compensação reativa, e tanto mais baixa quanto maior η^* , além de outros condicionamentos indesejáveis que são melhor evidenciados nas figuras seguintes.

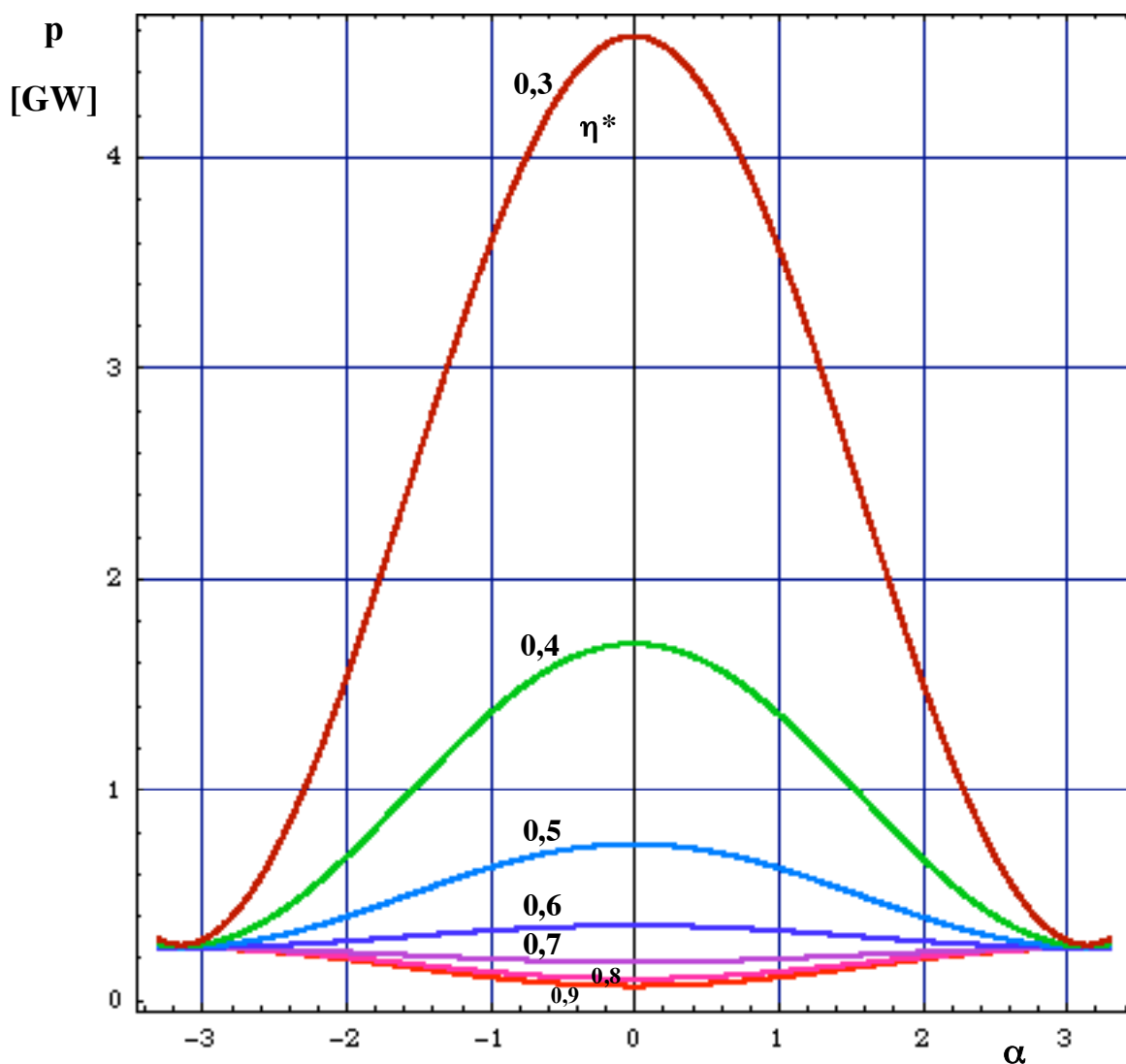


Fig. 6 – Exemplo de linha com compensação reativa em derivação e sem compensação em série ($\xi = 1$, $\xi^* = 0$), considerando “perdas”, na linha e na compensação. Valor relativo da compensação reativa em derivação expresso pelo parâmetro $\eta^* = 1 - \eta$. Tensões nas duas extremidades da linha, de igual módulo, igual ao valor nominal da tensão da linha.

