GRUPO DE ESTUDOS DE TRANSMISSÃO

SELEÇÃO DO NÚMERO DE CABOS-GUARDA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE 88 k CIRCUITO DUPLO

Engº Ithamar Penque
Prof.Kazuhiro Ishimori
Centrais Elétricas de São Paulo S/A

1.0 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

1.1 Proteção Elétrica

Sob este aspecto, não temos dúvida quanto a maior proteção proporcionada por dois cabos-guarda, instalados sôbre cada círcuito, considerando a disposição em plano vertical.

1.2 Razões Econômicas

O estudo para a determinação do número de cabos-guarda é motivado, então, por razões econômicas, pois além do custo de material e de mão-de-obra, òbviamente menores, os esforços transmitidos à estrutura por um cabo-guarda são também menores, o que permite uma redução no custo da estrutura.

1.3 Linha de Referência

Os nossos estudos foram feitos para a Linha de Transmissão de 88 kv BERTIOGA/SÃO SEBASTIÃO, que, por se tratar de região litorânea, exige o emprego de materiais com elevada resistencia/ à corrosão. Nela, o cabo de aço galvanizado será substituído pelo cabo "Alumoweld", como cabo-guarda.
Êste cabo, importado, é composto por fios de aço recobertos / por uma camada espessa de alumínio. O custo do cabo " - Allumoweld" é cerca de 60% superior ao do cabo de aço gal -

vanizado. Considerando que a linha tem uma extensão prevista de 100 km, razões de ordem econômica levaram-nos a elaborar o presente estudo, que tomou como referência as duas silhuetas mostradas na ilustração 1.3-1.

Antes de elaborarmos as tabelas de tensões, devidas a quedas de raios, vamos apresentar um sumário sobre o assunto.

2.0 SUMÁRIO - (1) até (6)

2.1 Tensão devida à queda de raio

Registros revelam que a tensão, devida à queda de raio numa linha, é entre 15 e 21 vezes a tensão entre fase/neutro, contra 5,5 devida a surtos internos de manobras.

2.2 Correntes de Raio

Correntes medidas em torres registraram valores até ... 130.000 ampères. A média em 2.700 descargas foi de 10.000 A, dos quais 82% se referem a descargas negativas. O máximo valor estimado para a corrente de raio é de 200.000 A.

Registros de correntes de raios, feitos durante anos em diversas linhas dos E.U.A., permitiram estabelecer a seguinte estatística:

50% de descargas com correntes até 10.000 A.
40% de descargas com correntes entre 10 kA e 40 kA.
9% de descargas com correntes entre 40 kA e 100 kA.
1% de descargas com correntes acima de 100 kA.

2.3 Tensão Induzida

Quando uma descarga atmosférica atinge a linha, ou as proximidades dela, produz uma onda de tensão induzida que percorre os condutores em ambos os sentidos. Essas ondas são atenuadas ao longo da linha. Uma onda de 2.000 kV, por exemplo, precisa de 5 km para ser reduzida à metade.

2.4 Descargas Diretas

As experiências comprovam também que as descargas diretas sobre as linhas são mais frequentes nas torres do que no meio do vão.

Quando uma torre é atingida, ela descarrega a energia através da terra. Existindo cabos-guarda, eles servem de condutos paralelos, permitindo que parte da energia seja descarregada pela torres adjacentes. De um modo prático, admite-se que a tensão de descarga seja o produto da corrente do raio (I_r) pela resistência de aterramento da estrutura: $V_R = R \cdot I_r$.

2.5 Ondas de Sobretensões

As ondas de sobretensões devidas a quedas de raios têm diversas formas e magnitudes. Em laboratórios já se conseguiu reproduzir ondas de tensões similares às reais. Para fins de estudos e experiências, vem sendo adotada uma onda padrão de 1,5 x 40 µs, isto é, 1,5 µs para atingir o valor de crista e 40 µs do valor de crista até o final da cauda.

2.6 Tensões de "flashover" em cadeias de isoladores

Nas linhas protegidas por cabos-guarda os "flashover" nas cadeias de isoladores são reduzidos ao mínimo, porque eles evitam que os condutores sejam atingidos diretamente e proporcionam múltiplos caminhos para a corrente de raio.

