

ANÁLISE DA REPRESENTAÇÃO DAS LINHAS LONGAS NOS DIAGRAMAS RX PARA A PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA

AFONSO HENRIQUE MOREIRA SANTOS

RESUMO

Este trabalho tem a finalidade de analisar a não linearidade dos diagramas R-X nas representações das linhas longas em EHV, tendo em vista que usualmente despreza-se o efeito dos parâmetros distribuídos, bem como dos ramos em paralelo, para o ajuste da proteção de distância.

ABSTRACT

This paper aims at analysing the non linearity of the R-X diagram in the EHV long distance line representation, considering that one usually ignores the effect of the distributed parameters and shunt branches in order to adjust the distance protection.

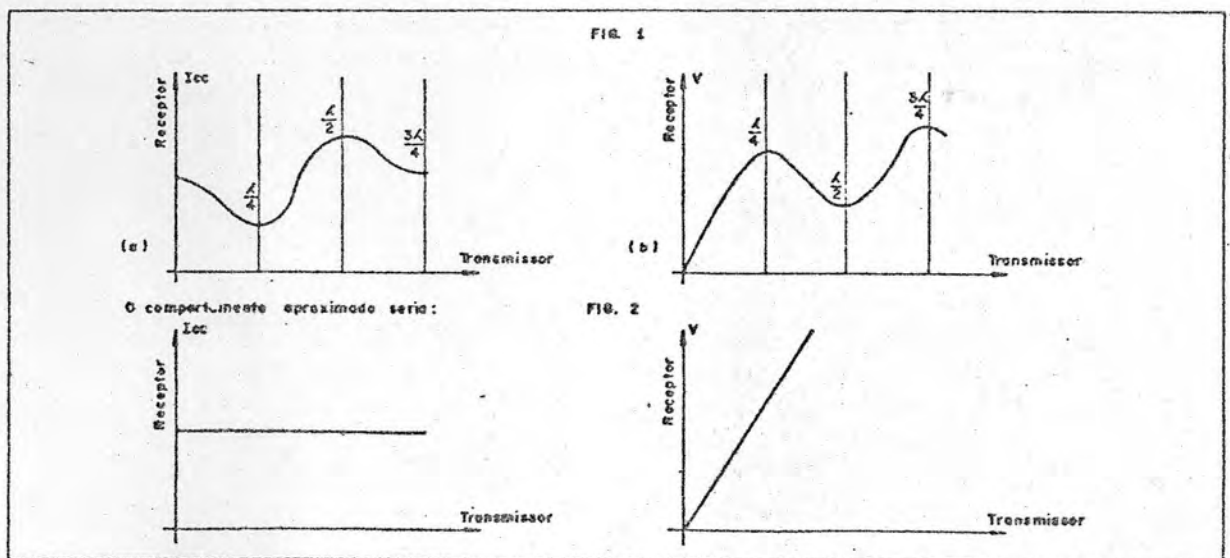
I. INTRODUÇÃO

Nas linhas longas em EHV a costuma-se representar as linhas, nos diagramas R-X, por parâmetros concentrados e considerando apenas o ramo série não se produz a verdade, podendo comprometer os ajustes dos relés de distância.

A referência 1 (pág. 85) nos mostra a não linearidade da impedância com a dis

tância (figura 1). Na figura 2 (comportamento aproximado) a corrente é a mesma em qualquer parte da linha pois não há ramos Shunt, e a tensão decresce do transmissor para o receptor linearmente com a distância.

Note que existe uma grande diferença entre o aproximado e o exato para distâncias maiores que $\lambda/4$.



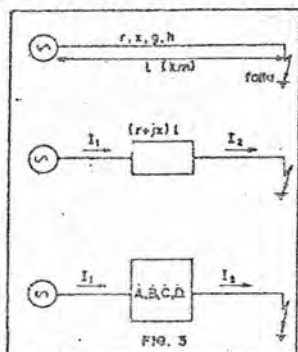
Este efeito é acentuado nas linhas acima de 600 Km. Hoje, com os aproveitamentos hidroeletéricos em locais distantes dos centros de consumo, há uma tendência obrigatória para o estudo destas linhas. A ref. 3 diz ocorrer problemas para linhas acima de 500 kV e 500 Km, principalmente quando apresentam compensação, o que é bastante comum.