Perdas, p , na linha e no sistema de compensação reativa da linha, expressas em função da defasagem, α , entre as tensões nas duas extremidades da linha, para diversos valores de η^* , para α na gama $[-\pi - 0,155, \pi + 0,155]$.

A figura evidencia que, nas condições do exemplo, e para valores de η^* inferiores a cerca de 0,5, para operação com α na proximidade de 0, as perdas, na linha e sistema de compensação, são muito elevadas.

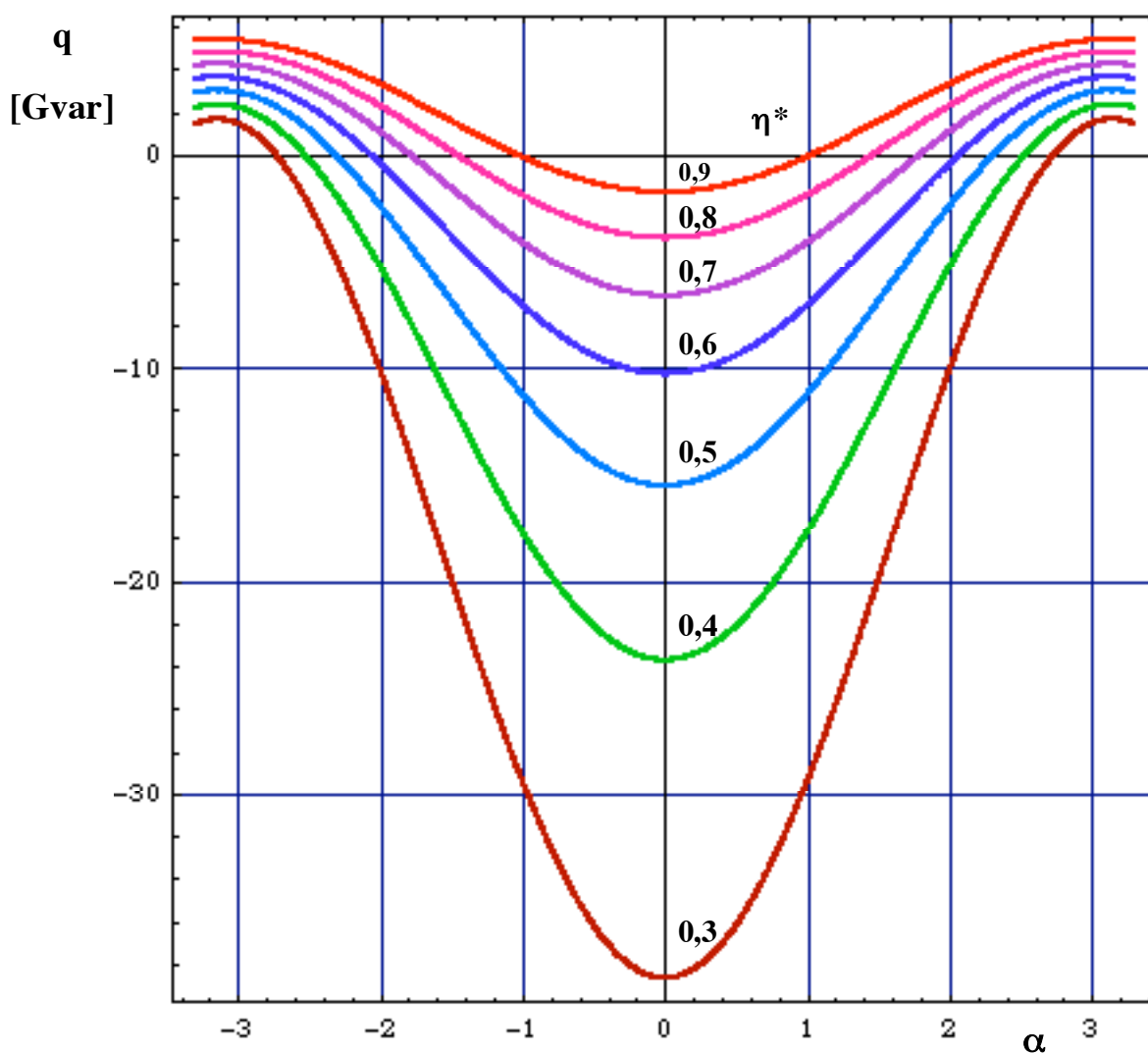


Fig. 7 – Exemplo de linha com compensação reativa em derivação e sem compensação em série ($\xi = 1$, $\xi^* = 0$), considerando “perdas”, na linha e na compensação. Valor relativo da compensação reativa em derivação expresso pelo parâmetro $\eta^* = 1 - \eta$. Tensões nas duas extremidades da linha, de igual módulo, igual ao valor nominal da tensão da linha.

