SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO
E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

São Paulo, 10/15 de abril de 1972

GRUPO DE ESTUDOS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

APLICAÇÃO DE CAPACITORES SÉRIE EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Engº Darcio Ribeiro de Araujo

Engº Tisimora Takata

CENTRAIS ELÉTRICAS DE SÃO PAULO S.A. - CESP

APLICAÇÃO DE CAPACITORES SÉRIE EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

1.0 - INTRODUÇÃO

Estando as principais fontes de energia hidráulica da Suécia localizadas na região norte, houve necessidade de construir-se extensas linhas de transmissão (500-700 km) para abastecer as cargas, localizadas em sua maior parte na região sul do país.

A necessidade de se incrementar, de uma forma econômica, a transferência de grandes blocos de potência, provocou o estudo de equipamentos que pudessem possibilitar o aumento desta transferência por meio das linhas de transmissão existentes. Desta forma procurou-se evitar, ou postergar a construção de novas e onerosas linhas de transmissão.

Em 1950, como resultado dêstes estudos, foi instalado um banco de capacitores série numa linha de 220kV com 500 km de comprimento.

Já em 1928 nos Estados Unidos, a New York Power & Light Corporation utilizava a compensação série em linhas de 33kV, objetivando uma melhor divisão de carga.

Em 1951, a Bonneville Power Administration instalava para efeito de estabilidade, 25MVAR numa linha de 242kV.

O sucesso obtido produziu rápido progresso nêste campo, multiplicando-se em pouco tempo o número de linhas em operação com compensação série.

2.0 - OBJETIVO

Sendo o Brasil um país com enorme potencial hidráulico e também com seus principais centros consumidores bastante afastados dos centros produtores, há indiscutível interêsse em se estudar aqui as soluções encontradas por outros países com problemas análogos.

Êste trabalho tem por objetivo analisar a aplicação de ca

pacitores em linhas de transmissão, focalizando em particular os parâmetros, localização e dimensionamento.

3.0 - GENERALIDADES

3.1 - Benefícios

Dentre os vários benefícios da compensação série, apontaremos os seguintes:

a) Aumento da estabilidade

A estabilidade de um sistema está diretamente ligado à reatância indutiva entre as barras receptoras e transmissoras. Desta forma, longas linhas de transmissão não podem ser carregadas economicamente devido limitações impostas pela estabilidade.

Com a instalação de bancos de capacitores série, diminuiremos a reatância indutiva com um conseqüente aumento de potência transferível.

Essa é sem dúvida a principal vantagem da aplicação de capacitores série, pois desta forma reduz se a quantidade de linhas necessárias a se transmitir uma determinada potência, acarretando com isso apreciável economia.

b) Regulação

Os bancos de capacitores série agem intrinsecamente como reguladores automáticos de tensão, atenuando as variações de tensões provenientes das variações de cargas, sejam estas rápidas ou lentas.

Pelo diagrama simplificado da ilustração 3.1.1, vemos a ação da compensação série.

c) Distribuição de fluxos

A minimização das perdas ativas, quando vários circuitos operam em paralelo, é obtida pela distribuição de potências inversamente proporcionais

as resistências dos circuitos.

Essa adequada distribuição de fluxos de potência pode ser obtida compensando-se convenientemente os circuitos em questão.

d) Impedância de transferência

A repentina modificação de um sistema, provoca oscilações que podem ocasionar a perda de estabilidade. Assim um curto-circuito ou um desligamento, corresponde a aumentar-se rápidamente a impedância de transferência entre as barras receptoras e transmissoras.

Se por meio de algum recurso, conseguirmos contrabalançar essa modificação, teremos atenuado essas oscilações.

Suponhamos o sistema da ilustração 3.1.2. A impedância total entre as barras T e R é X.

Pela saída de um circuito qualquer, a impedância passará para 1,5 X, isto é, aumentará 50% de seu valor inicial.

Vejamos agora o sistema compensado da ilustração 3.1.3, tal que $|X| = |X_c|$.

A impedância total entre as barras T e R é X/2.

Se por ocasião da saída de um circuito qualquer entre T e I ou entre J e R, retirarmos também um banco de capacitores X_c, teremos a impedância final entre T e R ainda X/2, isto é, não houve nenhuma alteração da impedância de transferência antes ou depois do defeito.

3.2 - Proteção

Quando na ocorrência de curto-circuitos, as correntes de defeito podem ocasionar sobretensões nos capacitores além do tolerável, exigindo assim os mesmos um adequado sistema de proteção.

Uma proteção clássica é representada na ilustração 3.2.1. Neste esquema, o disjuntor está normalmente aberto e o banco de capacitores inserido no circuito. Se por ocasião de um defeito, a tensão entre os terminais do banco crescer além de um pré-determinado valor, provocará uma descarga através do gap que por sua vez acionará a bobina de fechamento do disjuntor, curto-circuitando o banco de capacitores. - Uma resistência colocada em série, evitará que uma descarga rápida danifique os capacitores permanentemente.