A soma linear das impedâncias das linhas com as impedâncias de compensação podem introduzir erros apreciáveis. Um modo correto de se fazer é através de quadrípolos, conforme ref. 1, tabela 4.3-a e 4.3-b.

II. DESENVOLVIMENTO MATEMÁTICO

A consideração da linha como um ramo série com parâmetros concentrados é normalmente usada para a calibração de relés de distância. A impedância assim calculada, para um curto em determinado ponto, será chamada neste trabalho de $Z_{utilizada}$ da por ser a utilizada na calibração. A impedância "vista" pelo relé numa falta será chamada Z_{vista} .

Podemos definir o problema sobre os seguintes dois aspectos:



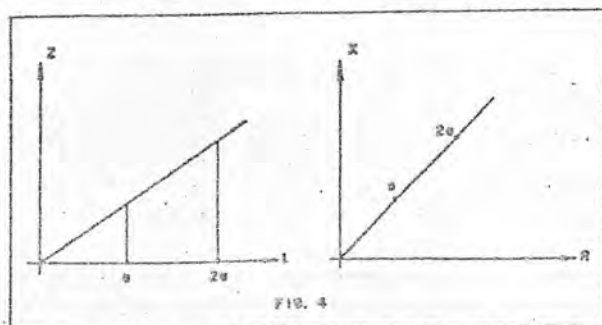
fenômeno físico
 caso 1: parâmetros concentrados desprezando os ramos Shunt
 caso 2: parâmetros distribuídos adotando-se o quadrípulo como ferramenta de trabalho.

No primeiro caso: $I_1 = I_2$

No segundo caso: $I_1 \neq I_2$

A impedância vista pelo relé no primeiro caso é:

$$\dot{Z}_{utilizada} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}_1} = (r + jx)l$$



No segundo caso temos da ref. 1, pág. 146, a seguinte expressão:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{D}}{\dot{B}} \cdot \dot{U}_1 - \frac{\dot{U}_2}{\dot{B}}$$

onde:

$$\begin{aligned} \dot{D} &= \cosh \dot{\gamma}l \\ \dot{B} &= \dot{Z}_c \operatorname{sen} \dot{\gamma}l \end{aligned} \quad \text{eq. 4.47 e 4.48 (ref.1)}$$

$$\dot{Z}_c = \sqrt{\frac{r+jx}{g+jb}} \quad \text{eq. 3.53 e 3.59 (ref.1)}$$

$$\dot{\gamma} = \sqrt{(r+jx)(g+jb)}$$

Como estamos analisando curtos circuitos, teremos: $\dot{U}_2 = 0$

Então:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{D}}{\dot{B}} \dot{U}_1$$

Logo, a impedância vista pelo relé será:

$$\dot{Z}_{vista} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \frac{\dot{B}}{\dot{D}} = \frac{\dot{B}}{\dot{D}}$$

Esta é realmente a impedância vista pelo relé enquanto a outra é utilizada nas calibrações:

Podemos desenvolver para:

$$\dot{Z}_{vista} = \dot{Z}_c \frac{\operatorname{senh} \dot{\gamma}l}{\cosh \dot{\gamma}l} = \dot{Z}_c \cdot \operatorname{tgh} \dot{\gamma}l$$

$$\dot{Z}_{vista} = \frac{\sqrt{\frac{r+jx}{g+jb}} \cdot \dot{\gamma}}{\dot{\gamma}} \cdot \operatorname{tgh} \dot{\gamma}l = \frac{\sqrt{r+jx} \cdot \dot{\gamma} \cdot \operatorname{tgh} \dot{\gamma}l}{\sqrt{g+jb} \cdot \dot{\gamma}}$$

$$\dot{Z}_{vista} = \frac{\sqrt{r+jx} \cdot \sqrt{(r+jx)} \cdot \sqrt{(g+jb)}}{\sqrt{g+jb} \cdot \dot{\gamma}} \operatorname{tgh} \dot{\gamma}l = (r+jx) \frac{\operatorname{tgh} \dot{\gamma}l}{\dot{\gamma}}$$

$$\dot{Z}_{vista} = (r+jx)l \cdot \frac{\operatorname{tgh} \dot{\gamma}l}{\dot{\gamma}l} = Z_{utilizada} \cdot \frac{\operatorname{tgh} \dot{\gamma}l}{\dot{\gamma}l}$$

Esta expressão é apresentada, sem devida simplificação, com maior simplicidade na ref. 3, pág.2. Nesta referência não se considera o erro de fase introduzido. Este erro também pode influenciar a calibração do relé.