Experiências em Linhas de Transmissão, nos Estados Unidos, adotando-se a onda de 1,5 x 40 us, permitiram determinar as tensões de "flashover" para as cadeias de isoladores de 10" de diâmetro: (Ver quadro na folha seguinte - Tabela I)

TABELA I

NÚMERO DE ISOLADORES	ONDA POSITIVA	ONDA NEGATIVA
04	440 kV	415 kV
05	525	495
06	610	585
07	695	670
08	780	760
09	860	845
10	945	930
11	1.025	1.015
12	1.105	1.105
13	1.185	1.190
14	1.265	1.275
15	1.345	1.360
16	1.425	1.445
17	1.505	1.530
18	1.585	1.615
19	1.665	1.700
20	1.745	1.785

Admitindo-se que as sobretensões de surtos de manobras sejam, no máximo, igual a 5,5 vezes o valor eficaz da tensão entre fase e neutro, teremos para a tensão nominal de 88 kV um valor correspondente de 280 kV para o nível básico de isolação. Neste caso, seriam suficientes 4 isoladores nas cadeias da linha em estudo.

Vamos, agora, verificar quais os valores das sobretensões devidas às quedas de raio e quais as influências da utilização de um ou de dois cabos-guarda:

3.0 FÓRMULAS - (7)

3.1 Tensão devida ao raio

Admite-se que a tensão devida à queda de raio seja igual ao produto da corrente do raio por uma resistência ficti cia R_f: $V_R = R_f \cdot I_r$, em que:

$$R_f = \frac{1}{\frac{1}{Z_f} + \frac{2}{Z_n} + \frac{1}{R}}, \text{ para descargas na torre e}$$

$$R_f = \frac{1}{\frac{1}{Z_f} + \frac{2}{Z_n} + \frac{2}{R}}, \text{ para descargas no meio do vão.}$$

Z_f = Impedância de onda do cabo.

Z_n = Impedância de onda do conjunto dos cabos-guarda.

R = Resistência de aterramento da estrutura.

$Z_f \cong 400$ ohm = valor prático.

$$Z_n = \frac{Zcg + (n-1)\ Zcgg'}{n}, \text{ para n cabos-guarda.}$$

Zcg = Impedância de onda de 1 cabo-guarda.

Zcgg' = Valor médio da impedância mútua de onda entre dois cabos-guarda, tomados dois a dois.

$$Zcg = 138{,}2 \log \frac{4\ Hg}{dcg}$$

$$Zcgg' = 138{,}2 \log \frac{\sqrt{(2\ Hg)^2 + Dgg'^2}}{Dgg'}$$

Hg = altura dos cabos-guarda sobre o plano P de potencial nulo. Este plano coincide com a linha do solo quando R = 0. A profundidade P cresce com o valor de R, os cilando entre 5 e 30 m, para valores de R e 100 ohm.

dcg = diâmetro do cabo-guarda, considerando a ionização do

ar devida ao Efeito Corona e varia entre 3 e 5 cm.

Dgg' = distância entre dois cabos-guarda.

3.2 Tensão induzida nos cabos condutores

Admite-se que a onda de sobretensão, devida à queda de raio sobre a linha, induz nos cabos condutores uma onda de sobretensão, de sentido contrário à onda que a produziu.

O valor dessa tensão é dado por:

$V_i = C_n \cdot V_R$.

C_n = fator de acoplamento = $\frac{Z\ cgc}{Z_n}$

$Zcgc = \frac{1}{n}\ 138{,}2 \log \frac{b1 \cdot b2 \cdot b3 \ldots bn}{a1 \cdot a2 \cdot a3 \ldots an}$, para n cabos-guarda.

b1 = distância entre o condutor superior de um circuito e a imagem do cabo-guarda mais próximo em relação ao plano de potencial nulo.

b2 = idem, em relação à imagem do outro cabo-guarda.

a1 = distância entre o cabo condutor superior e o cabo guarda mais próximo.

a2 = idem, em relação ao outro cabo-guarda.

3.3 Tensão Resultante

Como a tensão induzida (Vi) reduz o valor da tensão do raio (V_R), teremos que a tensão resultante (e_r), que vai atuar sobre a cadeia de isoladores, será, consequentemente:

$e_r = V_R - V_i = (1 - C_n) \cdot R_f \cdot I_r + e_s$

e_s = valor eficaz da tensão nominal fase/neutro.