Sendo o principal objetivo da compensação série a manutenção da estabilidade, é de se desejar que para se obter o máximo rendimento, o banco de capacitores seja curto-circuitado sòmente durante o defeito, sendo reinserido no sistema o mais rápido possível após a extinção do mesmo.

O cálculo adequado da resistência série, fará com que o banco de capacitores seja efetivamente protegido e que o mesmo seja mantido o máximo tempo possível no sistema.

Um sistema que permite uma rápida reinserção da compensação série foi instalado pela Bonneville Power Administration em 1951 na subestação de Chehalis, na qual os "gaps" são de grafite especial. Um equipamento de ar comprimido orienta um jato de ar no "gap", por ocasião da ignição do mesmo.

Desta forma, a cada meio ciclo, a ignição é extinta e o banco de capacitores é reinserido. O sôpro de ar evita a reignição indesejável do "gap" pelo ionização do ar.

Êste sistema permite, portanto, uma rápida reinserção da compensação série (no máximo em meio ciclo), aumentando sua eficiência.

4.0 - LOCAÇÃO

Neste capítulo será analisada a otimização da locação de bancos de capacitores série apenas sob o aspecto elétrico. Não serão levados em consideração os aspectos de facilidade de manutenção, construção e operação.

No sistema da ilustração 4.0.1 os elementos existentes entre as barras T e R podem ser representados pelo seguinte modêlo matemático:

$$\begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & -jX_c \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -jb & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} A_3 & B_3 \\ C_3 & D_3 \end{vmatrix} \qquad (I)$$

Desenvolvendo-se a equação I, calculamos a impedância - equivalente do sistema (B), entre as barras T e R.

Supondo-se que não haja nenhuma compensação série ($X_c=0$), obtemos da mesma forma a impedância equivalente (Z).

A diferença (Z-B) dá-nos o <u>valor da compensação série efetiva</u> entre as barras receptora e transmissora (R-T). Fazendo-se variar a localização do banco de capacitores, variamos êsse valor.

Definindo-se a eficiência (ε) como sendo a relação entre a reatância líquida efetiva da compensação e a reatância do capacitor, teremos uma equação cujo parâmetro eficiência é função da locação do banco de capacitores.

O desenvolvimento matemático desta função está apresentado no anexo I, cujo resultado permitiu compor o gráfico da ilustração 4.0.2, que nos indica a eficiência do banco de capacitores, quando êste varia entre as barras transmissoras e receptora.

Analisando-se o gráfico da ilustração 4.0.2, verificamos uma descontinuidade da eficiência na barra intermediária (I) quando o banco se coloca à montante ou à jusante do reator shunt.

A máxima eficiência se encontra na barra intermediária, à jusante dos reatores, isto é, do lado da carga. Note-se

que isso se dá para qualquer valor de compensação.

Analisemos agora os parâmetros; tensão na barra receptora, ângulo de defasagem entre as barras receptoras e transmissora e perdas, com a variação da locação do banco de capacitores.

O princípio adotado foi o mesmo apresentado no anexo I, - sendo que devido a dificuldade de cálculo manual, já que as constantes A. B e C são complexas, foi desenvolvido um programa para a calculadora HP-9100-B. Posteriormente - tais cálculos foram programados para o computador IBM/360 44 da CESP, dando origem aos atuais programas GPTCSQ 01/ 02/03/04.

Pela análise da ilustração 4.0.3, em anexo, vemos que o menor ângulo de defasagem, isto é, a melhor locação para efeito de estabilidade, se verifica na barra intermediária, à montante do reator.

Tal fato é motivado pela maior quantidade de potência reativa que atravessa o capacitor quando êste é colocado à montante do reator. Em outras palavras, se por um lado temos o aspecto negativo do aumento de impedância de transferência, por outro lado temos um aumento de tensão na barra receptora. A variação percentual para as alternativas estão na tabela 4.0.4.

Da mesma forma, as menores perdas de potência ativa se verificam para a compensação localizada na barra intermediária à montante do reator.

O fator de potência de carga não modifica as conclusões obtidas e isso pode ser comprovado pela ilustração 4.0.5, onde foi representada a variação do ângulo de defasagem para carga reativa, indutiva e capacitiva.

Passemos a analisar agora o caso de compensação com 2 bancos de capacitores, um entre a barra transmissora e a barra intermediária e o outro entre a barra intermediária e a barra receptora.

A partir do mesmo princípio seguido no caso anterior, fo

ram levantadas curvas do defasamento angular e tensão. As curvas estão representadas na ilustração 4.0.6.

Nesta hipótese, no primeiro trecho o banco de capacitores deverá estar localizado próximo à barra intermediária, enquanto no segundo trecho (barra intermediária-barra receptora) a localização ótima se situa à uns 2/3 de distância da barra intermediária à barra receptora. Entretanto, enquanto no primeiro trecho a localização ótima traz apreciável vantagem ao sistema, notamos que no segundo trecho é pequena a variação do ganho, sugerindo-se que a escolha do local neste caso obedeça a outros critérios.

Cabe agora a pergunta: Qual a melhor distribuição de compensação, em um ou em dois trechos?