Uma simplificação razoável é desprezar as perdas da linha. Poderemos, então, obter o erro de módulo. Vejamos:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$\dot{\gamma} = \alpha + j\beta = \sqrt{(r+jx)(g+jb)} = \sqrt{(r+j\omega L)(g+j\omega C)}$$

desprezando as perdas temos:

$$\dot{\gamma} = \sqrt{-\omega^2 LC} = j\omega\sqrt{LC} = j\beta \quad \therefore \alpha = 0$$

lembramos que:

$$\begin{aligned} \cosh \dot{\gamma} l &= \cosh(\alpha l) \cos(\beta l) + j \sinh(\alpha l) \sin(\beta l) \\ \sinh \dot{\gamma} l &= \sinh(\alpha l) \cos(\beta l) + j \cosh(\alpha l) \sin(\beta l) \end{aligned}$$

ou para $\alpha = 0$

$$\cosh \dot{\gamma} l = \cos \beta l \rightarrow \operatorname{tgh} \dot{\gamma} l = j \cdot \operatorname{tg} \beta l$$

$$\sinh \dot{\gamma} l = j \sin \beta l$$

então:

$$\frac{\operatorname{tgh} \dot{\gamma} l}{\dot{\gamma} l} = \frac{j \cdot \operatorname{tg} \beta l}{j \beta l} = \frac{\operatorname{tg} \beta l}{\beta l} = \frac{\operatorname{tg} \theta}{\theta}$$

onde: $\theta = \beta l = \omega \sqrt{LC} \cdot l = \frac{\omega l}{V}$

logo:

$$Z_{\text{vista}} = Z_{\text{utilizada}} \cdot \frac{\operatorname{tg} \theta}{\theta}$$

Esta expressão é mostrada, sem dedução, na ref. 3, pág. 3. O erro cometido será então:

$$l = Z_{\text{vista}} - Z_{\text{utilizada}} = \left(\frac{\operatorname{tg} \theta}{\theta} - 1 \right) \cdot Z_{\text{utilizada}}$$

ou

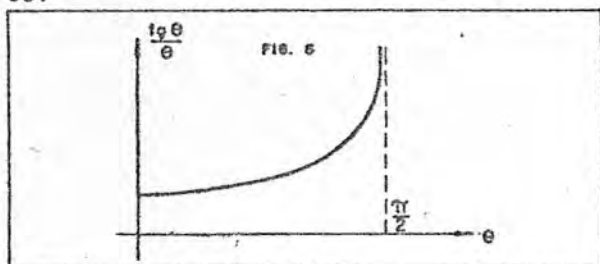
$$l\% = \frac{Z_{\text{vista}} - Z_{\text{utilizada}}}{Z_{\text{utilizada}}} = \left(\frac{\operatorname{tg} \theta}{\theta} - 1 \right) \cdot 100\%$$

A mesma referência afirma que em linhas de 50 Hz (europeias) em torno de 600 Km. aparece um erro de 16% na impedância positiva e de 50% na impedância de uma fase. Erros que em hipótese alguma podem ser negligenciados.

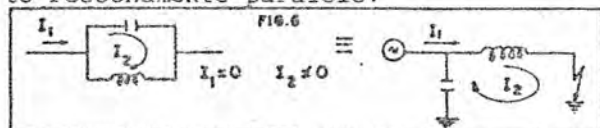
Os Harmônicos, importantes nos relés estáticos, sofrem ainda maior influência. Para o exemplo acima concluímos que:

$$\frac{\operatorname{tg} \theta}{\theta} - 1 = 0,16 \rightarrow \theta = 0,628 \text{ [rd]}$$

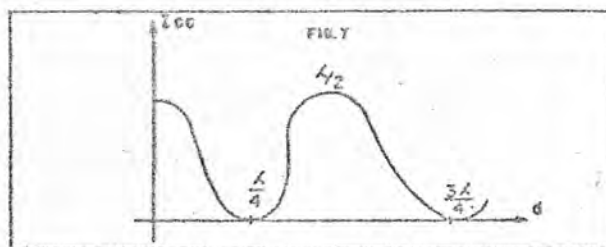
O comportamento da curva $\frac{\operatorname{tg} \theta}{\theta}$ é o seguinte:



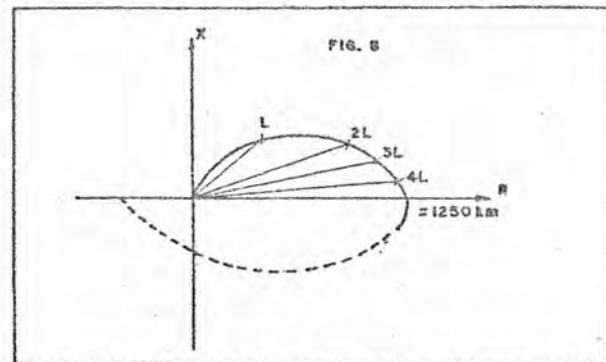
Isto significa que para comprimentos da ordem de 1.250 Km, na frequência de 60 Hz, a impedância vista pelo relé tende a infinito, ou seja, embora a linha esteja em curto circuito não haverá circulação de corrente onde está o relé ($I_1=0$). Em termos simples, é como se fosse um circuito ressonante paralelo:



Isto só ocorre em linhas sem perda. A figura 1 (a) se torna, para este caso:



Em termos de diagrama R.X, o que ocorre em uma linha real é o seguinte:



Ou seja: a medida que aumentamos a distância do curto-circuito há um aumento do fator de potência até tornar-se capacitivo para distância pouco maiores que 1250 Km (em 60 Hz).

III. EXEMPLIFICAÇÃO ANALÍTICA

Para se analisar o comportamento da proteção de distância nas linhas em estudo, foi escolhida uma linha fictícia estudada na referência 4. Seus parâmetros são os seguintes:

$$\begin{aligned} v &= 750 \text{ KV} \\ r &= 0,0048 \text{ } \Omega/\text{Km} \\ g &= 0 \\ X &= 0,30278 \text{ } \Omega/\text{Km} \\ b &= 4,2627 \times 10^{-6} \text{ } \Omega/\text{Km} \end{aligned}$$

Com estes valores calculou-se $\dot{\gamma}$ como:

$$\dot{\gamma} = 1,647408 \text{ } \angle 89,55^\circ$$

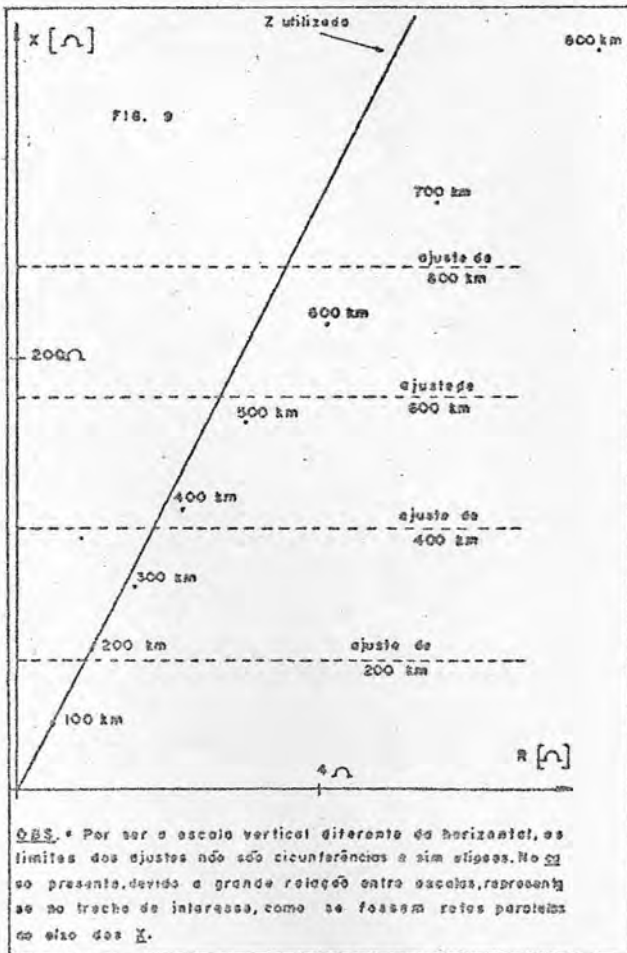
Usando a equação:

$$\dot{Z}_{\text{vista}} = \dot{Z}_{\text{utilizada}} \cdot \frac{\operatorname{tgh} \dot{\gamma} l}{\dot{\gamma} l}$$

desenvolvida anteriormente, levantou-se a seguinte tabela:

lc (km)	\dot{Z}_{vista}
distância da fonte ao ponto de curto	
100	0,484 + j 30,41
200	0,9937 + j 64,21
300	1,5589 + j 94,52