Consumo de potência reativa, q , na linha e no sistema de compensação reativa da linha, expresso em função da defasagem, α , entre as tensões nas duas extremidades da linha, para diversos valores de η^* , para α na gama $[-\pi - 0,155, \pi + 0,155]$.

A figura evidencia que, nas condições do exemplo, e para valores de η^* inferiores a cerca de 0,8, para operação com α na proximidade de 0, o consumo de potência reativa, na linha e sistema de compensação, é, em módulo, muito elevado.

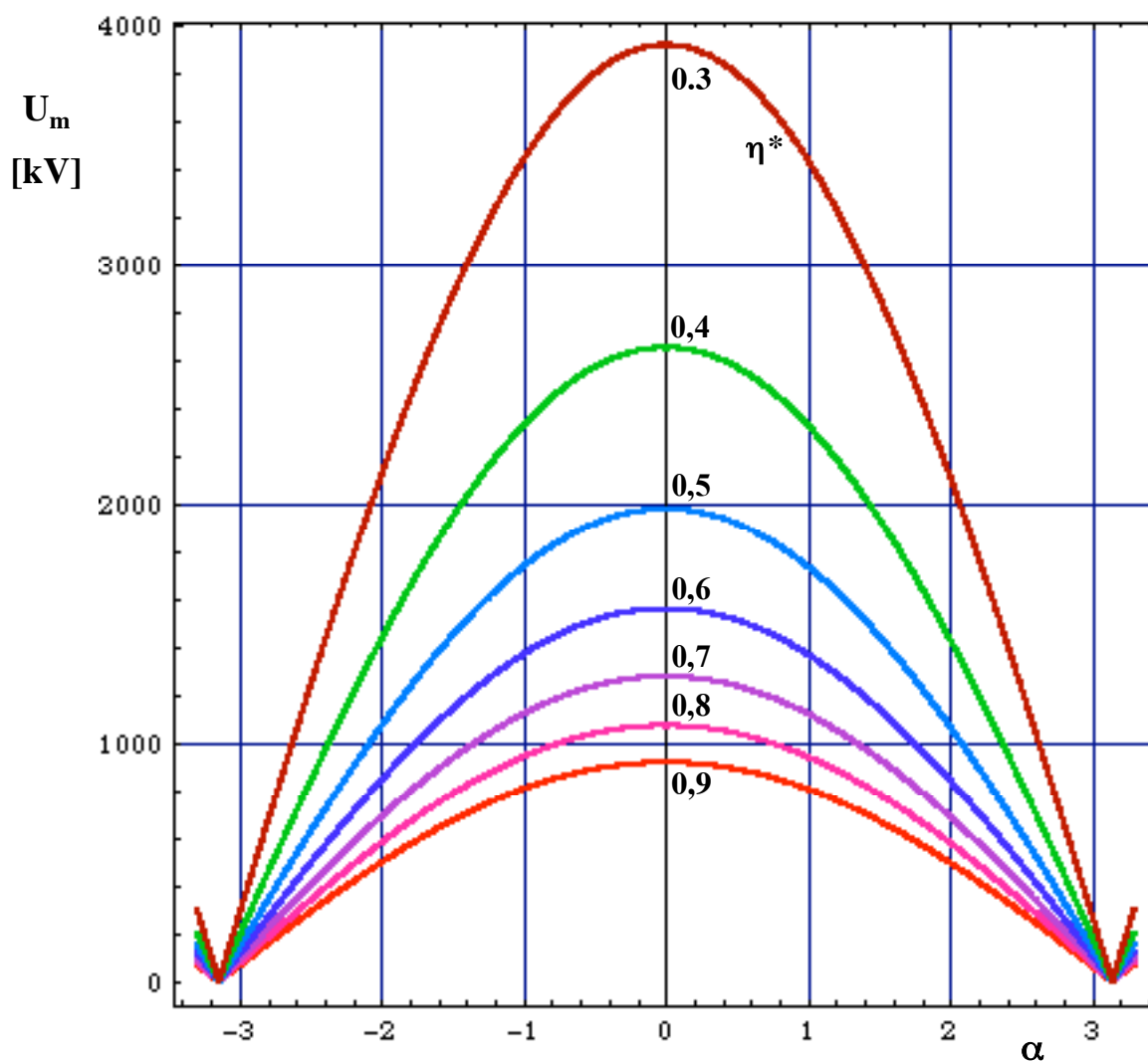


Fig. 8 – Exemplo de linha com compensação reativa em derivação e sem compensação em série ($\xi = 1$, $\xi^* = 0$), considerando “perdas”, na linha e na compensação. Valor relativo da compensação reativa em derivação expresso pelo parâmetro $\eta^* = 1 - \eta$. Tensões nas duas extremidades da linha, de igual módulo, igual ao valor nominal da tensão da linha.

Tensão, U_m , a meio da linha, expressa em função da defasagem, α , entre as tensões nas duas extremidades da linha, para diversos valores de η^* , para α na gama $[-\pi - 0,155, \pi + 0,155]$.

A figura evidencia que, nas condições do exemplo, e para valores de η^* inferiores ou da ordem de 0,9, para operação com α na proximidade de 0, a tensão a meio da linha é muito elevada.

4– Condicionamentos de comportamento em função da frequência de linha muito longas com compensação reativa elevada