Em condições normais de funcionamento ambos se equivalem, sendo pequenas as vantagens de um sôbre outro (ilustração 4.0.7). No entanto, a concentração de tôda a compensação num só trecho, traz incovenientes sob aspecto de proteção, manutenção, confiabilidade, etc..., pelo que somos favoráveis à implantação em dois trechos.

5.0 - DIMENSIONAMENTO

Definida a locação ótima da instalação da compensação série, analisemos agora quanto deverá ser o valor desta.

Diz-se que uma linha de transmissão é X porcento compensada quando o total de sua reatância série indutiva fôr reduzida de X porcento, pela instalação de reatância capacitiva.

Dentre os vários parâmetros que entram na determinação do percentual de compensação ótimo (grau de compensação) são fundamentais, a configuração do sistema e a potência a ser transmitida, Na determinação exata de seu valor, há necessidade de se elaborar um estudo técnico-econômico - comparativo entre outras alternativas de investimento e esta.

No entanto, para se ter uma idéia aproximada dos valôres

requeridos de compensação série, admitamos que o limite de estabilidade, para uma dada configuração, se dê para um ângulo de defasagem de 30º entre as barras receptoras e transmissoras. Pela ilustração 5.0.1., vemos que necessitaríamos de um percentual de compensação que acompanhe a curva, conforme o aumento de potência transferida.

Claro está que se modificarmos a configuração em questão teremos um outro ângulo limite. De qualquer forma deveremos sempre verificar se o sistema é ou não estável para a condição limite.

O banco de capacitores série tem a vantagem de poder ser modular, isto é, pode ser gradativamente aumentado de acôrdo com a necessidade do sistema. Desta forma podemos fazer um econômico escalonamento de investimentos.

Como, evidentemente, o aumento do grau de compensação se dá de forma discreta, supondo que o mesmo aumente de 10%, teremos então os degraus indicados no gráfico em questão. Vamos transformar essa necessidades em têrmos de datas.

Suponhamos que se tenha de alimentar uma carga com crescimento de acôrdo com o gráfico 5.0.1. Teríamos então a necessidade de aumentar o grau de compensação no tempo, conforme o indicado.

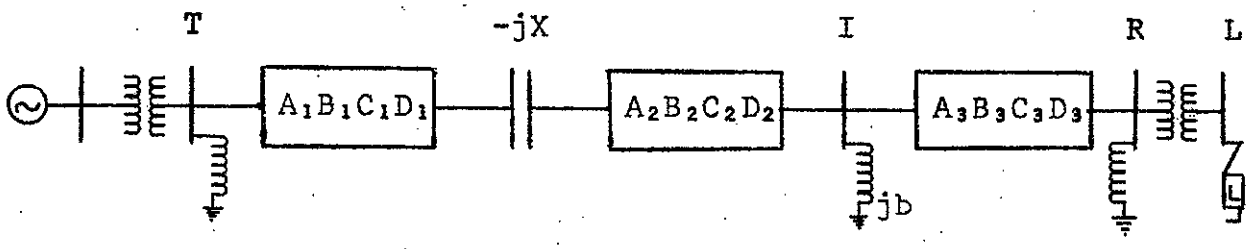
6.0 - CONCLUSÃO

Os capacitores série são atualmente vistos como elementos comuns num sistema de potência. As experiências registradas em outros países como a Suécia, Rússia, E.U.A., Japão, etc... demonstraram ser bôas, estando os mesmos operando corretamente.

A utilização de compensação série em linhas de transmissão não é hoje em dia uma pesquisa, mas sim mais um recurso para solucionar problemas inerentes à sistemas elétricos.

Vários são os meios de se aumentar a transferência de potência em grandes distâncias. A compensação série é dos meios mais eficazes e sua utilização reduz o fator MW - transmitido/CR$.

A N E X O I



Os parâmetros do sistema acima entre as barras T e R podem ser representados da seguinte forma:

$$\begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & -jX \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -jb & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} A_3 & B_3 \\ C_3 & D_3 \end{vmatrix}$$

Para elementos bilaterais passivos, sabemos que $A_n = D_n$ e a solução da equação acima para a impedância série é:

$$\dot{B} = A_1 A_2 B_3 + A_1 A_3 B_2 + A_2 A_3 B_1 + B_1 B_3 C_2 - jb \quad B_3$$

$$(A_1B_2 + A_2B_1) - jX\,(A_1A_2A_3 + A_1 B_3 C_2 - j\, A_1 A_2 A_3)$$

Não considerando-se a compensação série, temos a seguinte impedância entre as barras T e R:

$$\dot{Z} = A_1 A_2 B_3 + A_1 A_3 B_2 + A_2 A_3 B_1 + B_1 B_3 C_2$$

A compensação efetiva será então:

$$\dot{Z} - \dot{B} = jbB_3\,(A_1B_2 + A_2B_1) + jX(A_1A_2A_3 + A_1B_3C_2 - j\, A_1A_2B_3)$$

Sendo a eficiência (ε) a relação entre a reatância líquida efetiva da compensação e a reatância do capacitor série, temos:

$$\varepsilon = A_1A_2A_3 + A_1A_2B_3 + b\, B_3\,(A_1B_2 + A_2B_1) \qquad (2)$$

De acôrdo com a locação do capacitor série, teremos as seguintes equações particulares:

Em T:

$$\varepsilon = A_1 A_2 + B_2 C_1 - jbA_1 B_2 + \frac{b}{x} B_1 B_2 \qquad (3)$$

Em I a montante do reator:

$$\varepsilon = A_1 A_2 - jbA_1 B_2 + \frac{b}{x} B_1 B_2 \qquad (4)$$

Em I a jusante do reator (lado da carga):

$$\varepsilon = A_1 A_2 - jbA_2 B_1 + \frac{b}{x} B_1 B_2 \qquad (5)$$

Em R:

$$\varepsilon = A_1 A_2 + B_1 C_2 - jbA_2 B_1 + \frac{b}{x} B_1 B_2 \qquad (6)$$

Entre I e R:

$$\varepsilon = A_1 A_2 A_3 + A_3 B_1 C_2 - jbA_2 A_3 B_1 + \frac{b}{x} B_1(A_2B_3 + B_2A_3) \qquad (7)$$

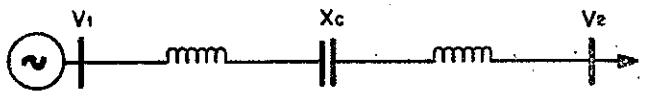
Entre T à I:

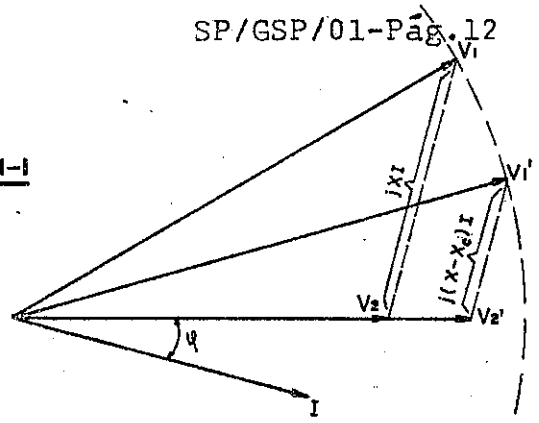
$$\varepsilon = A_1A_2A_3 + A_1A_2B_3 + \frac{b}{x} B_3 (A_1B_2 + A_2B_1)$$

Obs:- Tôdas as constantes A, B, C, são complexas, mesmo quando não especificadas.

São Paulo, fevereiro de 1972

ILUSTRAÇÃO - 3-1-1





V_1, V_2 = SISTEMA NÃO COMPENSADO.

V_1', V_2' = SISTEMA COMPENSADO.

ILUSTRAÇÃO- 3-1-2

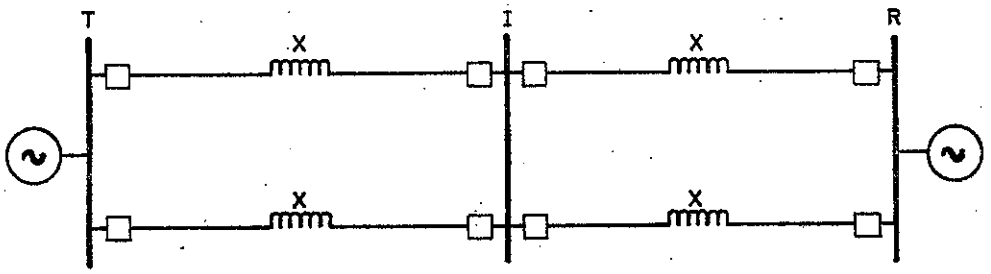
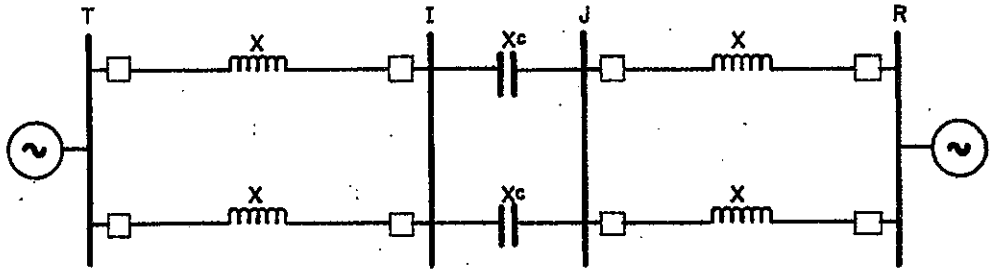