400	2,2193 + j 130,20
500	3,0333 + j 170,09
600	4,0952 + j 216,24
700	5,5695 + j 271,80
800	7,7702 + j 341,98
900	11,3645 + j 436,22
1000	17,9916 + j 573,67
1100	32,6429 + j 800,39
1200	77,1794 + j 1262,21
1300	368,9614 + j 2785,67
1370	9263,90 + j 10689,22
1380	20488,71 + j 4781,82
1390	14672,44 - j 10086,36



Baseado nesta tabela, levantou-se o diagrama RX da figura 9. Neste diagrama a reta representa a linha levando-se em consideração apenas o ramo série e com parâmetros concentrados. Os pontos de 1 a 8 são os vértices dos vetores representativos das impedâncias vistas pelo relé ao se curto-circuitar a linha em pontos que vão de 100 a 800 Km do transmissor, de 100 em 100 Km.

Também neste diagrama foi indicado 4 ajustes para um relé de distância, tipo admitância. Estes são baseados nas impedâncias da linha linearizada ($r + jx$).

Analisando este diagrama concluiremos o seguinte:

- 1 - O erro devido a defasagem só é apreciável a partir de 600 Km tornando-se muito grande a partir de 800 Km.
- 2 - O erro de módulo é bastante grande podendo-se observar os seguintes valores:
 - para um ajuste de 800 Km tem-se uma proteção de ± 650 Km reais, ou seja, 18,8% de erro em relação ao ajuste.
 - para um ajuste de 600 Km tem-se uma proteção de ± 530 Km reais, ou seja, 11,7% de erro em relação ao ajuste.
 - para um ajuste de 400 Km tem-se uma proteção de ± 370 Km reais, ou seja, 7,5% de erro em relação ao ajuste.

É importante observar que os erros reais são bem menores que os calculados desprezando as perdas, vejamos:

$$P/ 600 \text{ Km } (60) \text{ Hz}$$

$$\theta = 0,754$$

$$e\% = \frac{\text{tg}\theta - 1}{\theta} = 24,5\% \text{ (ideal)}$$

$$e\% = 11,7\% \text{ (real)}$$

- 3 - Para linhas até 300 Km o erro é desprezível podendo avançar este limite, com certa audácia, até 400 Km.

IV - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Concluimos, finalmente, o perigo que a representação costumeira das linhas representa para os ajustes dos relés de distâncias para zonas de proteção acima de 400 Km.

A recomendação é óbvia, ou seja, usar a representação "exata" nos diagramas RX para linhas acima de 400 Km em E H V.

Não devemos esquecer que a proteção a distância já suporta erros razoáveis devido a incerteza da impedância de arco, logo, se os erros se somarem perderemos totalmente a seletividade.

OBSERVAÇÃO:

Este trabalho foi apresentado à cadeira "Proteção dos Sistemas Elétricos" da pós-graduação da E.F.E.I. em dezembro de 1979, como requisito final de aprovação, sendo os docentes os professores Marcio Curi e Ronaldo Rossi.

BIBLIOGRAFIA

- 1) R.D. Fuchs - Transmissão de Energia Elétrica - vol. 1 e 2
- 2) G. Fielding, W.J. Cheetham, H.L. Thauwala, W.P. Willians. The performance of a distance protection relay applied to a long distance E H V line with static shunt compensation. Cigré /78.
- 3) M. Souillard - Protection of E H V long distance transmission lines. Distance measurement and directional functions. Special case of series condenser compensated lines. Cigré/78.
- 4) Afonso H.M. Santos. Trabalho apresentado à cadeira "Transmissão de Energia" - Pós-graduação - EFEI - 1º período/79.

CURRICULUM VITAE

Afonso Henriques Moreira Santos - Engenheiro eletricitista - EFEI - 1978 - Pós-graduação - EFEI - 1979 - professor e colaborador do Departamento de Mecânica da Escola Federal de Engenharia de Itajubá nas áreas de instrumentação e automação.