

TESE
241

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

- EFEI -

TESE DE MESTRADO

APLICAÇÃO DE CAPACITORES SÉRIE EM SISTEMAS
ELÉTRICOS DE ALTA TENSÃO



FAUZI AMIM SALMEM

Itajubá: 241

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

- EFEI -

TESE DE MESTRADO

APLICAÇÃO DE CAPACITORES SÉRIE EM SISTEMAS
ELÉTRICOS DE ALTA TENSÃO

FAUZI AMIM SALMEM

RIO DE JANEIRO, DEZEMBRO DE 1979.



Aos professores,

Márcio Antonio Curi

José Carlos de Oliveira e

Moacir Pereira Lima,

meus agradecimentos pelo exaustivo trabalho de exame do texto.

O título de Mestre em Engenharia que este trabalho me proporcionou, foi obtido em grande parte, graças à compreensão e incentivo de minha mulher Adyles Rachel. É com eterna gratidão, que a ela dedico este êxito em minha vida profissional.



Ministério da Educação e Cultura
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

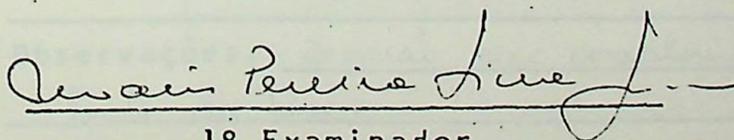
A N E X O I

PRONUNCIAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, nomeada por Portaria nº 204 de 06 / 12 / 79, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: "APLICAÇÃO DE CAPACITORES SÉRIE EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE ALTA TENSÃO"

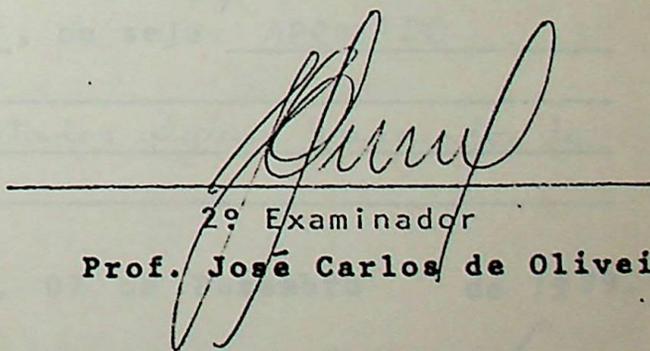
apresenta pronunciamento no sentido de que a Comissão de Pós-Graduação da Escola Federal de Engenharia de Itajubá solicite à DDD (Divisão de Divulgação e Documentação) a expedição do título de Mestre em Engenharia Elétrica na Área de Concentração de Sistemas de Potência satisfeitas as demais exigências regimentais à FAUZI AMIM SALMEM.

Itajubá, 07 de Dezembro de 1979.



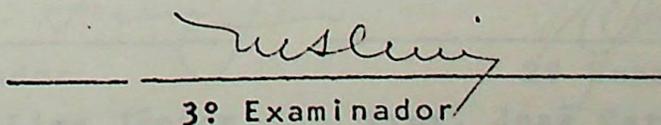
1º Examinador

Engº Moacir Pereira Lima Júnior



2º Examinador

Prof. José Carlos de Oliveira



3º Examinador

Prof. Márcio Antonio Curi (Orientador)



Ministério da Educação e Cultura
 ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

A N E X O II

FOLHA DE JULGAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

Título da Dissertação: "APLICAÇÃO DE CAPACITORES SÉRIE EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE ALTA TENSÃO"

Autor: FAUZI AMIM SALMEM

JULGAMENTO

EXAMINADORES	CONCEITO	RUBRICA
1º	A	<i>[Assinatura]</i>
2º	A	<i>[Assinatura]</i>
3º	A	<i>[Assinatura]</i>

Resultado médio: Conceito A, ou seja APROVADO

Observações: Deverão ser complementados alguns detalhes do texto da tese.

Itajubá, 07 de Dezembro de 1979.

[Assinatura]

1º Examinador

Engº Moacir Pereira Lima Júnior

[Assinatura]

2º Examinador

Prof. José Carlos de Oliveira

[Assinatura]

3º Examinador

Prof. Márcio Antonio Curi (Orientador)

Í N D I C E

Introdução	01
Objetivo	03

CAPÍTULO I

A Análise da Ressonância	04
- A Análise Física	04
- A Análise Matemática	05
- As Frequências de Ressonância	07
- Ressonância em Sistemas de Transmissão	08

CAPÍTULO II

Consequências da Presença dos Capacitores Série nas Linhas de Transmissão	10
- Estabilidade em Regime Permanente	10
- Estabilidade Transitória	11
- Regulação de Tensão e Equilíbrio da Potência Reativa	12
- Distribuição de Carga entre Linhas Operando em Paralelo e Redução das Perdas	13
- Efeitos do Capacitor no Fator de Potência	13
- Autoexcitação das Máquinas Assíncronas	15
- Oscilações Elétricas Autoexcitadas das Máquinas Síncronas	15
- Disjuntores	18
- Sobretensão de Religamento	20
- Sobretensões no Sistema Devido a Faltas e Subsequente Curto-Circuito do Capacitor	20
- Ferroressonância	24
- Energização de um Transformador	24
- Rejeição de Carga	26
- Análise da Ferroressonância com a Presença de Capacitores Série	27

CAPÍTULO III

Localização e Valor da Compensação	31
- A Localização dos Capacitores Série	31
- Escolha do Valor da Compensação	37

CAPÍTULO IV

As Sobretensões e os Sistemas de Desvio	38
- Sobretensões nos Capacitores	38
- Reinserção	44
- Sistema Usuais de Desvio dos Capacitores	46
- Descrição dos Arranjos de Desvio	50

CAPÍTULO V

A Determinação do Ajuste do Gap	55
- O Desenvolvimento da Simulação	55
- A Aplicação de Faltas	56
- A Reinserção	56
- A Execução dos Testes	57
- Sugestão de um Roteiro	60

CAPÍTULO VI

Exemplo Prático

- O Sistema Simulado, A Porcentagem da Compensação Série e A Localização dos Bancos de Capacitores	63
- Estudos Efetuados e Critérios Adotados	65
- Ajuste do Simulador	65
- Investigação do Valor das Sobretensões nos Capacitores pela Aplicação de Faltas	66
- Investigação dos Valores das Sobretensões de Reinserção	69
- As Variáveis da Simulação e os Arranjos de Desvio ...	70
- Apresentação dos Resultados	71
- Análise dos Resultados Obtidos	75
- Escolha do Ajuste do Gap	76
- Comentários Finais	78

CAPÍTULO VII

Conclusões

- Conclusões do Capítulo I	98
- Conclusões do Capítulo II	98
- Conclusões do Capítulo III	99
- Conclusões do Capítulo IV	100
- Conclusões do Capítulo V	101
- Conclusões Finais e Recomendações	102

Bibliografia	104
--------------------	-----

I N T R O D U Ç Ã O

Com o crescente consumo de energia elétrica em áreas densamente povoadas e industrializadas, localizadas remotamente dos pontos de geração, torna-se essencial o emprego otimizado das linhas de transmissão em alta tensão, a fim de que se possa transmitir grandes blocos de potência com um alto grau de confiabilidade.

O capacitor série é um dos mais eficientes e econômicos métodos de melhorar o desempenho de longas linhas de transmissão, pois reduzindo a reatância ($X_L - X_C$) acarreta:

- acréscimo da capacidade de transmissão,
- melhoria da estabilidade transitória do sistema,
- melhoria na regulação da tensão,
- melhoria na distribuição de carga e das perdas e
- melhoria no equilíbrio da potência reativa;

além disso os bancos de capacitores servem como um recurso para a conservação do meio ambiente, por evitarem em certos casos, a construção de novas linhas de transmissão, e são também flexíveis, podendo ser deslocados de um ponto a outro do sistema.

Introduzido o capacitor num Sistema de Transmissão, em diversas situações esse elemento estará sujeito a sobretensões em seus terminais.

A conexão de um gap em paralelo com o capacitor, tem por finalidade protegê-lo primariamente contra essas sobretensões, que se atingirem o valor do ajuste do gap causarão o seu disparo, desviando assim o capacitor do circuito; tão logo seja eliminada a causa das sobretensões, cessará a condução pelo gap e o capacitor será reinserido no circuito.

Como a presença do capacitor no Sistema, imediatamente após a ocorrência de um distúrbio, pode ser fundamental à sua estabilidade, torna-se imperativo que a reinserção seja rápida e que as sobretensões que ocorrem nos terminais do capacitor durante sua reinserção, não causem novamente a operação do gap.

Embora a possibilidade teórica de redução da reatância nas linhas de transmissão com a ajuda da compensação série ($X_L - X_C$), tenha sido focalizada há tempos atrás, a dificuldade em se alcançar o objetivo acima foi o principal obstáculo ao emprego dos capacitores, o que entretanto tornou-se possível nos últimos anos, com o desenvolvimento de gaps com baixo tempo de desionização e de disjuntores capazes de manobrar altas correntes capacitivas.

Como consequência da possibilidade de se obter baixo tempo de reinserção com os modernos sistemas de desvio, a utilização dos capacitores série tornou-se mais vantajosa do que outros métodos de se conseguir melhorias na capacidade de transmissão e estabilidade, tais como, transmissão em circuitos múltiplos ou em corrente contínua.

Entretanto, com a recente evolução da tecnologia de construção das estações conversoras, o custo da transmissão a longas distâncias em corrente contínua, tornou-se altamente competitivo com a transmissão em corrente alternada, não se podendo entretanto fixar regras gerais para se otimizar um sistema de transmissão, pois as vantagens e desvantagens vão depender da configuração do mesmo.

É de se esperar, que as descrições teóricas e práticas que se seguirão, principalmente no que tange à proteção primária do capacitor contra sobretensões, possam servir como subsídios para futuros estudos do emprêgo de bancos de capacitores série em sistemas de potência elétrica.

O B J E T I V O

O presente trabalho tem como objetivo, analisar os problemas a serem considerados ao se adotar compensação série em um sistema de transmissão em alta tensão, dando ênfase à escolha do ajuste do gap do capacitor.

Ao longo do texto, a exceção de proteção de linhas compensadas, estão abordadas todas as implicações do uso do capacitor até hoje visualizadas e para melhor compreensão, o trabalho foi dividido nas seguintes partes:

- CAPÍTULO I - A Análise da Ressonância.
- CAPÍTULO II - Consequências da Presença dos Capacitores Série nas Linhas de Transmissão.
- CAPÍTULO III - A Localização e a Escolha do Valor da Compensação.
- CAPÍTULO IV - As Sobretensões e os Sistemas de Desvio.
- CAPÍTULO V - A Determinação do Ajuste do Gap.
- CAPÍTULO VI - Exemplo Prático.
- CAPÍTULO VII - Conclusões.

CAPÍTULO - I



A ANÁLISE DA RESSONÂNCIA

O objetivo deste Capítulo, é o de fornecer subsídios para um melhor entendimento dos assuntos abordados nos Capítulos II e IV, e é uma interpretação física e matemática do autor deste trabalho, das referências 1, 2 e 3 bibliografadas.

I.1 - A ANÁLISE FÍSICA

É sabido que certos corpos ou combinação de corpos, oferecem uma resposta própria, de natureza oscilatória, quando submetidos a um impulso de natureza mecânica; se a fonte de energia mecânica, permanecer aplicada ao corpo, devido ao inerente amortecimento deste, sua resposta natural desaparecerá, porém ele continuará oferecendo uma reação forçada devido a imposição da fonte; logo, sua reação total, será a soma da reação transitória com a reação permanente. Se porém, a fonte de energia for do mesmo tipo que a reação natural do corpo, isto é, se a frequência de oscilação de ambas forem coincidentes, então o corpo poderá ficar sujeito a enormes esforços, que poderão causar a sua destruição; esta situação é chamada de ressonância.