ILUSTRAÇÃO- 3-1-3



$|X| = |X_c|$

ILUSTRAÇÃO - 3-2-1

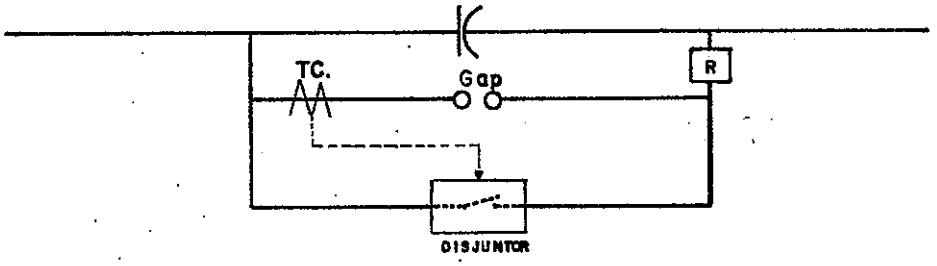


ILUSTRAÇÃO - 4 0 1

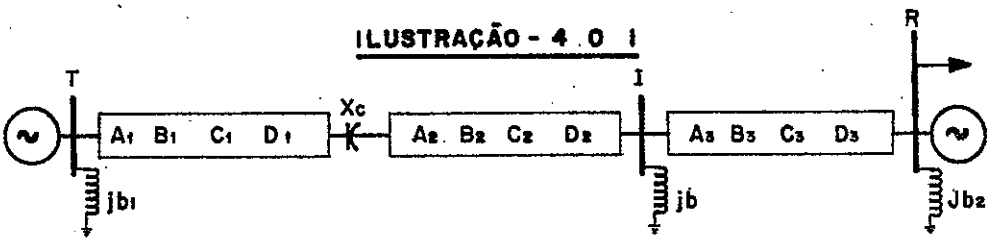


ILUSTRAÇÃO - 4-0-2

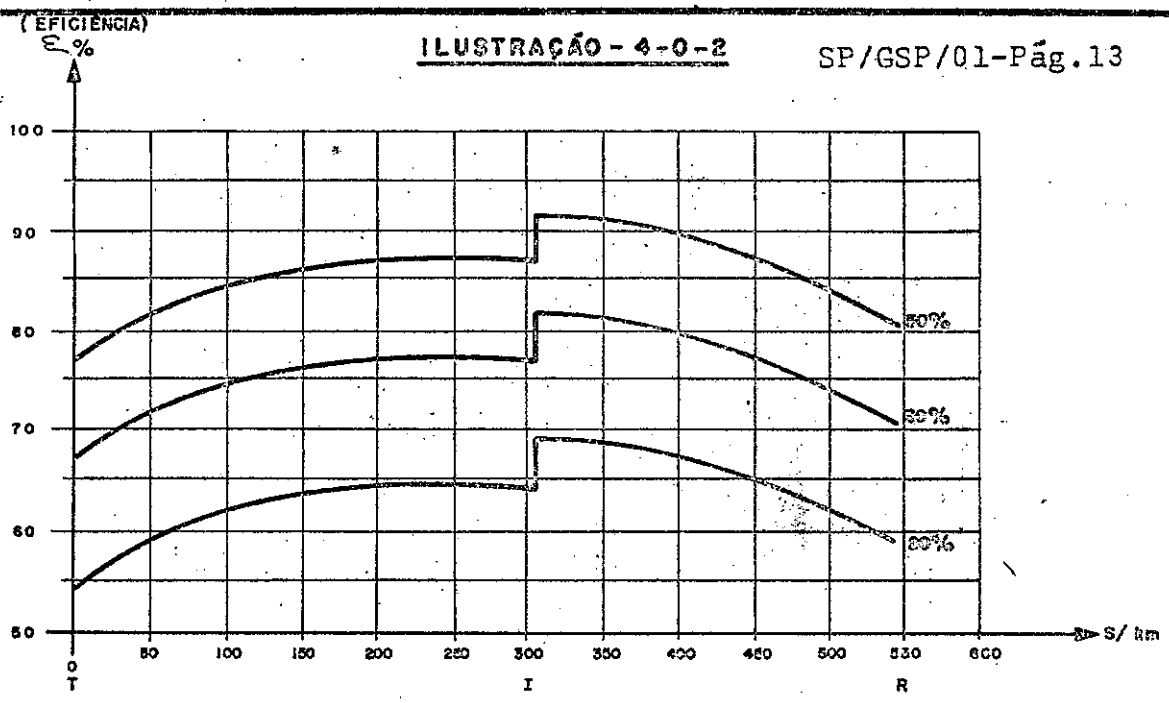


ILUSTRAÇÃO - 4 - 0 - 3

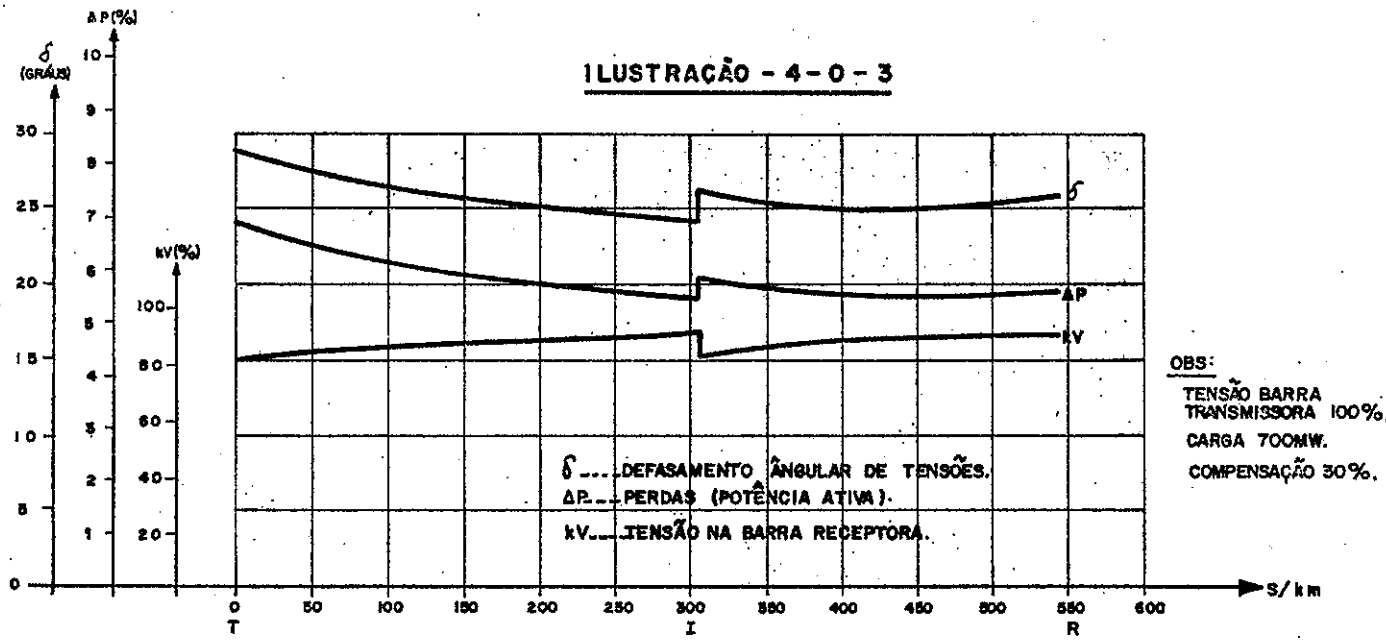


ILUSTRAÇÃO - 4 - 0 - 4

POTÊNCIA TRANSFERIDA (MW)	BANCO À MONTANTE DO REATOR	BANCO À JUZANTE DO REATOR (LADO DA CARGA)	VARIAÇÃO (%)
	IMPEDÂNCIA DE TRANSFERÊNCIA *		
	13.2 + j 106.5	13.1 + j 105.2	
	TENSÃO BARRA RECEPTORA (pu) **		1.2
200	1.051	0.992	5.9
300	1.037	0.978	6.0
400	1.020	0.961	6.1
500	1.000	0.939	6.5
600	0.973	0.912	6.7
700	0.939	0.875	7.3
800	0.892	0.821	8.7

* — COMPENSAÇÃO DE 35%.