4.1– Hipóteses consideradas como exemplo

- Linha de 2500 km, 800 kV, “considerando perdas”, descrita no item 3.
- Variantes comparadas:
 - A- Linha com 100 % de compensação em derivação ($\eta^* = 1$, $\eta = 0$) e 70 % de compensação em série ($\xi^* = 0,7$, $\xi = 0,3$).
 - B- Linha sem compensação em derivação ($\eta^* = 0$, $\eta = 1$) e sem compensação em série ($\xi^* = 0$, $\xi = 1$).
- Aproximações admitidas para determinar os parâmetros que caracterizam a resposta da linha, e respectiva compensação, em função da frequência, f (para f não superior a 60 Hz):
 - Impedância longitudinal unitária da linha, não homopolar, com parte real independente de f e parte imaginária proporcional a f .
 - Admitância transversal unitária da linha, não homopolar, com parte real nula e parte imaginária proporcional a f .
 - Impedância “longitudinal unitária” da compensação série, não homopolar, com parte real nula e parte imaginária inversamente proporcional a f .
 - Admitância “transversal unitária” da compensação em derivação, não homopolar, com parte real nula e parte imaginária inversamente proporcional a f .
- Caracterização dos parâmetros da linha, em função da frequência, f , pelos parâmetros Z_e e Y_{e2} do esquema π equivalente da Fig. 9, expressos em função de f e calculados usando as funções hiperbólicas aplicáveis.