Por analogia com os corpos mecânicos, os circuitos elétricos, que contenham pelo menos dois elementos armazenadores de energia, também oferecem uma resposta natural ou livre, de natureza oscilatória, quando submetidos a um impacto elétrico; da mesma forma ainda, a resposta total a uma fonte permanentemente aplicada, será a soma da resposta livre com a resposta forçada, e quando a frequência de oscilação da fonte coincidirem com a frequência de oscilação natural do circuito, este estará na condição de ressonância. Nesta situação, valores infinitos de corrente e tensão teoricamente poderiam ser obti-

dos, não fosse pela resistência R, inerente a todo sistema físico.

I.2 - A ANÁLISE MATEMÁTICA.

A medida que mais de dois elementos armazenadores de energia, estiverem presentes num sistema elétrico, a obtenção da resposta total à aplicação de uma fonte elétrica pelo método das equações diferenciais, tende a ficar excessivamente laboriosa.

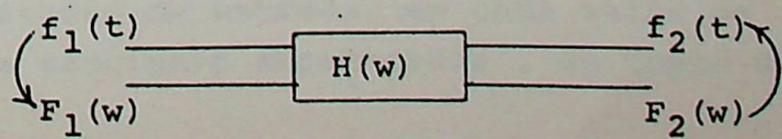
É sabido entretanto, que se a função f(t) representativa da fonte de entrada, tiver um número finito de máximos, mínimos e de descontinuidades, e além disto, se a integral

$\int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)| dt$ for finita, ela poderá ser decomposta em um número infinito de componentes senoidais (harmônicos), constituindo assim a série de Fourier. A representação da distribuição das amplitudes relativas dessas componentes senoidais, em função de suas frequências respectivas, a partir da forma complexa da série acima, poderá ser obtida pela transformada direta de Fourier F(w), e o resultado da soma do número infinito dessas amplitudes relativas, cada uma relacionada senoidalmente à sua frequência correspondente, será obtido pela transformada inversa de Fourier f(t).

$$F(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (\text{transformada direta de Fourier})$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(w) e^{j\omega t} dw \quad (\text{transformada inversa de Fourier})$$

Aplicadas à resolução de sistemas compostos por elementos lineares, as transformadas de Fourier permitem obter a resposta de um circuito f₂(t), a uma função de entrada f₁(t), através da integração do produto da função do circuito H(w), pela função representativa da distribuição dos componentes senoidais F₁(w), relacionados univocamente a cada uma delas por e^{jωt} isto é,



$$F_2(w) = F_1(w) H(w)$$

$$f_2(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F_1(w) H(w) e^{jwt} dw.$$

Entretanto como a transformada direta não é convergente para um pulso de duração infinita (degrau), o seu emprego à resolução de circuitos fica sendo genérico, apenas com a substituição na equação de $F(w)$, de jwt por $S = T + jw$ (frequência de uma onda senoidal amortecida), e do limite inferior de integração $(-\infty)$ por (0) .

A transformada de Fourier na sua forma complexa, assim obtida por Laplace, permite então a obtenção da resposta de um circuito a qualquer tipo de entrada (respeitadas as condições para a existência das transformadas de Fourier); é de se notar, que a diferença básica entre as transformadas de Fourier e de Laplace, consiste no fato de que as transformadas de Fourier, resolvem uma função em uma soma de ondas senoidais de amplitude constante, e as transformadas de Laplace, resolvem a função numa soma de ondas senoidais amortecidas.

Em decorrência do exposto, as transformadas de Laplace permitem obter a resposta $f_2(t)$ de um circuito a uma função de entrada $f_1(t)$, análogamente ao método das transformadas de Fourier, isto é,

$$f_2(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{T-j\infty}^{T+j\infty} F_1(s) H(s) e^{st} ds$$

onde:

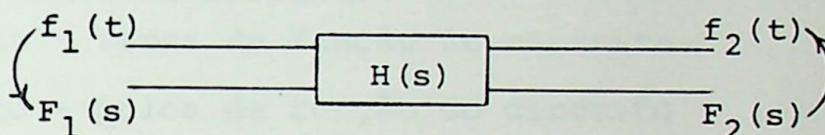
$$a) F_1(s) = \int_0^{\infty} f_1(t) e^{-st} dt$$

que é a transformada direta de Laplace, fornece a amplitude relativa e fase em qualquer frequência, dos componentes senoidais amortecidos de $f_1(t)$.

b) $H(s)$ é a função do circuito, que relaciona sua resposta à excitação de entrada, em cada valor de frequência das componentes senoidais amortecidas, da fonte de entrada $f_1(t)$.

c) T é o valor do amortecimento para o qual a série de Fourier se torna convergente, e no plano complexo de $S = T + jw$, representa a abscissa da linha paralela ao eixo de jw , ao longo da qual serão somados os componentes senoidais, sem amortecimento, da função $f_1(t)$.

Como $f_2(t)$ é a transformada inversa da função $F_2(s)$, o diagrama em bloco



onde $F_2(s) = F_1(s) H(s)$, mostra, que as transformadas de Laplace, além de proporcionarem um magnífico método para resolução de circuitos, alternativamente ao método das equações diferenciais, permitem também caracterizar o sistema no plano da frequência \underline{s} , cuja utilização será a base para o entendimento do exposto a seguir.

I.2.1 AS FREQUÊNCIAS DE RESSONÂNCIA.

Como está demonstrado na bibliografia, existe uma correspondência direta entre a função do sistema e sua descritiva equação diferencial, e dessa relação resulta, que as raízes da equação característica equivalem às raízes do denominador de $H(s)$, chamadas de polos de $H(s)$, já que a função do circuito $H(s) = F_2(s)/F_1(s)$, é o quociente de dois polinômios em \underline{s} .

Portanto são os polos de $H(s)$, que determinam a forma da resposta livre ou natural do circuito, quando este muda repentinamente o seu estado de repouso, e para que o circuito seja estável, é necessário que esses pólos se localizem na parte esquerda do plano complexo \underline{s} ou no eixo jw (no máximo um par de pólos complexos conjugado).

Como a função $H(s)$, é a relação existente entre dois polinômios em \underline{s} , o que significa ser $H(s)$ representativa do

comportamento do circuito para qualquer frequência (ω) e/ou qualquer amortecimento (T), ela poderá ser sempre escrita na forma abaixo, já que as equações polinomiais são lineares e de coeficientes constantes:

$$H(s) = \frac{F_2(s)}{F_1(s)} = \frac{A (s - s_1) (s - s_3) \text{ -----}}{(s - s_2) (s - s_4) \text{ -----}}$$

onde A - constante do circuito

s_1, s_3 etc - zeros da função do circuito

s_2, s_4 etc - pólos da função do circuito

Os zeros de $H(s)$, são frequências para as quais $H(s) = 0$, significando resposta nula do circuito à aplicação de uma fonte de energia, e os pólos são frequências para as quais $H(s)$ desaparece, ou seja, são frequências da fonte aplicada que ao coincidirem com as frequências da resposta natural do circuito, conduzem a obtenção de uma resposta infinita, caracterizando assim o estado de ressonância perfeita.

A interpretação acima, pode ser melhor visualizada, considerando a localização no plano s , dos pólos de $F_1(s)$ e de $H(s)$, da expressão $F_2(s) = F_1(s) \cdot H(s)$. Como os pólos de $F_1(s)$, determinam a forma da resposta forçada do circuito, à aplicação de sua transformada inversa de Laplace $f_1(t)$, e os pólos de $H(s)$ determinam a forma de resposta natural do circuito, a ressonância perfeita ocorrerá quando no plano da frequência complexa s , houver coincidência desses dois pólos. Pode-se concluir então, que como o amortecimento é inerente ao sistema físico real, a ressonância perfeita será obtida, apenas se o circuito for excitado com uma fonte amortecida do mesmo valor.

I.3 - RESSONÂNCIA EM SISTEMA DE TRANSMISSÃO

O conceito de ressonância como exposto anteriormente, poderá ser aplicado aos sistemas de transmissão, imaginando-se que fosse possível a linearidade de todos os seus

elementos.

Composto por elementos R, L e C, que podem fornecer uma resposta natural oscilatória amortecida, um sistema excitado subitamente por uma fonte oscilando a uma determinada frequência, e com uma amplitude constante ao longo do tempo, fornecerá uma resposta total, cuja amplitude dependerá da distância da frequência da fonte aplicada à frequência da oscilação natural do sistema, no plano de ω ; pode-se concluir então, que a amplitude da resposta será máxima quando esta distância for mínima, e nesta situação o sistema estará em ressonância, cujo tempo de duração, dependerá do amortecimento da amplitude de oscilação natural do circuito.

Uma medida de intensidade do efeito da ressonância é dada pela relação $\omega_0 E/P$, onde:

ω_0 é a frequência de ressonância,

E é a energia reativa armazenada pelo circuito

e P é a potência média dissipada; (2)

quanto maior essa relação, mais perto o sistema estará da ressonância; nesta situação a fonte fornecerá ao sistema apenas a energia ativa consumida em seus elementos resistivos, e essa será mínima, pois o sistema estará quase sem perdas, consumindo apenas o mínimo inerente a um sistema físico real.

Para se exemplificar uma situação clássica de ressonância em sistemas elétricos, basta imaginar-se uma fonte absorvendo energia reativa capacitiva de um sistema em vazio, aproximadamente na mesma proporção em que esteja fornecendo energia reativa indutiva, porém considerando a fonte no limite de sua capacidade, em termos de potência aparente; nesta situação as perdas serão mínimas, a energia reativa armazenada pelo sistema será máxima, e a medida $\omega_0 E/P$ será a maior possível, já que, na frequência de oscilação resultante, a reatância indutiva terá se igualado à reatância capacitiva do sistema.

C A P Í T U L O - I I

CONSEQUÊNCIAS DA PRESENÇA DOS CAPACITORES

SÉRIE NAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

A exposição a seguir, visa analisar os temas a serem abordadas, quando se objetiva utilizar compensação série num sistema de transmissão.

Entretanto, devido a complexidade de cada assunto abordado, a análise será feita apenas superficialmente, já que alguns deles se focalizados em detalhes, poderiam se transformar em outros trabalhos, o que nos permitimos sugerir para futuras teses de mestrado.

II.1 - ESTABILIDADE EM REGIME PERMANENTE

A presença do capacitor série, reduz a reatância da linha, aumentando a capacidade de transferência de potência ativa ou o limite de estabilidade estática, pois

$$P_1^{\text{máx}} = \frac{E_s \cdot E_r}{X} < P_2^{\text{máx}} = \frac{E_s \cdot E_r}{X - X_c}$$

onde:

E_s e E_r são as tensões nas estações transmissoras e receptoras,

X é a reatância indutiva da linha,

X_c é a reatância do capacitor,

$P_1^{\text{máx}}$ e $P_2^{\text{máx}}$ são as potências máximas transferidas sem e com capacitor, respectivamente. (4).

Quando as capacitâncias shunt e resistência da linha são consideradas, as equações da potência máxima de transferência são modificadas, porém o efeito do capacitor continua sendo idêntico.

II.2 - ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

Aumentando o limite de estabilidade em regime permanente, o capacitor série também estará aumentando o limite de estabilidade transitória.