** — TENSÃO NA BARRA TRANSMISSORA 100% (CONSTANTE).

ILUSTRAÇÃO - 4-0-5

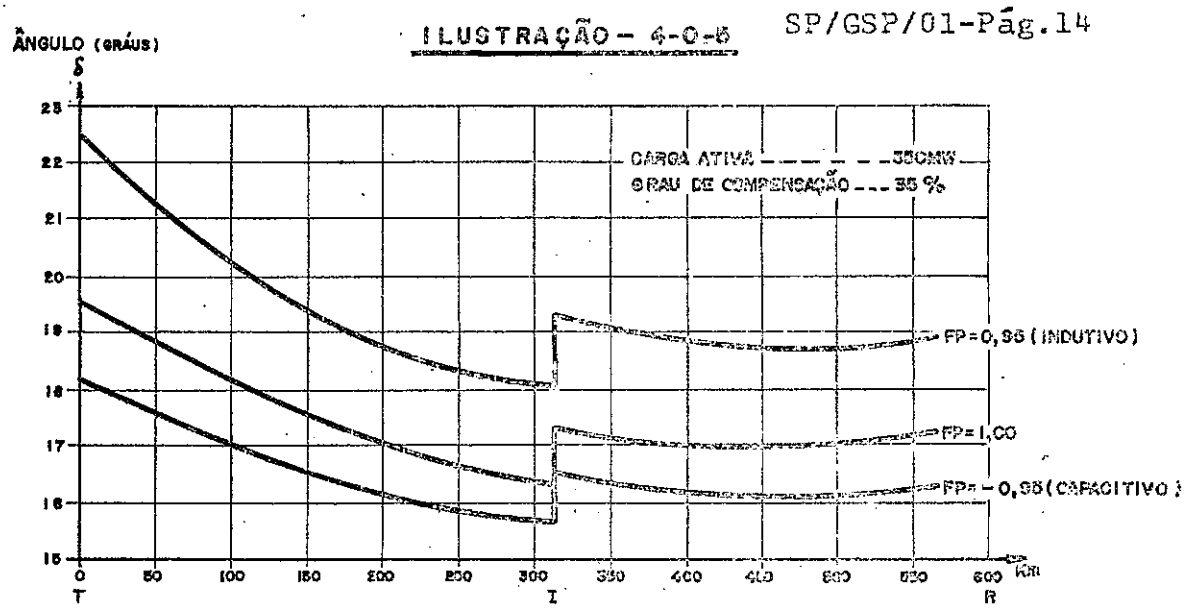


ILUSTRAÇÃO - 4-0-6