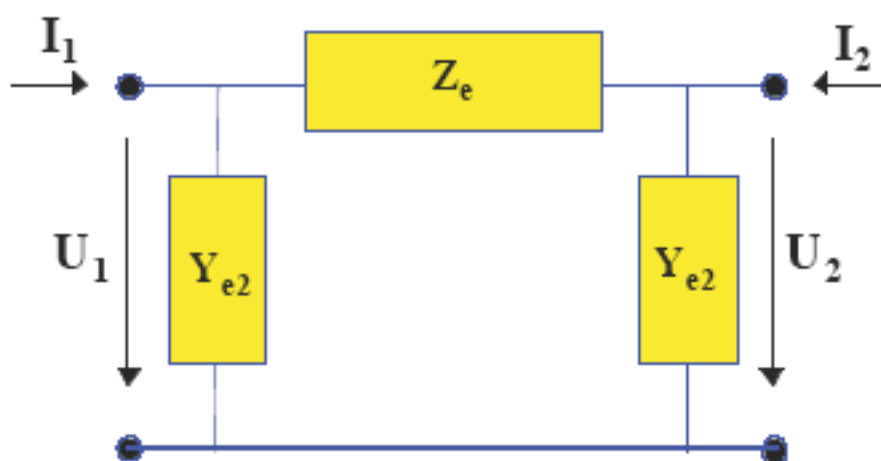
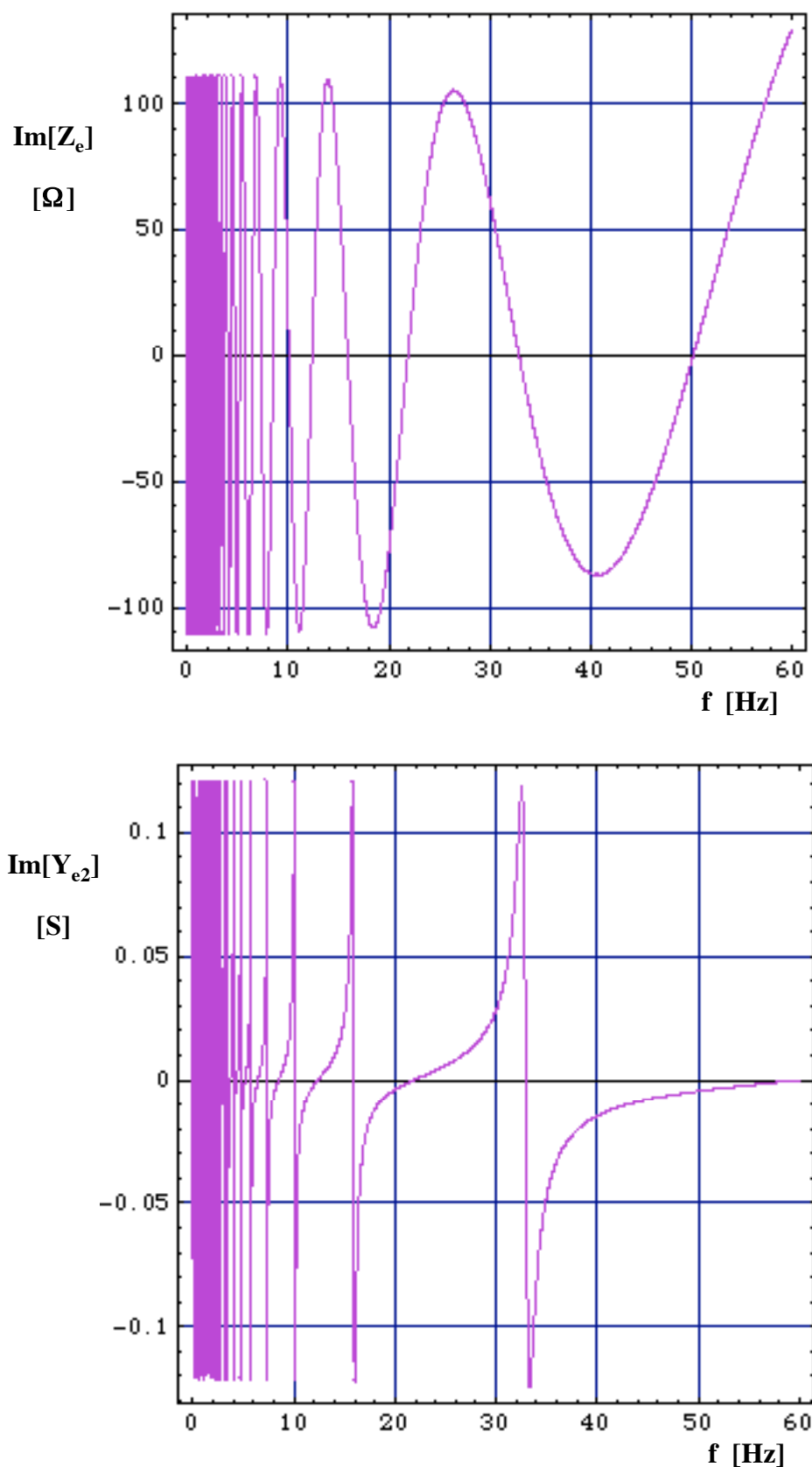