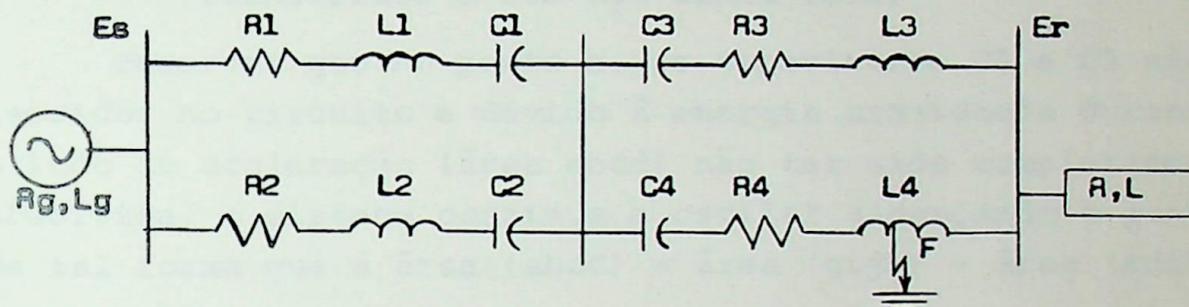


FIG. 1-A

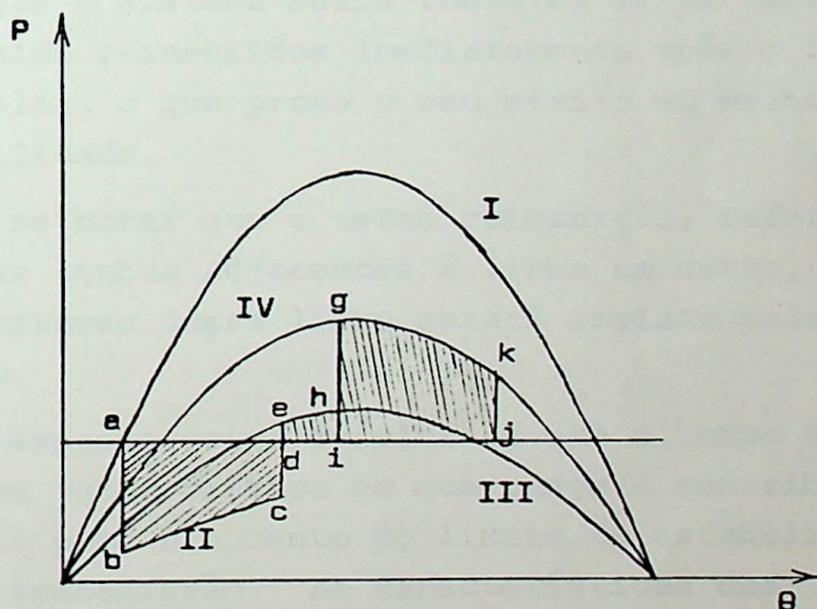


FIG. 1-B

Considere o circuito da figura 1-A onde uma falta é aplicada no ponto F.

Se o circuito for considerado sem perdas, de tal forma que as curvas potência-ângulo sejam simples curvas senoidais, os seguintes estágios ocorrerão na figura 1-B:

Curva I - Condição inicial com todas as linhas e os capacitores série em serviço.

- Curva II - Aplicação da falta e desvio dos capacitores C1, C2 e C4.
- Curva III - Condição normal porém com uma linha fora e os capacitores C1 e C2 curto-circuitados.
- Curva IV - Retorno à normalidade com os capacitores C1 e C2 reinseridos e com uma linha fora.

Observar que no ponto h, os capacitores C1 e C2 são reinseridos no circuito e devido à energia armazenada durante o período de aceleração (área abcd) não ter sido completamente absorvida, o sistema continua a oscilar alcançando o ponto k, de tal forma que a área (abcd) = área (gijk) + área (edih).

O sistema será estável para as condições mostradas e oscilará em torno do ponto 0, o qual será o novo ponto de operação; notar que o sistema seria instável se os capacitores não tivessem sido reinseridos imediatamente após o isolamento da linha em falta, o que prova o seu efeito em melhorar o limite de estabilidade.

É de se notar que o termo reinserção, refere-se aos capacitores das linhas adjacentes à linha em curto, já que o banco de capacitores dessa linha estará isolado pela eliminação do defeito.

Pelo exposto acima conclui-se que o tempo de reinserção pode ser um fator crítico no que tange a contribuição do capacitor série para o aumento do limite da estabilidade de um sistema de transmissão. As características dos sistemas de desvio que permitem a obtenção de baixos tempos de reinserção, serão posteriormente abordadas em detalhes no Capítulo IV.

II.3 - REGULAÇÃO DE TENSÃO E EQUILÍBRIO DE POTÊNCIA REATIVA

Uma capacitância conectada a um circuito, tem o efeito de gerar potência reativa. Num capacitor série, essa potência é proporcional ao quadrado da corrente da linha, assim como o é, o consumo da potência reativa da indutância. (5).

Longas linhas de transmissão em carga pesada, necessitam de geração de reativos em seus terminais, e esta geração é consideravelmente reduzida pela presença de capacitores série; em carga leve entretanto, na existência de excesso de potência reativa, caso seja possível e haja necessidade, os capacitores poderão ser curto-circuitados.

Devido à sua característica o capacitor melhora o perfil de tensão ao longo da linha de transmissão.

II.4 - DISTRIBUIÇÃO DE CARGA ENTRE LINHAS OPERANDO EM PARALELO E REDUÇÃO DAS PERDAS

A distribuição de potência entre linhas paralelas é inversamente proporcional a impedância das linhas e o valor mais baixo das perdas é conseguido quando a distribuição é inversamente proporcional às suas resistências. (5) e (6).

Assim, se a distribuição de potência for anti-econômica, os capacitores além de contribuírem para sua melhoria, reduzem as perdas nos circuitos.

Geralmente a redução nas perdas da transmissão é suficientemente grande para justificar a instalação do capacitor série; portanto, deve-se levar em conta essa redução, quando se estiver comparando o capacitor com outros métodos de elevar a capacidade de transmissão (condensadores síncronos, construção de outro circuito, etc.).

II.5 - EFEITOS DO CAPACITOR NO FATOR POTÊNCIA

Devido a presença do capacitor série, o fator de potência nas estações transmissoras e receptoras sofrem o efeito acumulativo de dois fatores:

- a) O efeito da relação r/X .
- b) o efeito da capacitância em derivação da linha.

A figura 2 é a representação de uma linha de transmissão, cujas equações são:

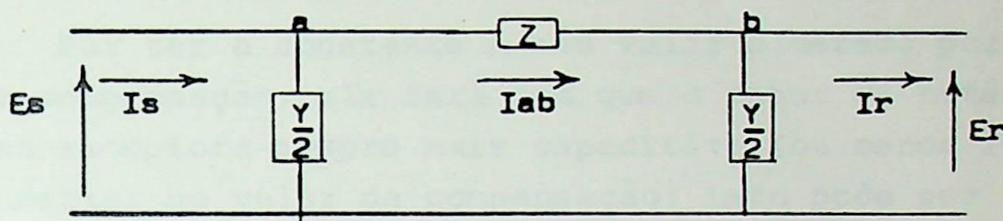


FIG. 2

$$E_s = AE_r + BI_r$$

$$A = A \left| a \right.$$

$$C = C \left| c \right.$$

$$I_s = CE_r + DI_r$$

$$B = B \left| b \right.$$

$$D = A$$

(quadripolo simétrico)

$$P_s = \frac{E_s^2}{B} A \cos(b - a) - \frac{E_s E_r}{B} \cos(\theta + b) \quad (1)$$

$$P_r = \frac{E_r^2}{B} A \cos(b - a) + \frac{E_s E_r}{B} \cos(\theta - b) \quad (2)$$

$$Q_s = \frac{E_s^2}{B} A \operatorname{sen}(b - a) - \frac{E_s E_r}{B} \operatorname{sen}(\theta + b) \quad (3)$$

$$Q_r = -\frac{E_r^2}{B} A \operatorname{sen}(b - a) - \frac{E_s E_r}{B} \operatorname{sen}(\theta - b) \quad (4)$$

$$\phi_s = \operatorname{arctg} \frac{Q_s}{P_s}$$

$$\phi_r = \operatorname{arctg} \frac{Q_r}{P_r}$$

onde:

A, B, C e D - são as constantes da linha de transmissão.

$I_s, E_s, P_s, Q_s, \phi_s$ - são a corrente, tensão, potência ativa, potência reativa e ângulo do fator de potência, na estação transmissora.

I_r, E_r, P_r, Q_r e ϕ_r - Idem, idem, na estação receptora.

θ - ângulo de potência. (7).

Pelas equações acima é de difícil visualização a constatação dos efeitos enumerados acima sobre os fatores de potência.

Por ter a constante A seu valor alterado para variações na compensação, ela fará com que o fator de potência se torne na receptora sempre mais capacitivo (ou menos indutivo) para aumentos no valor da compensação; isto pode ser constatado também pela menor quantidade de reativos a serem gerados na receptora para manutenção da tensão, pois uma parte da potência reativa requerida pela reatância da linha já é fornecida pelo capacitor série.

Entretanto, devido a variações na relação r/X e na dependência do valor da capacidade da linha que variará com seu comprimento, não é possível afirmar-se genericamente para a estação transmissora, qual será a tendência do fator de potência.

II.6 - AUTOEXCITAÇÃO DE MÁQUINAS ASSÍNCRONAS

Um motor de indução quando alimentado por um circuito com compensação, pode se autoexcitar e funcionar simultaneamente como motor à frequência síncrona e gerador à frequência subsíncrona (consequência da ressonância entre a sua indutância e o capacitor); entretanto, é pouco provável que em circuitos de alta tensão, a presença do capacitor cause autoexcitação em máquinas assíncronas, já que este fenômeno apenas ocorreria se a carga fosse predominantemente desse tipo. (5).

II.7 - OSCILAÇÕES ELÉTRICAS AUTOEXCITADAS DAS MÁQUINAS SÍNCRONAS

Com a presença do capacitor série num circuito de transmissão, qualquer distúrbio no sistema resultará em corrente oscilante fluindo no estator do gerador síncrono à frequência ressonante subsíncrona.

O fenômeno resultante também tratado como uma forma de autoexcitação (como o foi para máquinas assíncronas no parágrafo anterior) pode ser explicado como a seguir;

Considere o circuito da figura 1-A, onde os elementos em derivação são desprezados e,

R e L - resistência e indutância equivalentes da carga.

C_e , L_e e R_e - capacitância, indutância e resistência série equivalentes das linhas de transmissão.

R_g e L_g - resistência e indutância do gerador.

Na ressonância, a parte imaginária da impedância total será zero, logo:

$$j 2 \pi f_n (L + L_e + L_g) + \frac{1}{j 2 \pi f_n C_e} = 0$$

e a frequência de ressonância natural será aproximadamente:

$$f_n = \frac{1}{2 \pi \sqrt{C_e (L + L_e + L_g)}}$$

Uma perturbação que ocorra no sistema, poderá fazer aparecer oscilações geradas a frequência de ressonância subsíncrona acima; existirá então uma troca de energia entre o sistema elétrico e o sistema mecânico da turbina-gerador, pois a combinação dessas oscilações subsíncronas (0 - 60Hz) com as características da máquina síncrona resultará num movimento oscilante do rotor do gerador em relação à velocidade síncrona ("hunt" na terminologia internacional), gerando tensões à frequência síncrona mais e menos a frequência da oscilação mecânica:

$$f_1 = 60 + f_m \text{ e } f_2 = 60 - f_m.$$

$$\text{onde } f_m = 60 - f_n$$

A componente da corrente em fase com a tensão gerada, produz um torque em fase com a oscilação do rotor, geran-

do vibrações torsionais, e se a frequência da oscilação coincidir com a frequência natural do eixo, os torques pulsantes serão amplificados, ocorrendo ressonância na máquina, com grave risco de perda do conjunto turbina-gerador.