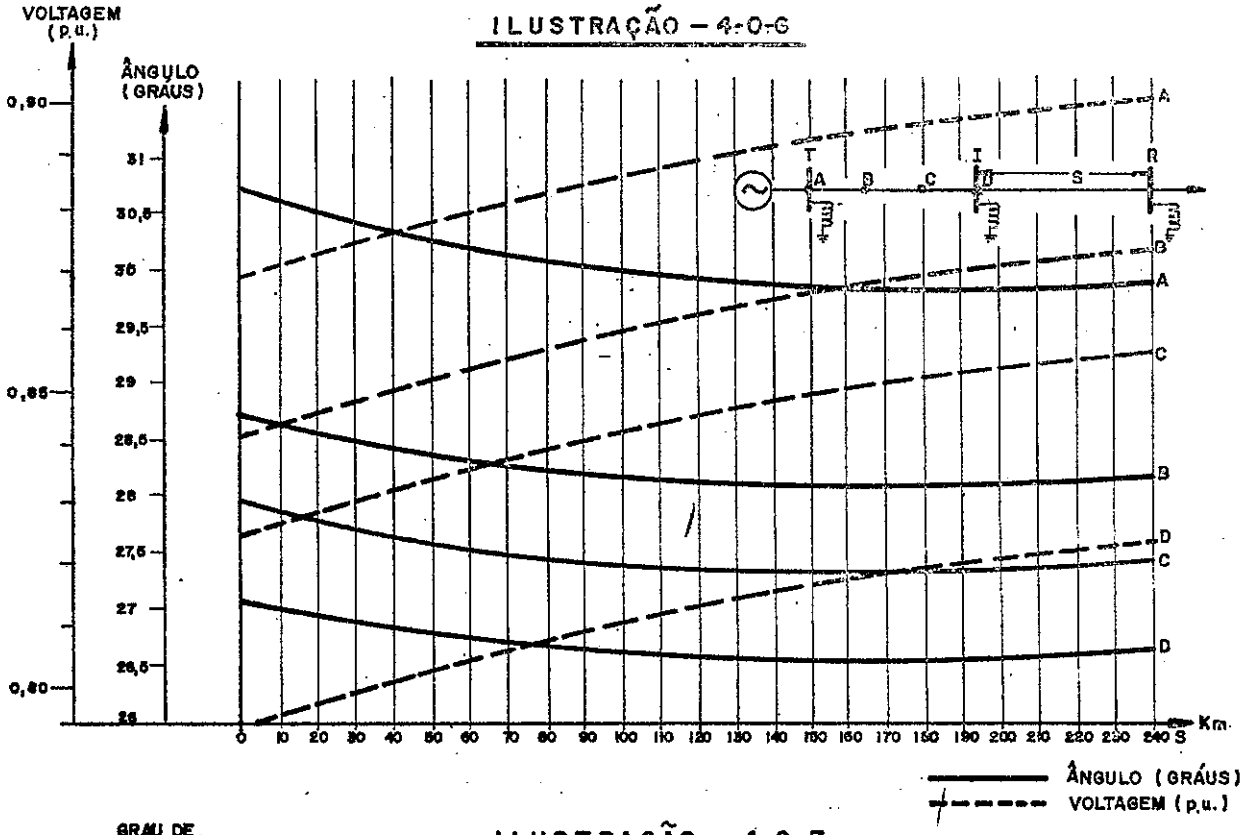


ILUSTRAÇÃO - 4-0-7

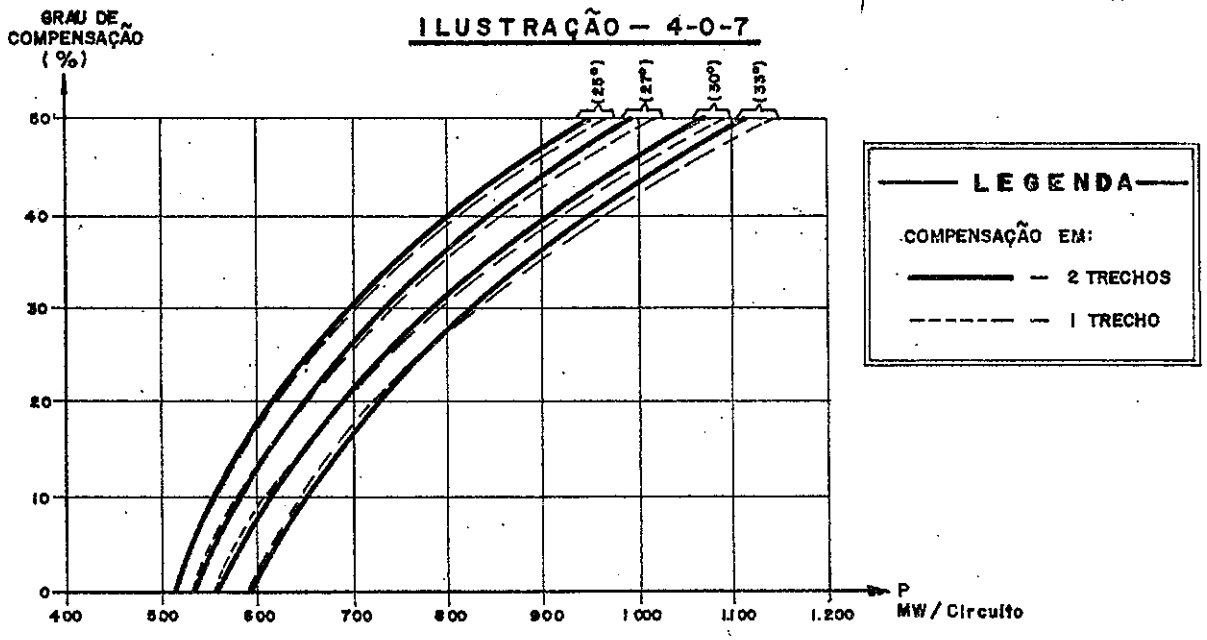
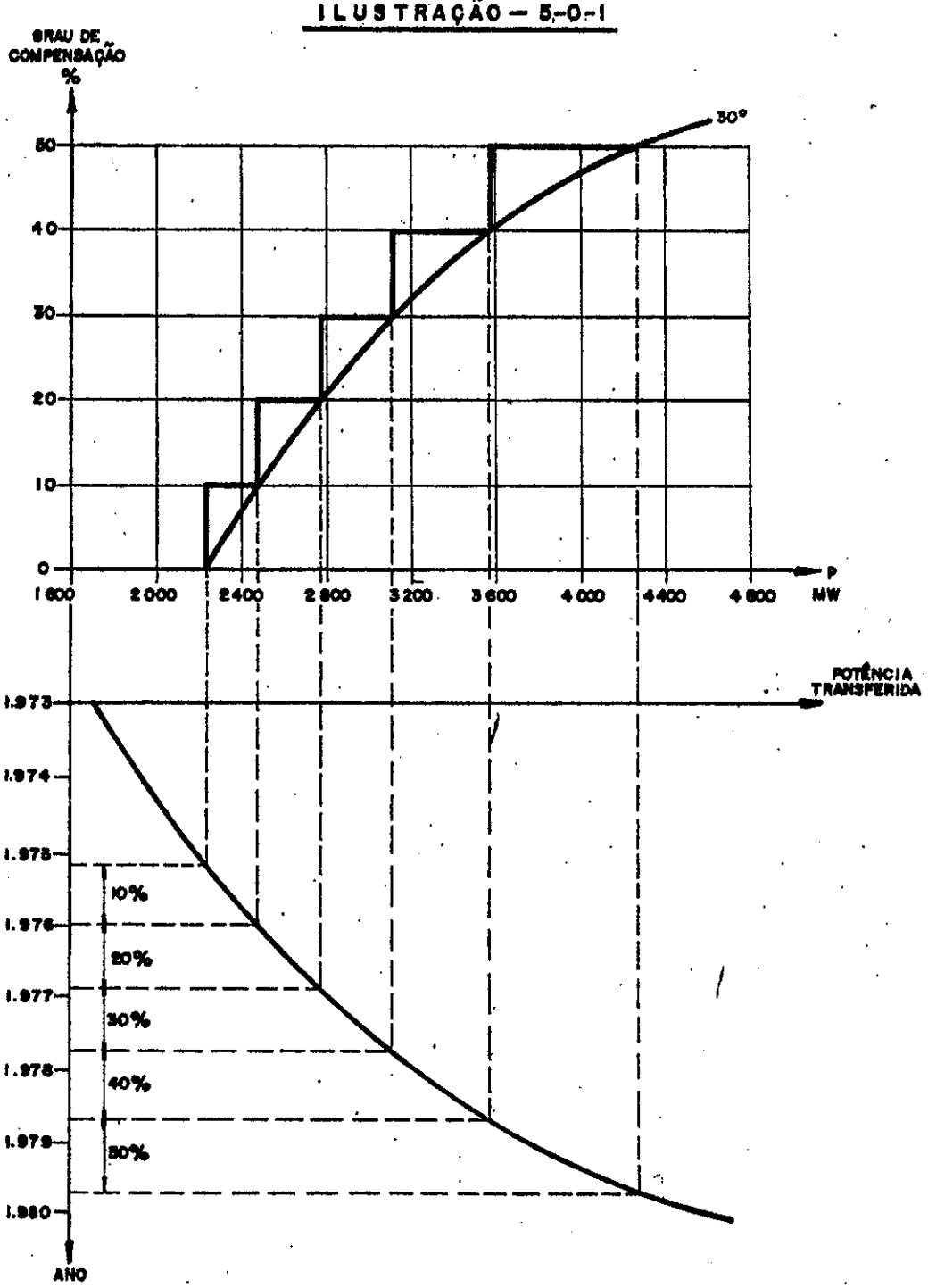



ILUSTRAÇÃO — 5-0-1