3.4 Tensão no meio do vão

No caso de a descarga atingir o cabo-guarda no meio do vão,

admite-se que a tensão entre o cabo-guarda e o cabo condutor superior de cada circuito seja dada por:

$$Egc = 154\ f'\ I_R + e_s$$

f' = fator de distância = varia de 0,3 até 1, para vãos de 100 m até 300 m ou maiores.

3.5 Distância entre o cabo-guarda e o cabo condutor

Tomando-se o valor de Egc, calculado conforme o item anterior, poderemos determinar a distância mínima entre o cabo-guarda e o cabo condutor superior do circuito mais próximo, pela fórmula:

$$Dgc = \frac{Egc}{G}\ ,$$ em que

G = gradiente de potencial disruptivo do ar = 21,1 kV/cm (valor eficaz).

3.6 Variáveis

Analisando as diversas fórmulas apresentadas, vemos que no estudo da nossa linha temos as seguintes variáveis:

I - Número de cabos-guarda.
II - Plano de potencial nulo.
III - Resistência de aterramento da estrutura.
IV - Corrente do raio.
V - Quedas de raios na torre ou no meio do vão.

Calcularemos, então, os valores da tensão resultante e_r para dois cabos-guarda e, depois, para um cabo-guarda, variando:

P = 10 m, 15 m, 20 m.

R = 10 ohm, 15 ohm, 20 ohm.

OBSERVAÇÃO: Alguns autores recomendam que em linhas de 88 kV, o valor de R seja limitado a 7 ohm. Devido à diversidade de solos, algumas Empresas limi

tam o valor de R a 10 ohm, outras admitem até 20 ohm.

I_r = 40 kA, 60 kA, 80 kA e 100 kA

OBSERVAÇÃO: Vimos no item 2.2 que as estatísticas apontam que em apenas 10% dos raios temos correntes acima de 40 kA. Para efeito de estudo, todavia, costuma-se tomar valores entre 60 kA e 100 kA, a despeito de os sistemas de proteção nas subestações religarem o circuito cada vez mais rápidos.

4.0 TENSÕES RESULTANTES CALCULADAS

4.1 Linhas com 2 cabos-guarda

R	I_r	er (kV) Descarga na torre			er (kV) Descarga no meio do vão		
		p=10 m	p=15 m	p=20 m	p=10 m	p=15 m	p=20 m
10	40	257	253	247	168	166	163
	60	349	343	335	216	213	208
	80	442	433	422	264	260	254
	100	534	524	510	312	307	299
15	40	339	333	325	213	210	206
	60	472	463	451	284	279	273
	80	605	594	578	355	349	340
	100	739	725	704	426	418	406
20	40	414	407	397	257	253	247
	60	586	575	560	349	343	335
	80	757	743	723	442	433	422
	100	928	911	885	534	524	510

4.2 Linhas com 1 cabo-guarda

R ohm	I_r kA	er (kV) Descarga na torre			er (kV) Descarga no meio do vão		
		p=10 m	p=15 m	p=20 m	p=10 m	p=15 m	p=20 m
10	40	333	328	324	207	204	202
	60	464	456	450	274	270	267
	80	594	584	576	341	336	332
	100	725	712	702	409	402	397
15	40	452	444	438	271	267	264
	60	641	630	621	370	364	360
	80	831	817	805	469	462	456
	100	1021	1003	988	569	560	552
20	40	563	554	547	333	328	324
	60	809	795	784	464	456	450
	80	1055	1036	1021	594	584	576
	100	1300	1277	1259	725	712	702

4.3 Cálculo de Dgc (m)

Para I_r = 40 kA Egc = 6.232 kV Dgc = 2,95 m

Para I_r = 60 kA Egc = 9.312 kV Dgc = 4,41 m

Para I_r = 80 kA Egc = 12.320 kV Dgc = 5,84 m

Para I_r =100 kA Egc = 15.400 kV Dgc = 7,30 m

5.0 ANÁLISE DOS VALORES ENCONTRADOS

5.1 Plano de potencial nulo

Vemos que, em ambos os casos, a profundidade do plano de potencial núlo influi muito pouco no valor da tensão resultante.

5.2 Resistência de aterramento

Por outro lado, o valor da resistência de aterramento das estruturas deverá ser mantido o mais baixo possível, limitando-se para todos os casos a 10 ohm.