Entretanto, as grandes e modernas máquinas síncronas são fornecidas com enrolamento amortecedores adequados e sua frequência de ressonância é bem menor do que a frequência de ressonância elétrica, fatores esses que diminuem o risco da ocorrência do fenômeno descrito.

Em caso de curto-circuito, oscilações transitórias de grande amplitude poderão existir no sistema, gerando em consequência, torques pulsantes perigosos; entretanto, dependendo do sistema, a ocorrência do rápido curto-circuito do capacitor pelo seu gap, faz com que essas oscilações subsíncronas passem a existir somente após a reinserção do capacitor, aparecendo oscilações transitórias de muito menor intensidade, do que as que seriam geradas se o capacitor permanecesse no circuito durante a falta. (8), (9) e (10).

Deve-se ressaltar, que a probabilidade de ocorrência do fenômeno nas máquinas térmicas é maior do que nas máquinas hidráulicas; isto se explica, pelo fato das turbinas das máquinas térmicas possuírem mais de um estágio de transformação de energia térmica em energia mecânica, e em consequência, existirá um número maior de frequência de oscilações naturais no rotor do conjunto turbina-gerador, do que nas máquinas hidráulicas.

O estudo do equipamento para curto-circuito do capacitor será posteriormente abordado no Capítulo IV.

II.8 - DISJUNTORES

II.8.1 - TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA

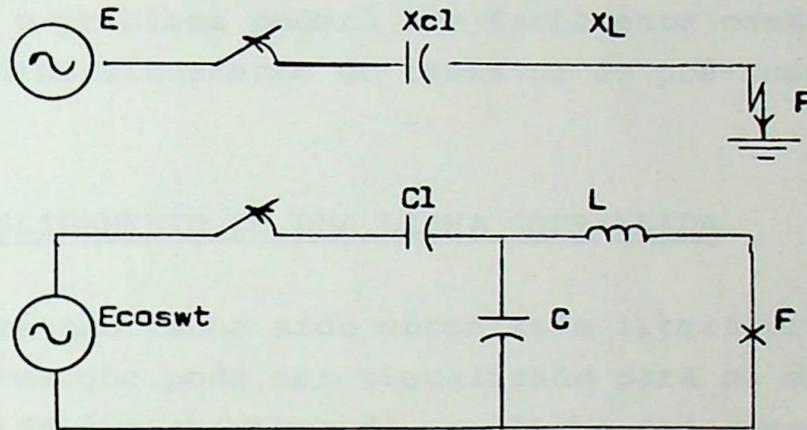


FIG. 3-A

Num circuito como da figura 3-A, o último disjuntor a abrir durante a eliminação do curto-circuito ocorrido no ponto F, sem haver o curto-circuito do capacitor, ficará submetido à tensão: (11)

$$V_t = E \left[\frac{1 - X_L/X_C}{X_L/X_C + X_L/X_{C1} - 1} \right] - E \cos \omega t - E \left[\frac{X_L/X_{C1}}{X_L/X_C + X_L/X_{C1} - 1} \right] \times \cos \frac{1}{\sqrt{LC'}} t$$

Os primeiro e último termos da equação são iguais a E_{C1} e E_L respectivamente, logo

$$V_t = E_{C1} - E \cos \omega t - E_L \cos \frac{1}{\sqrt{LC'}} t$$

A frequência natural de uma linha é normalmente muito maior do que 60Hz, e é possível que haja simultaneidade de valores de pico dos dois últimos termos no instante inicial da abertura do disjuntor, e então

$$V_t = E_{C1} + E + E_L$$

Sendo V_t (Tensão de Restabelecimento Transitória) a tensão que aparecerá nos bornes do disjuntor imediatamente após a sua abertura, pode-se então concluir que o capacitor contribui para aumentar essa TRT do disjuntor, muito embora isto somente seja relevante, quando a corrente de curto não for suficiente para causar a operação do gap do capacitor; mesmo assim, o problema poderá ser facilmente contornado, com um adequado dimensionamento do resistor de pré-inserção do disjuntor.

II.3.2 - DESLIGAMENTO DE UMA LINHA COMPENSADA

Embora não tenha sido encontrada literatura a respeito, um problema que pode ser visualizado para os disjuntores a ar comprimido é a abertura de uma linha com compensação sêrie, que por não se fazer simultaneamente poderá causar danos ao último disjuntor a abrir.

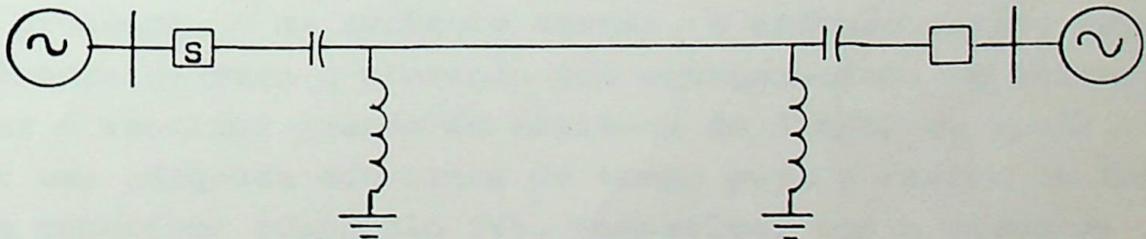


FIG. 3-B

Para melhor entendimento, considere a figura 3-B, onde para efeito de ilustração, a reatância do capacitor X_c é de 40 ohm e a do reator em derivação é de 1.950 ohm. Sendo a reatância da linha pequena em relação a do reator, podemos considerar os reatores nas extremidades em paralelo, e a frequência natural do sistema será:

$$f = 60 \sqrt{\frac{X \text{ (capacitor)}}{X \text{ (reator)}}} = 60 \sqrt{\frac{40}{975}} = 12 \text{ Hz}$$

O último disjuntor a abrir, por exemplo S, abrirá então uma corrente oscilante à frequência de aproximadamente

Sendo V_t (Tensão de Restabelecimento Transitória) a tensão que aparecerá nos bornes do disjuntor imediatamente após a sua abertura, pode-se então concluir que o capacitor contribui para aumentar essa TRT do disjuntor, muito embora isto somente seja relevante, quando a corrente de curto não for suficiente para causar a operação do gap do capacitor; mesmo assim, o problema poderá ser facilmente contornado, com um adequado dimensionamento do resistor de pré-inserção do disjuntor.

II.3.2 - DESLIGAMENTO DE UMA LINHA COMPENSADA

Embora não tenha sido encontrada literatura a respeito, um problema que pode ser visualizado para os disjuntores a ar comprimido é a abertura de uma linha com compensação série, que por não se fazer simultaneamente poderá causar danos ao último disjuntor a abrir.

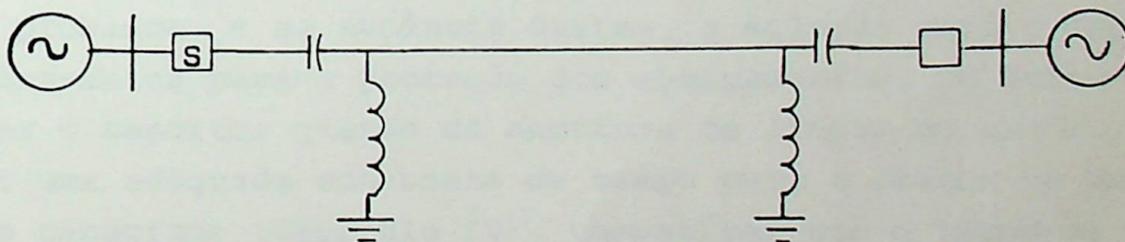


FIG. 3-B

Para melhor entendimento, considere a figura 3-B, onde para efeito de ilustração, a reatância do capacitor X_c é de 40 ohm e a do reator em derivação é de 1.950 ohm. Sendo a reatância da linha pequena em relação a do reator, podemos considerar os reatores nas extremidades em paralelo, e a frequência natural do sistema será:

$$f = 60 \sqrt{\frac{X \text{ (capacitor)}}{X \text{ (reator)}}} = 60 \sqrt{\frac{40}{975}} = 12 \text{ Hz}$$

O último disjuntor a abrir, por exemplo S, abrirá então uma corrente oscilante à frequência de aproximadamente

12 Hz, se se considerar a corrente capacitiva da linha de valor inferior em magnitude.

Logo, atenção especial deverá ser dada a especificação do tempo de arco dos disjuntores em circuitos com capacitores e reatores, já que esse tempo, deverá ser maior do que o intervalo entre dois zeros consecutivos da corrente oscilante. No exemplo acima esse tempo teria que ser pelo menos igual a 42ms.

II.9 - SOBRETENSÃO DE RELIGAMENTO

Considerando ainda a situação anterior, em que não haja desvio do gap durante a ocorrência de um defeito, a tensão armazenada no capacitor (no máximo igual a tensão de disparo do gap) poderá se somar à sobretensão normal gerada pelo religamento. (11).

Entretanto conforme será visto no Capítulo III, a presença e localização de reatores em derivação poderá atenuar o problema, e na ausência destes, a solução será o emprego de pára-raios para a proteção dos equipamentos, ou curto-circuitar o capacitor quando da abertura da linha, ou ainda, utilizar uma adequada constante de tempo para o reator de descarga do capacitor (Capítulo IV), compatível com o tempo de religamento.

II.10 - SOBRETENSÕES NO SISTEMA DEVIDO A FALTAS E SUBSEQUENTE CURTO-CIRCUITO DO CAPACITOR

Em geral o isolamento de uma linha de transmissão em extra alta tensão é ditado pelos surtos de manobra causados pela operação dos disjuntores, que podem ser controlados pelos resistores de pré-inserção.

Entretanto em linhas com compensação série, com a ocorrência de uma falta e possível disparo dos gaps dos capacitores em linhas adjacentes, tensões oscilantes em alta fre

quência serão geradas pela descarga de cada capacitor no seu desvio; essas tensões oscilantes propagam-se pelo sistema e se adicionam à tensão de 60 Hz, resultando sobretensões de natureza oscilatória, que não podem ser controladas pelos resistores de pré-inserção, já que elas aparecem antes da eliminação do defeito. (12).

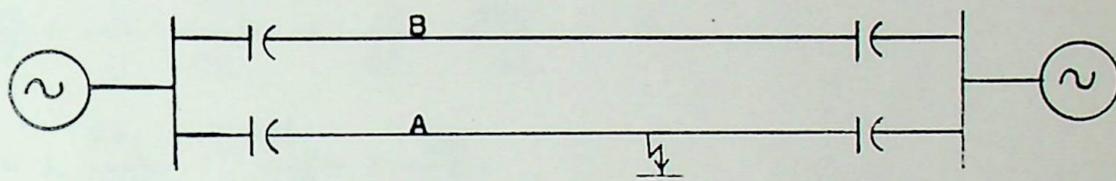


FIG. 4

Num circuito como o da figura 4, para uma falta na linha A, a ocorrência do disparo dos gaps nos capacitores dos dois terminais na linha B, ocasiona tensões oscilantes geradas em ambos terminais que podem estar em fase ou 180° fora de fase, isto é somando-se e ainda à tensão de 60 Hz ou se subtraindo não alterando a tensão de 60 Hz.

O tempo de ocorrência da falta é importante, pois na linha sem curto, se a tensão 60 Hz estiver passando pelo máximo quando ocorrer o disparo dos gaps, a sobretensão resultante terá o seu maior valor.