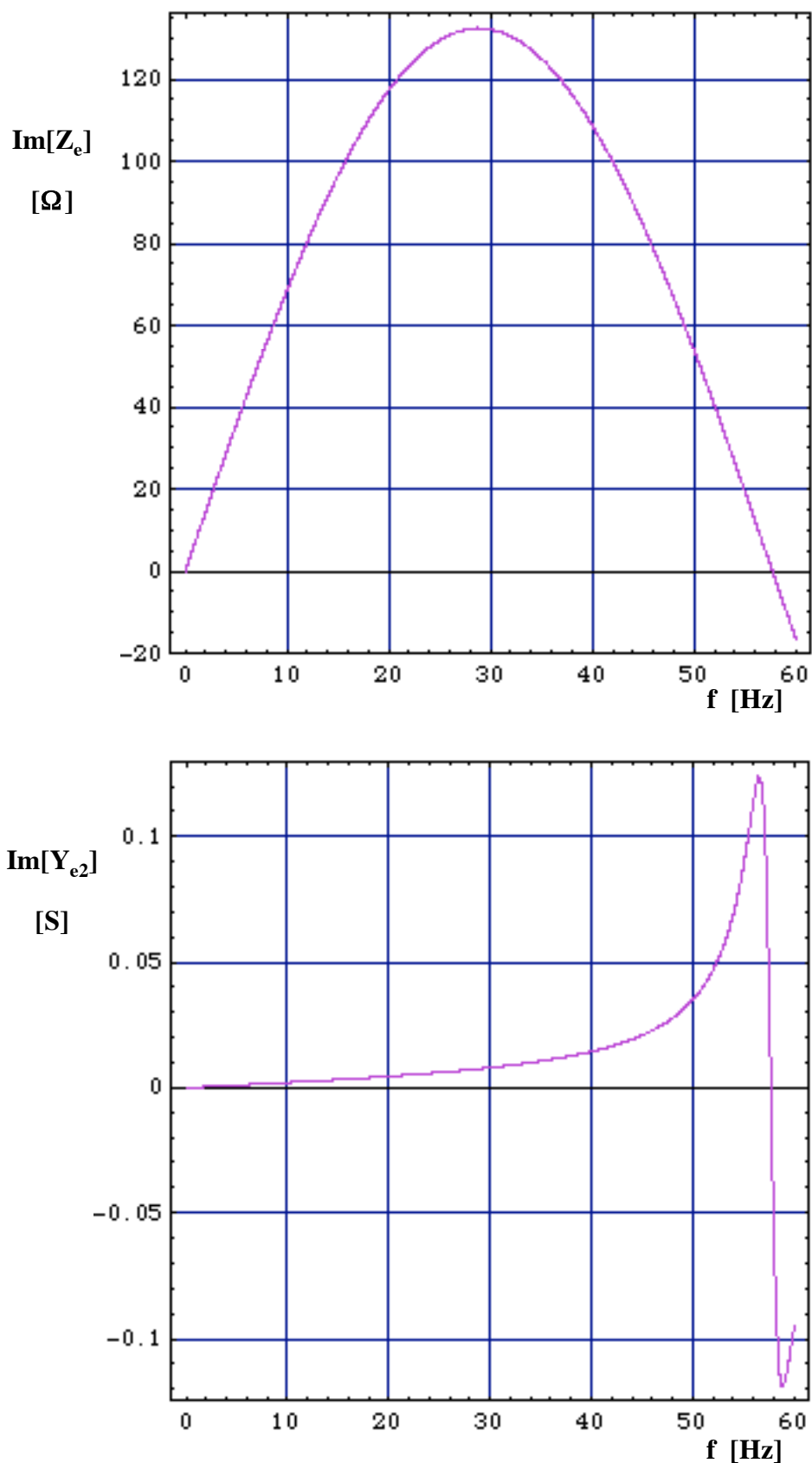
Fig. 9 – Modelo π equivalente da linha, vista dos terminais, para modo não homopolar.

Nas Figs. 10 e 11, representa-se as componentes imaginárias de Z_e e Y_{e2} , em função de f , respectivamente para as variantes A e B.

4.2– Resultados do exemplo e conclusões



**Fig. 10 – Componentes imaginárias de Z_e e Y_{e2} , em função de f , para a variante A .
Linha com 100 % de compensação em derivação ($\eta^* = 1$, $\eta = 0$) e 70 % de compensação em série ($\xi^* = 0,7$, $\xi = 0,3$).**



**Fig. 11 – Componentes imaginárias de Z_e e Y_{e2} , em função de f , para a variante B .
 Linha sem compensação, nem derivação ($\eta^* = 0$, $\eta = 1$), nem em série ($\xi^* = 0$, $\xi = 1$).**

A Fig. 10 evidencia que uma linha muito longa, com compensação reativa muito elevada:

- É uma fonte potencial de condições de ressonância ou pouco amortecidas, associadas a interação entre a linha e as redes interligadas.
- Essa fonte potencial de condições de ressonância ou pouco amortecidas está associada a uma gama bastante larga de “condições de rede”, o que, dada a diversidade de situações das redes interligadas, e a imprecisão sobre os seus parâmetros, tem uma probabilidade elevada de impedir medidas corretivas eficazes.