5.3 Número de Isoladores

1ª Hipótese:

Tomando como referência a Tabela I, do item 2.6, e os valores de er correspondentes a I_r = 80 kA, valor adotado para estudo, er = 10 ohm, teremos que utilizar cadeias com:

a - 4 isoladores para linhas com 2 cabos-guarda: tensão de "flashover" = 440 kV ≅ er = 442 kV.

b - 6 isoladores para linhas com 1 cabo-guarda : tensão de "flashover" = 610 kV > er = 594 kV.

2ª Hipótese:

Considerando que em 90% dos casos I_r - 40 kA, poderemos adotar:

a - 4 isoladores para linhas com 2 cabos-guarda, porque er = 257 kV < 280 kV - tensão de surto interno esi = 5,5 x es = 280 kV.

b - 4 isoladores para linhas com 1 cabo-guarda, er = 333 kV < 440 kV = tensão de "flashover".

6.0 CONCLUSÕES

6.1 Número de cabos-guarda

Para o caso particular da linha em estudo, podemos adotar um tipo de torre para 2 circuitos verticais com um cabo-guarda central, por razão de economia.

6.2 Vantagens econômicas

a - Projeto da estrutura: A redução do número de cabos-guarda permitirá uma pequena redução dos esforços que

agirão sobre a torre.

b - Fundação: Como consequência da pequena diminuição dos esforços sobre a torre, o projeto da fundação também será beneficiado.

c - Ferragens: Logicamente o custo será reduzido à metade, embora no custo global da linha represente muito pouco.

d - Custo do cabo: Aqui, sim, teremos uma boa economia: - cerca de 23 t, que representam um investimento de aproximadamente Cr$ 140.000,00.

e - Custo do lançamento: A economia correspondente será de cerca de Cr$ 60.000,00.

Assim, teremos uma economia total de mais de Cr$ 200.000,00, com a redução do número de cabo-guarda desta linha, ou seja, de aproximadamente Cr$ 2.000,00/km de linha.

6.3 Desvantagens Técnicas

É óbvio que a instalação de dois cabos-guarda, de modo que cada circuito seja coberto por um cabo-guarda, representará uma proteção mais segura contra descargas diretas sobre as linhas.

Como vimos, as tensões resultantes no caso de um cabo-guarda são maiores do que as de dois cabos-guarda, quando da queda de raios.

A região onde será constituída a nossa linha tem um índice isocerâunico de 30 dias de trovoadas por ano.

Se admitirmos que a linha seja atingida por 30 descargas - atmosféricas diretas neste período, teremos que em 3 delas (10%) as correntes serão maiores do que 40 kA. Isto equivale dizer que a linha estará sujeita a 3 desligamentos - por ano, devidos a "flashover". Como as nossas subestações são providas de disjuntores com dispositivos de religação cada vez mais rápidos, o número de desligamentos previstos não terá maiores consequências técnico-econômicas.

6.4 Cuidados a tomar

a - Resistência de aterramento: Já vimos que o seu valor é muito importante na determinação da tensão devida à queda de raio.

No caso da nossa linha deverá ser limitada a 10 ohms.

b - Número de isoladores: Sugerimos a adoção dos seguintes números de isoladores por cadeia:

I - Torres com resistência de aterramento até 10 ohms: 4 isoladores de 10".

II - Torres com resistência de aterramento até 15 ohms: 5 isoladores de 10".

III - Torres com resistência de aterramento até 20 ohms: 6 isoladores de 10".

São Paulo - Fevereiro de 1972.

BIBLIOGRAFIA

(1) - Westinghouse Electrica Corporation: "Transmission and Distribution Reference Book".

(2) - GAUDENCIO ZOPPETTI JÚDEZ: "Redes Electricas de Alta y Baja Tension" - Livro.

(3) - W. W. LEWIS - "The Protection of Transmission Systems Against Lightning" - Livro.

(4) - F. W. FARR: "A Guide to Transmission Structure Design Loadings" - Livro.

(5) - C. L. FORTESCUE E.R.N. CONWELL: "Lighting Discharges - and Line Protective Measures". AIEE Transactions, Vol. 50, setembro/1931 - pags. 1.090/1.100.

(6) - F. W. PEEK Jr.: "Lightning Characteristics of Lightning, Induced Voltages, Direct Strokes, Coordination, - Transmission Line Design". AIEE Transactions, Vol. ... 45/1926 - pags. 1.131/1.144.