O aparecimento dessas tensões oscilantes pode ser explicado, considerando-se um dos circuitos usuais de desvio como o da figura 5-A, onde o fechamento da chave S, representativa da operação do gap, acarreta as seguintes equações a, b e c para a tensão oscilatória, que será gerada devido a descarga do capacitor nos elementos L e R amortecedores:

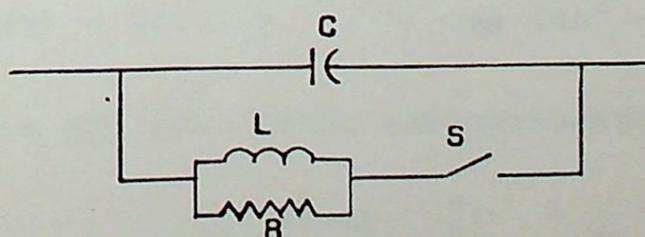


FIG. 5-A.

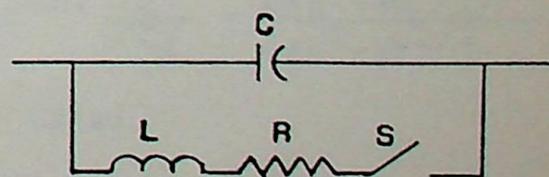


FIG. 5-B

A soma da corrente de descarga do capacitor deve ser

igual à corrente nos dois outros braços, então na figura 5-A:

$$- C \frac{dV_c}{dt} = I_L + \frac{V_c}{R}$$

diferenciando a equação acima

$$\frac{d^2 V_c}{dt^2} + \frac{1}{C} \frac{dI_L}{dt} + \frac{1}{RC} \frac{dV_c}{dt} = 0$$

$$V_c = L \frac{dI_L}{dt} \quad \therefore \frac{dI_L}{dt} = \frac{V_c}{L}$$

$$\frac{d^2 V_c}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{dV_c}{dt} + \frac{V_c}{LC} = 0$$

$$\frac{d^2 V_c}{dt^2} + \frac{1}{T_p} \frac{dV_c}{dt} + \frac{V_c}{T^2} = 0 \quad (1)$$

Considerando:

$$T_p = RC \quad (\text{constante de tempo do circuito})$$

$$T = \sqrt{LC} \quad (\text{período angular do circuito sem amortecimento})$$

$$e n = \frac{R}{Z_0} = R \sqrt{\frac{C}{L}} = \frac{T_p}{T}$$

Resolvendo a equação (1), pela aplicação das transformadas de Laplace, as expressões para a tensão no capacitor serão:

$$V_c(t) = V_c(0) e^{-t/2T_p} \cos(4n^2 - 1)^{1/2} \frac{t}{2T_p} - \frac{\text{sen}(4n^2 - 1)^{1/2} \frac{t}{2T_p}}{(4n^2 - 1)^{1/2}} \frac{t}{2T_p}$$

para $n > 1/2$ (caso subamortecido). (2-a)

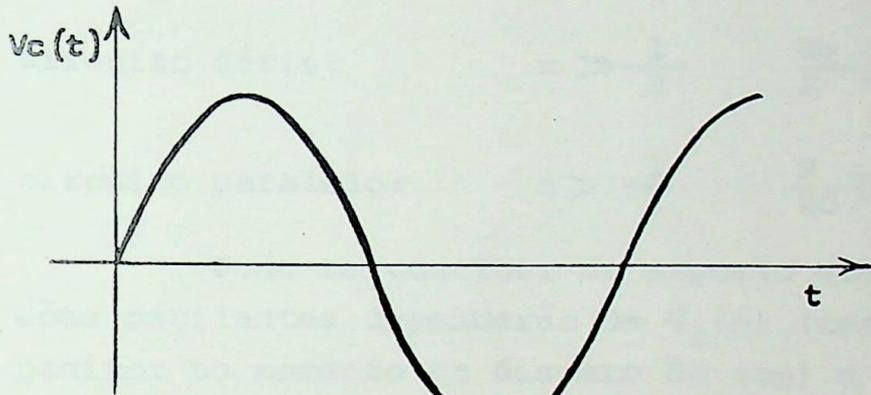
$$V_c(t) = V_c(0) e^{-t/2T_p} \left[1 - \frac{t}{2T_p} \right] \quad (2-b)$$

para $n = \frac{1}{2}$ (caso de amortecimento crítico).

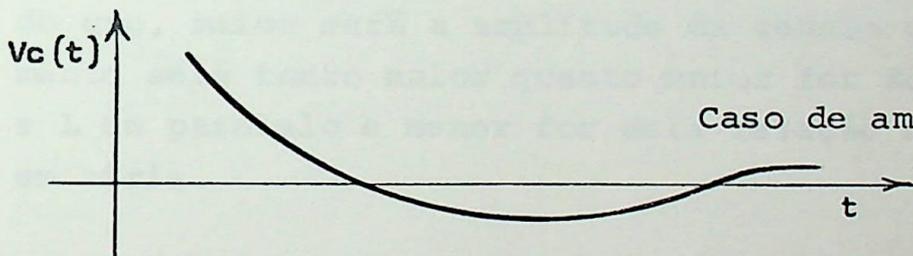
$$V_c(t) = V_c(0) e^{-t/2T_p} \left[\cosh (1-4n^2)^{1/2} \frac{t}{2T_p} - \frac{\sinh (1-4n^2)^{1/2} \frac{t}{2T_p}}{(1-4n^2)^{1/2}} \right]$$

para $n < \frac{1}{2}$ (caso de super amortecimento). (2-c).

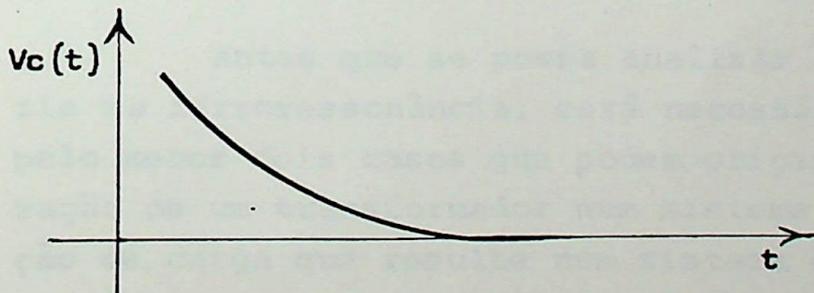
As expressões acima resultam em curvas com os aspectos abaixo:



Caso subamortecido



Caso de amortecimento crítico



Caso superamortecido

Variando n nas expressões acima, pode-se verificar que para n tendendo a infinito serão obtidos na equação (2-a) grande valores de pico para a tensão de oscilação, que dependerão também da tensão inicial de descarga do capacitor $V_c(0)$.

Para um circuito do tipo da figura (5-B), dedução se melhante poderia ser feita e as equações seriam do mesmo tipo,

porém \underline{n} será substituído por $m = \frac{1}{n}$ e T_p por $T_s = \frac{L}{R}$, resultando em oscilações que serão tanto maiores quanto maior for \underline{m} .

No circuito com \underline{R} e \underline{L} em paralelo o circuito se torna subamortecido para $R > Z_0/2$, pois \underline{n} será maior do que $1/2$ que é o valor do amortecimento crítico; no circuito com \underline{R} e \underline{L} em série o subamortecimento se dará para $R < 2Z_0$, já que:

$$\text{circuito série:} \quad m > \frac{1}{2} \quad \frac{Z_0}{R} > \frac{1}{2} \quad R < 2Z_0$$

$$\text{circuito paralelo:} \quad n > \frac{1}{2} \quad \frac{R}{Z_0} > \frac{1}{2} \quad R > Z_0/2$$

Pode-se concluir do exposto que a magnitude das tensões oscilantes dependerão de $V_c(o)$ (tensão de descarga do capacitor no momento do disparo do gap) e da relação Z_0/R no circuito de descarga; evidentemente então, quanto maior o ajuste do gap, maior será a amplitude da tensão gerada e seu amortecimento será tanto maior quanto maior for Z_0/R no circuito com R e L em paralelo e menor for esta relação no circuito com R e L em série.

II.11 - FERRORESSONÂNCIA

Antes que se possa analisar o efeito do capacitor série na ferroressonância, será necessário um exame sucinto de pelo menos dois casos que podem originar o fenômeno: a energização de um transformador num sistema em carga leve, e a rejeição de carga que resulte num sistema com transformador (es) em vazio.

II.11.1 - ENERGIZAÇÃO DE UM TRANSFORMADOR

Na energização de um transformador, ocorre um fenômeno de grande importância, chamado de corrente de inrush, e a cuja existência pode-se dar a seguinte interpretação:

a) Por ser o núcleo do transformador, constituído de material ferromagnético, quando submetido a um campo magnético,

a densidade de fluxo no seu interior não tem um comportamento linear com a variação da intensidade desse campo, devido à variação da permeabilidade magnética; como consequência a sua indutância será variável, e de baixo valor na região de saturação da curva do fluxo x corrente.

b) Como a matéria ferromagnética tem a propriedade de armazenar energia magnética, ao se desligar um transformador de um circuito, o valor do magnetismo residual será dependente da condição de carregamento do transformador (uma das situações em que será máximo, ocorrerá quando o fator de potência da carga for aproximadamente 1, já que no momento da interrupção da corrente de carga, a corrente magnetizante estará próxima a seu máximo, e conseqüentemente, o fluxo magnetizante também).

c) Exemplificando, quando da reintrodução do transformador no sistema, se o fluxo magnético inerente ao sistema, estiver passando pelo máximo negativo de sua onda senoidal, será estabelecido no transformador um fluxo magnético senoidal, porém deslocado transitoriamente devido ao fluxo residual, e cuja amplitude será a maior possível, se o fluxo residual for máximo positivo.

d) Como é o fluxo que controla a corrente, esta deverá se ajustar para manter a variação senoidal do fluxo, e devido à super saturação do núcleo do transformador causada pelo grande valor de crista do fluxo em sua fase inicial transitória, essa corrente apresentará picos acentuados em sua variação, e cuja forma genérica de onda, conforme demonstra a figura 6 abaixo, é distorcida e indicativa de forte presença de harmônicos.

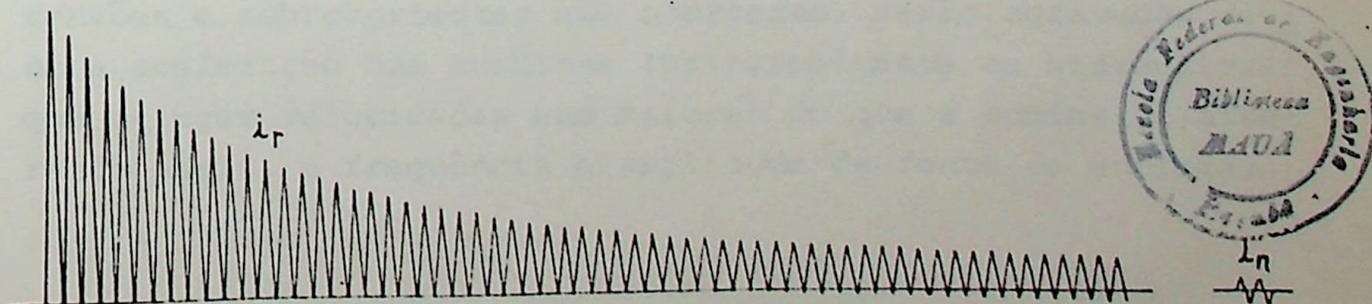


FIG. 6

onde:

i_r é a corrente de inrush e

i_m é a corrente de magnetização do transformador.