Este problema tem ocorrido em diversas linhas longas brasileiras, e há forte risco de vir a ocorrer com as soluções previstas pela EPE para a ligação das usinas de Santo Antônio e Jirau.

Aliás, neste mesmo sentido, merece reproduzir a seguinte passagem do documento R2 (página 53) que foi disponibilizado muito recentemente no site da ANEEL [1]:

Finalmente, deve-se atentar para o modo de oscilação subsíncrono, em torno de 13 Hz, presente em vários dos casos simulados. Como se poderia esperar, esta oscilação é decorrente do considerável grau de compensação série no tronco de 500 kV, como fica evidenciado na Figura 13. Promovendo-se o by-pass de todos os capacitores série do tronco esse modo de oscilação não mais está presente como ilustra a Figura 14, reproduzida do Anexo 3.

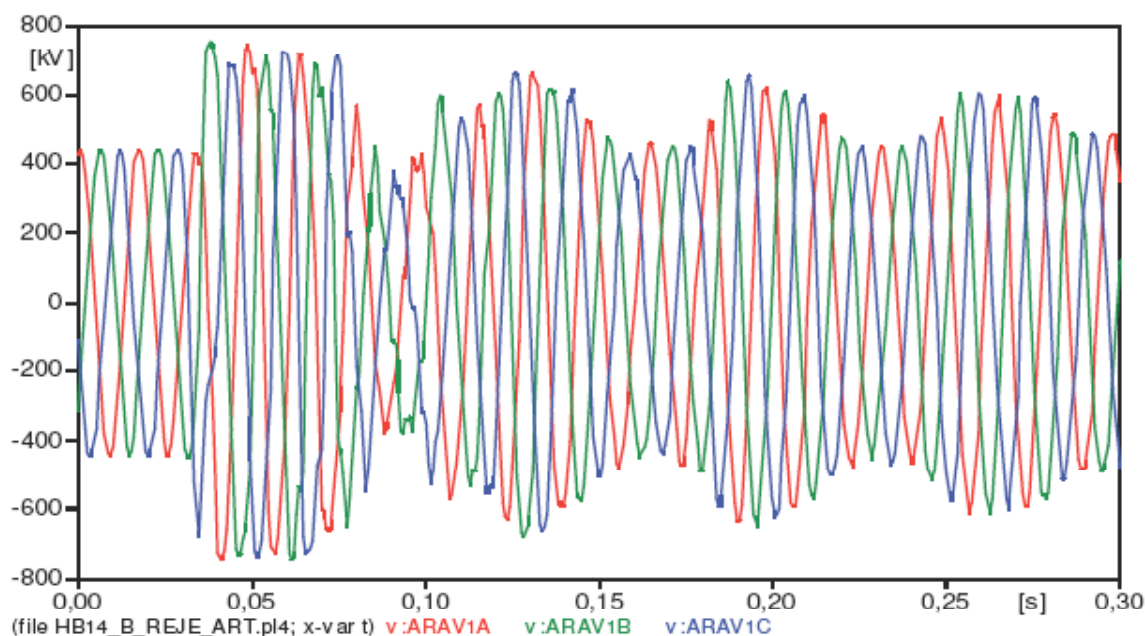


Figura 13 – Tensões fase-terra no terminal Araraquara da linha AV-AR, com rejeição em Araraquara e entre AV2 e AV, sem falta em AR. Sem *by-pass* prévio dos capacitores série

[1] DETALHAMENTO DA ALTERNATIVA DE REFERÊNCIA – RELATÓRIOS R2 – Estudos para Definição das Características Básicas do Sistema de Transmissão de Integração das Usinas do Madeira – Alternativa Híbrida

Em contrapartida, a Fig. 11 evidencia que a alternativa proposta, de linha de pouco mais de meia onda, sem compensação reativa (ou com compensação muito reduzida), não origina este tipo de problema.

Rio de Janeiro, 4 de Julho de 2008

Carlos Portela