(7) - EFEI: ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ: "Apostila de Cadeira de Transmissão e Distribuição de Energia.

OBRA: GTR - GRUPO DE ESTUDOS DE TRANSMISSÃO	DES. S. HERNANDEZ	ESC.
ASSUNTO: SELEÇÃO DO NÚMERO DE CABOS-GUARDAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE 88 kV	VER.	Fl. de
	DES. N.º A4-3.558	

SP/GTR/07

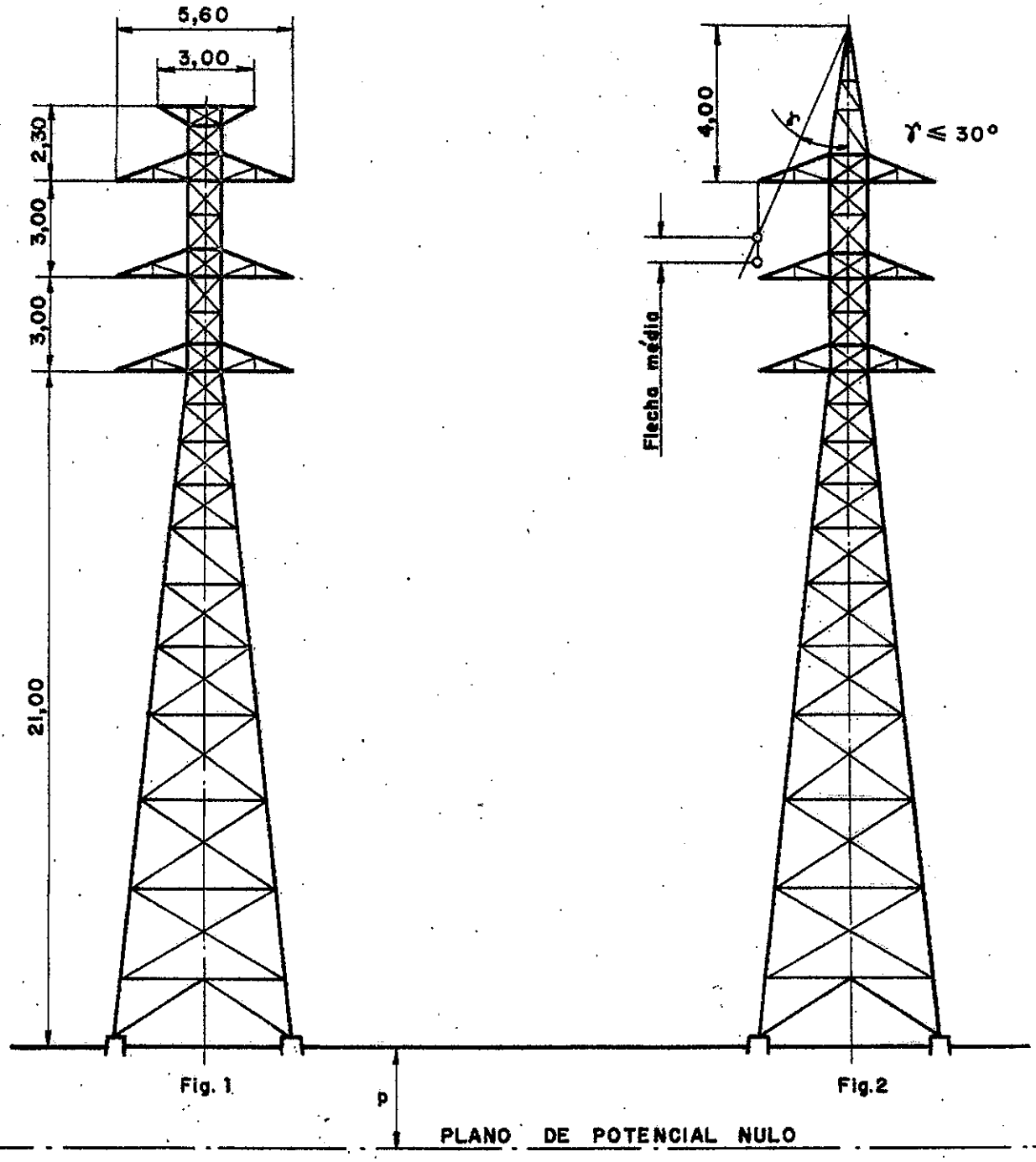

ILUSTRAÇÃO 1.3-1