Pode-se observar ainda, que a corrente de inrush apresenta um decrescimento, que não é uniforme, devido também à super saturação do núcleo do transformador, já que nos primeiros ciclos da deslocada onda senoidal amortecida do fluxo magnético, a permeabilidade magnética do ferro decresce de valor, e conseqüentemente a indutância do transformador, que desta maneira, permite a ocorrência mais rápida da descarga da energia magnética armazenada inicialmente; é de se notar que as resistências, equivalente do sistema, do enrolamento e representativa das perdas no cobre e por histerese, constituem os principais elementos de dissipação daquela energia residual, já que sendo a constante de tempo do circuito igual a L/R , a sua dissipação será tanto mais rápida quanto maior for R .

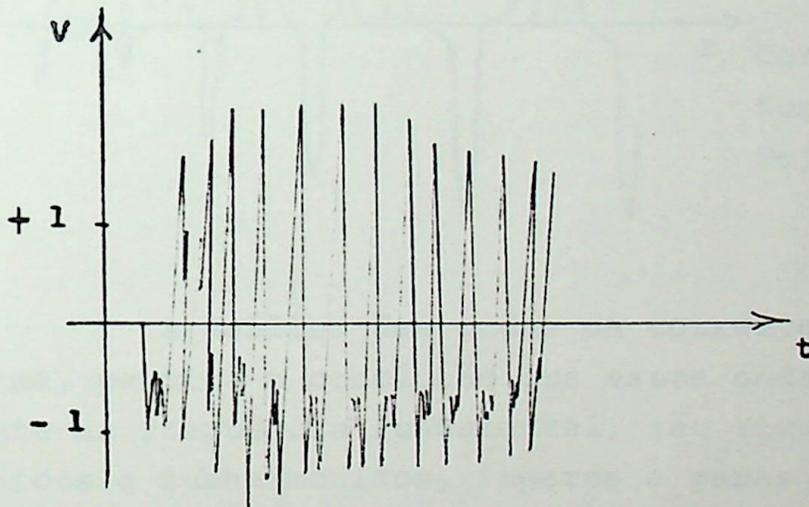
Conforme será visto adiante, sob o aspecto de ocorrência de sobrecorrentes e sobretensões, a pior situação de energização para o transformador em vazio ou com carga reduzida, será aquela em que ele seja conectado ao terminal de uma linha, já que, nesta situação estará influenciando também, o acréscimo da elevação normal de tensão neste terminal.

II.11.2 - REJEIÇÃO DE CARGA

Uma outra situação adversa para o transformador, seria aquela em que sua carga fosse retirada subitamente, deixando-o em vazio ligado ao sistema; nesta situação as sobretensões e sobrecorrentes que ocorrerão, serão agravadas devido a aceleração das turbinas (principalmente as hidráulicas), que atingem velocidades bem maiores do que a nominal, alterando assim, a frequência e amplitude da fonte de entrada.

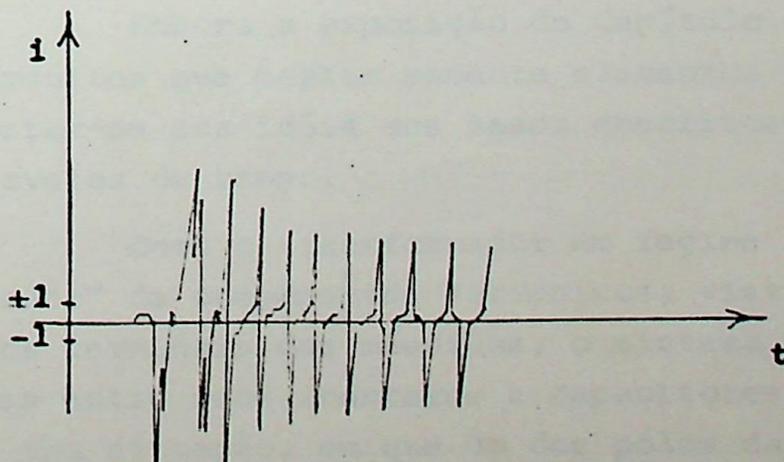
II.11.3 - ANÁLISE DA FERRORESSONÂNCIA COM A PRESENÇA DE CAPACITORES SÉRIE

Os oscilogramas da bibliografia reproduzidos nas figuras abaixo, que mostram as formas de onda da corrente e tensão nos terminais de um transformador, foram obtidos para casos específicos de energização (figuras 7-A e 7-B) e rejeição de carga (figuras 7-C e 7-D), sem a presença de capacitores série, porém poderão servir como ilustração para a análise efetuada a seguir, já que se referem a situação de conexão de um transformador num terminal de linha.



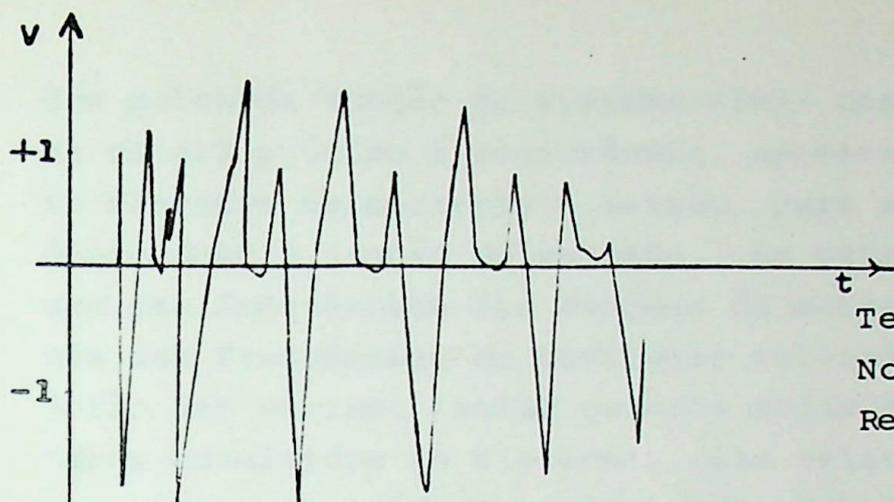
Tensão durante a energização em P.U. da Nominal.

FIG. 7-A



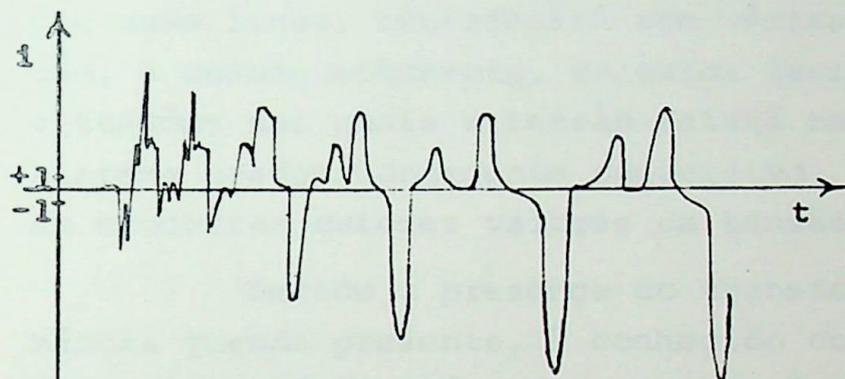
Corrente de INRUSH - em P.U. da Nominal.

FIG. 7-B



Tensão em P.U. da
Nominal.
Rej. de Carga

FIG. 7-C



Corrente em P.U. da
Nominal de Magnetização
Rej. de Carga

FIG. 7-D

A análise das ondas de corrente e tensão nas figuras acima, permite a conclusão que essas ondas, referidas à componente na frequência fundamental, são ricas em componentes harmônicas e subharmônicas, ímpares e pares, em variações senoidais e consenoidais, já que, tratadas como função do tempo, não são pares pois $f(-t) \neq f(t)$, não são ímpares pois $f(-t) \neq -f(t)$ e além disto $f(t + T/2) \neq -f(t)$.

Embora a exposição do Capítulo I, se aplique apenas a circuitos que tenham somente elementos lineares, é possível associar-se sua idéia aos casos descritos acima, em pequenos intervalos de tempo.

Como o transformador em regime de saturação, é um "gerador" de componentes harmônicas, visto dos seus terminais ou dos terminais das máquinas, o sistema poderá apresentar relações entre seus indutores e capacitores, que poderão conduzi-lo a uma situação, em que um dos polos das várias funções de entrada (tensão variável da fonte e componentes harmônicos originados no transformador) esteja a uma pequena distância de um

dos polos da função do sistema $H(s)$; nesta situação, o sistema estará próximo à ressonância, apresentando valores bastante elevados de corrente e tensão, para a frequência correspondente àquela função de entrada. Em outras palavras, quando uma das frequências das funções de entrada, estiver próxima a uma das frequências de oscilação natural do sistema (estas poderão ser várias, tantas quantos sejam os indutores e capacitores envolvidos no sistema), este estará próximo à ressonância; torna-se evidente então, que um banco de capacitores série numa linha, contribuirá com várias frequências de oscilação, e conseqüentemente, em carga leve ou em vazio, que são situações nas quais a tensão estará mais elevada por estar o sistema predominantemente capacitivo, haverá a tendência de se encontrar maiores valores de tensão e corrente.

Devido a presença do transformador, o efeito ressonância quando presente, é conhecido como ferroressonância e deve-se evitá-lo, já que forças mecânicas de grande intensidade serão exercidas nos enrolamentos do transformador, alterando a sua rigidez mecânica e comprometendo o isolamento entre suas espiras.

Como o fenômeno da ferroressonância pode acontecer, quando o sistema sofrer o impacto da presença do transformador em vazio, seja por ocasião de sua energização ou por rejeição de carga, será necessário que cada caso seja estudado separadamente, e constatada a presença das proximidades da ressonância ou mesmo de oscilações que sejam amortecidas rapidamente, mas que conduzam à ocorrência de elevados valores iniciais de corrente e tensão, várias são as alternativas para a diminuição de seus efeitos no transformador e no sistema, como por exemplo:

a) Colocação de reatores em derivação nas proximidades do transformador, já que diminuem a reatância indutiva na região de anormalidades; por economia, recomenda-se a conexão ao terciário do transformador, quando disponível.

b) Instalação de filtros ligados em derivação, contendo em cada fase indutores e capacitores ligados em sé-

rie, e sintonizados à frequência cujo harmônico ou subharmônico for mais acentuado.

c) Instalação de condensadores síncronos, também ligados ao terciário do transformador, que poderão atuar como limitadores do fenômeno, em complementação à sua função de controlar a tensão à frequência fundamental, em regime de carga.

d) Instalação de um reator em paralelo com o banco de capacitores série, quando presentes.

Outras soluções bastante eficientes para a limitação da ocorrência das oscilações, decorrentes da energização ou rejeição de carga, seriam respectivamente, a utilização de resistor de pré-inserção no disjuntor, ou de um resistor permanentemente ligado em paralelo com os capacitores, quando presentes; entretanto não são recomendáveis, pois como pré-inserido na energização, ele teria que ser dimensionado para suportar a intensidade da corrente de curto circuito, caso houvesse coincidência deste com o fechamento do disjuntor, e ligado em paralelo com o capacitor, o seu consumo seria inaceitável em regime permanente; uma solução que deve ser considerada também, é a possibilidade de desvio dos bancos de capacitores, que não só seria favorável a eliminação do fenômeno da ferroressonância, como também contribuiria para o rápido amortecimento das oscilações auto excitadas das máquinas geradoras.

(8), (13), (14), (15), (16) (16-A).

C A P Í T U L O - I I I

LOCALIZAÇÃO E VALOR DA COMPENSAÇÃO

Essa seção tem como objetivo descrever alguns pontos a serem considerados e/ou analisados quando da escolha da localização do capacitor num circuito em estudo, e abordar sucintamente a difícil tarefa da escolha do valor da compensação.

III.1 - A LOCALIZAÇÃO DOS CAPACITORES SÉRIE

A posição do capacitor é uma importante consideração no caso de longas linhas de transmissão onde a capacitância em derivação não pode ser desprezada.

As expressões analíticas que demonstram o efeito da localização, nas constantes da linha, são mostradas a seguir:

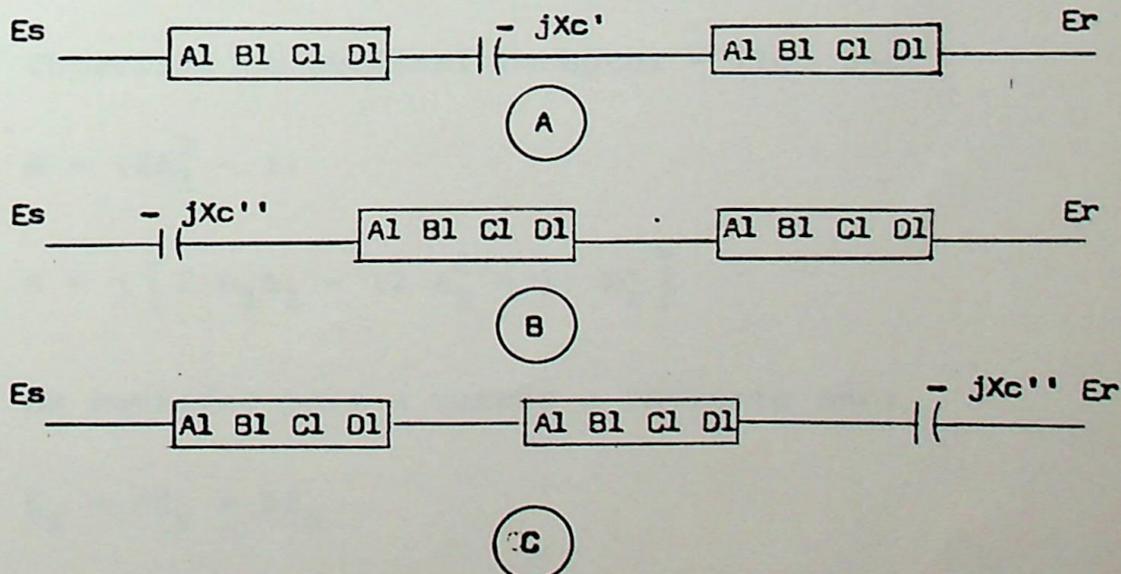


FIG. 8

Considere a figura 8, onde:

E_s - tensão no terminal transmissor.

E_r - tensão no terminal receptor.

r - resistência da linha considerada zero.

A_1, B_1, C_1 e D_1 - valor das constantes da metade da linha.

A, B, C e D - valor das constantes totais incluindo o capacitor série.

X_c - reatância do capacitor.

a) Capacitor no centro da linha - fig. 8-A.

$$A = (2A_1^2 - 1) + C_1 A_1 X'_c$$

$$B = j (2B_1 A_1 - A_1^2 X'_c)$$

b) Capacitor no terminal transmissor - fig. 8-B.

$$A = (2A_1^2 - 1) + 2 C_1 A_1 X''_c$$

$$B = j \left[2 B_1 A_1 - (2A_1^2 - 1) X''_c \right]$$

c) Capacitor no terminal receptor - fig. 8-C.

$$A = (2A_1^2 - 1)$$

$$B = j \left[2 B_1 A_1 - (2 A_1^2 - 1) X''_c \right]$$

d) As equações para a tensão e corrente são:

$$E_s = AE_r + BI_R$$

$$I_s = CE_R + DI_R \quad (17)$$

Das equações acima conclui-se que:

1) Com o capacitor colocado no terminal transmissor, a tensão

no receptor em vazio é menor do que se ele fosse localizado em qualquer outro ponto do circuito, pois a constante A é maior nesse ponto e $E_R = \frac{E_S}{A}$.

2) Com o capacitor colocado no terminal receptor a tensão em vazio não é afetada pela sua presença, pois a constante A não se modifica.

3) Uma maior compensação por ohm de capacitância é obtida quando o capacitor é colocado no meio da linha, pois a constante B é menor no centro da linha e sendo que, para se transferir a mesma potência ela deve ser igual no centro ou nos terminais, conclui-se que o capacitor no centro, deverá ter menor reatância e

$$X''_C = \frac{A_1^2}{(2A_1^2 - 1)} X'_C$$

A escolha da localização do capacitor será feita em função da obtenção de menor nível de perdas, menor quantidade de reativos a serem gerados ou absorvidos nas diversas fases do fornecimento, valor mais adequado para o fator de potência, etc.. Além disso, deve-se levar em conta que a localização no terminal não é geralmente recomendável devido a possibilidade de ocorrer considerável elevação do nível de curto-circuito na barra.

Sob o aspecto de facilidade de manutenção, comando etc., a localização do capacitor longe dos terminais da linha não é recomendável, porém é nesta situação que sob o aspecto econômico, a localização é mais vantajosa pois a potência do banco, as perdas reativas na linha e o nível de curto-circuito serão menores.

Com relação a localização do banco de capacitor, podemos ainda fazer as seguintes observações:

1) CAPACIDADE DOS EQUIPAMENTOS DE DESVIO DO CAPACITOR

Escolhido o valor da compensação pode ser que seja vantajoso localizá-lo no terminal ou terminais se houver divisão da compensação.

Nesse caso a avaliação da corrente de curto para efeito da escolha dos equipamentos de desvio do capacitor deve ser realística, considerando-se o desempenho desses componentes (gap, disjuntor, etc.) quanto às capacidades térmicas, dinâmicas, e desionização, dados esses fornecidos pelos fabricantes; atualmente poucos fabricantes são capazes de fornecer esses equipamentos para um limite máximo de corrente igual a 60 KA (valor eficaz). (18).

2) CORRENTE DE ARCO SECUNDÁRIO

Essa corrente é a que flui através do ponto de falta, depois dos disjuntores em ambos os terminais terem aberto.

Na ocorrência de uma falta num circuito com compensação e reatores em derivação, caso não haja disparo dos gaps dos capacitores, após a abertura dos disjuntores, a energia armazenada pelos capacitores, que é proporcional ao quadrado da tensão em seus bornes do instante da eliminação do defeito, se transferirá para o reator através do ponto de curto, resultando em consequência uma componente oscilatória da corrente de arco secundária.

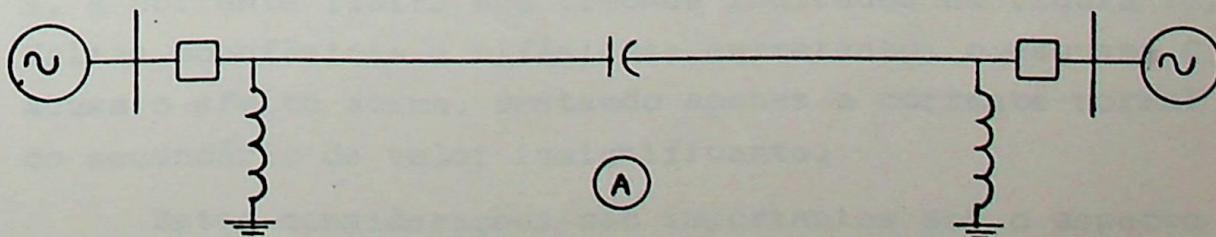


FIG. 9

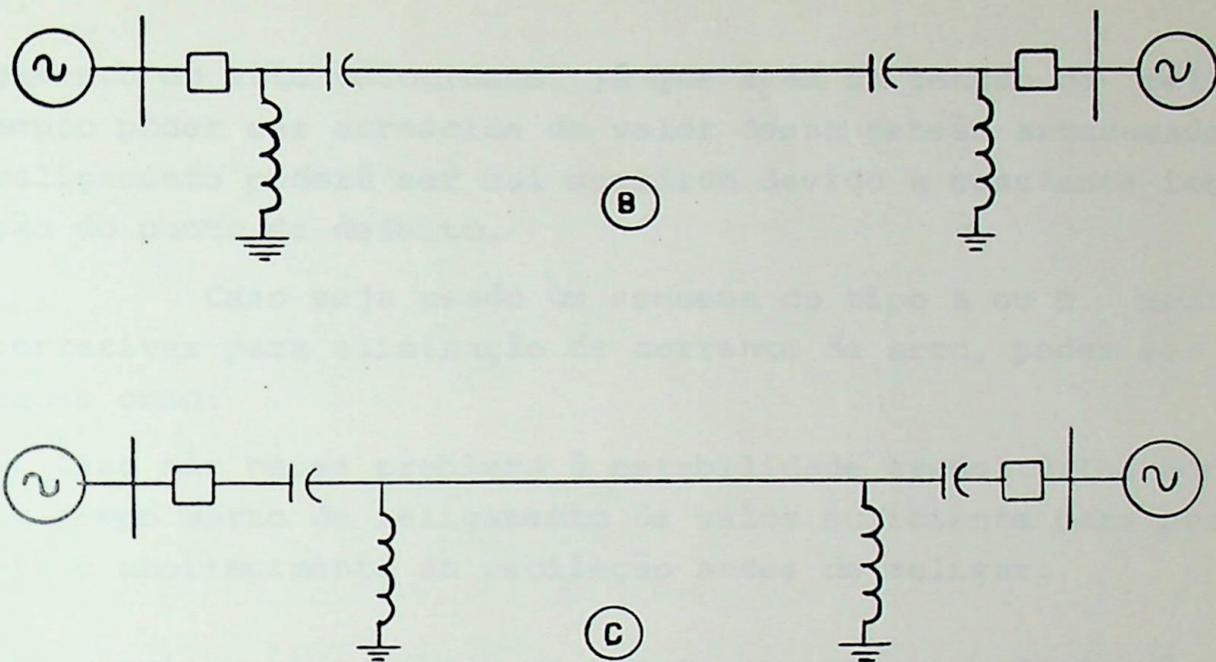


FIG. 9

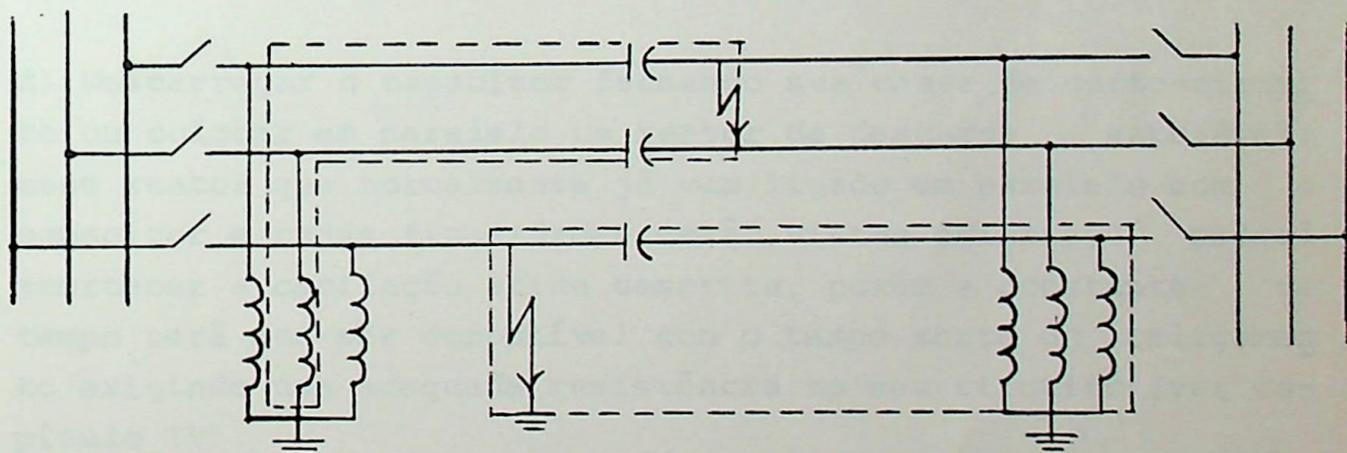


FIG. 10

Se o circuito estudado for o do esquema A ou B da figura 9, a corrente fluirá nos trechos indicados na figura 10, para faltas monofásicas e bifásicas; entretanto, o esquema C já não acusa o efeito acima, restando apenas a corrente normal de arco secundário de valor insignificante.

Estas considerações são importantes sob o aspecto de reli

gamento em alta velocidade, já que além da tensão de religamento poder ser acrescida do valor dessa tensão armazenada, o religamento poderá ser mal sucedido devido a constante ionização do ponto de defeito.

Caso seja usado um esquema do tipo A ou B medidas corretivas para eliminação da corrente de arco, podem ser adotadas como:

- a) Caso não cause problema à estabilidade transitória, adotar um tempo morto de religamento de valor suficiente para permitir o amortecimento da oscilação antes de religar.
- b) Inserir resistores no neutro dos reatores em derivação (eficiente somente para faltas monofásicas).
- c) Caso o reator seja ligado à linha por disjuntor, desligá-lo durante o tempo morto.
- d) Descarregar o capacitor fechando sua chave de curto-circuito ou colocar em paralelo um reator de descarga saturável; esse reator que normalmente já vem ligado em paralelo com o capacitor e cujas finalidades serão vistas adiante, poderá amortecer a oscilação acima descrita, porém a constante de tempo terá que ser compatível com o tempo morto do religamento exigindo uma adequada resistência no seu circuito (ver Capítulo IV).

A escolha do esquema C conduz a ocorrência de maiores sobretensões no religamento, o que entretanto poderá ser contornado com a utilização de pára-raios apropriados.

Pelo exposto acima, conclui-se que não é possível definir-se o melhor lugar para a localização do banco de capacitores, sendo que cada caso deve ser estudado separadamente.

(19).

III.2 - ESCOLHA DO VALOR DA COMPENSAÇÃO

Nenhuma regra geral pode ser definida para se escolher o valor percentual de compensação a ser usado num determinado sistema de transmissão, já que o valor ótimo será decorrente de análises econômicas e elétricas, relacionadas a estabilidade, previsão de crescimento de carga, regulação, perdas, etc..

Existem ainda alguns fatores que limitam o máximo valor percentual de compensação (geralmente de 60 a 70%), sendo a resistência da linha uma importante consideração, devido ao aumento das perdas; outra limitação, é a existência no circuito de elementos com características não lineares, como transformadores e reatores, e a possibilidade de ocorrência, de torques mecânicos danosos às máquinas geradoras. (5) (6).

C A P Í T U L O - I V

AS SOBRETENSÕES E OS SISTEMAS DE DESVIO

Após a abordagem superficial das consequências da presença do capacitor série num Sistema de Potência, serão fornecidos neste Capítulo, os subsídios necessários para se proceder ao estudo da escolha do ajuste do gap do capacitor, que é o principal objetivo do presente trabalho.

Para melhor compreensão do texto que se seguirá, serão abordados a seguir, os seguintes assuntos:

- a) Dedução das equações das tensões ^{sobre o capacitor} (através dos terminais do capacitor, durante um curto-circuito e durante sua reinserção no circuito.
- b) Considerações sobre a reinserção dos capacitores, e sobre os resistores que são introduzidos durante a reinserção.
- c) Descrição dos sistemas de desvio ou sistemas de proteção do capacitor contra as sobretensões do item a).

IV.1 - SOBRETENSÕES NOS CAPACITORES

IV.1.1 - Defeito num circuito com um módulo de banco de capacitores série.

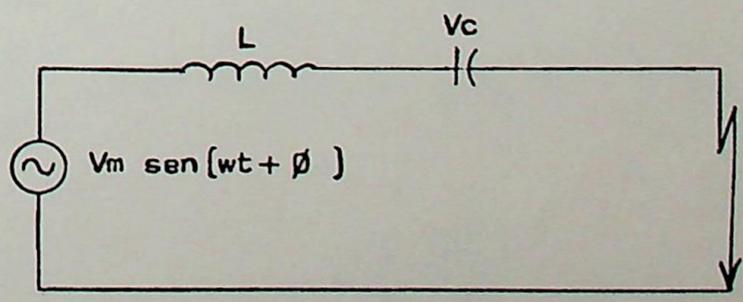


FIG. 11-A

Considere o circuito acima, em que:

$$L \frac{di}{dt} + Vc = Vm \text{ sen } (wt + \varphi) \quad I = C \frac{dVc}{dt}$$

$$LC \frac{d^2 Vc}{dt^2} + Vc = Vm \text{ sen } (wt + \varphi)$$

$$LC \left[s^2 Vc(s) - sVc(0) - V'c(0) \right] + Vc(s) = Vm \frac{s \text{ sen } \varphi + w \text{ cos } \varphi}{s^2 + w^2}$$

$$V'c(0) = \frac{I(0)}{C}$$

$$s^2 Vc(s) - sVc(0) - \frac{I(0)}{C} + \frac{1}{LC} Vc(s) = \frac{Vm}{LC} \times \frac{s \text{ sen } \varphi + w \text{ cos } \varphi}{s^2 + w^2}$$

$$Vc(s) \left[s^2 + \frac{1}{LC} \right] = \frac{Vm}{LC} \frac{s \text{ sen } \varphi + w \text{ cos } \varphi}{s^2 + w^2} + sVc(0) + \frac{I(0)}{C}$$

$$Vc(s) = \frac{Vm}{LC} \frac{s \text{ sen } \varphi + w \text{ cos } \varphi}{(s^2 + 1/LC)(s^2 + w^2)} + Vc(0) \frac{s}{s^2 + 1/LC} + \frac{I(0)}{C(s^2 + 1/LC)}$$

$$B = \frac{1}{\sqrt{LC}} = w \sqrt{\frac{Xc}{XL}}$$

$$Vc(s) = Vm w^2 \frac{Xc}{XL} \frac{s \text{ sen } \varphi + w \text{ cos } \varphi}{(s^2 + w^2)(s^2 + B^2)} + Vc(0) \frac{s}{s^2 + B^2} + \frac{I(0)/C}{s^2 + B^2}$$

Tomando a anti-transformada, obteremos a expressão 3-a abaixo:

$$Vc(t) = \frac{Vm Xc}{XL - Xc} \left[- \text{sen } (wt + \varphi) + \left(\frac{XL}{Xc} \text{ cos }^2 \varphi + \text{sen }^2 \varphi \right)^{1/2} \right. \\ \left. \text{cos } (Bt - m) \right] + Vc(0) \text{ cos } Bt + \sqrt{\frac{XL}{Xc}} I(0) \text{ sen } Bt \quad (3-a)$$

onde:

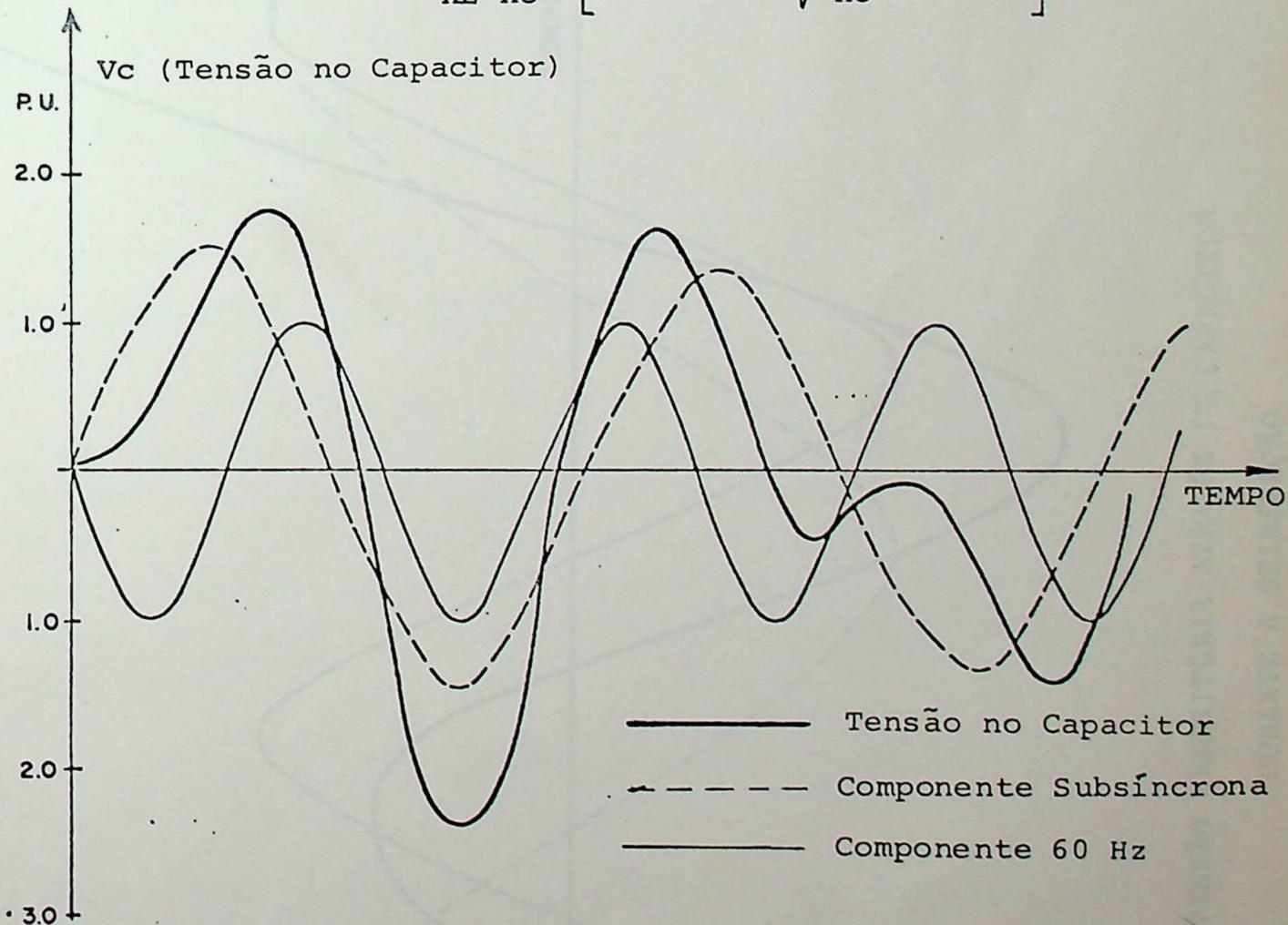
$$m = \text{arctg} \left(\sqrt{\frac{XL}{Xc}} \text{ cotg } \varphi \right)$$

Discussão:

a) SOBRETENSÃO DURANTE O CURTO-CIRCUITO

A tensão através do capacitor, composta da componente a frequência fundamental e da componente a frequência subsíncrona, durante um curto-circuito, pode ser melhor visualizada com o sistema considerado em vazio ($V_c(0) = 0$ e $I(0) = 0$), na figura 11-B, para uma relação de $X_c/X_L \cong 0,5$. Esta situação foi considerada quando a tensão do gerador estava passando por zero, isto é, $\phi = 0$, logo:

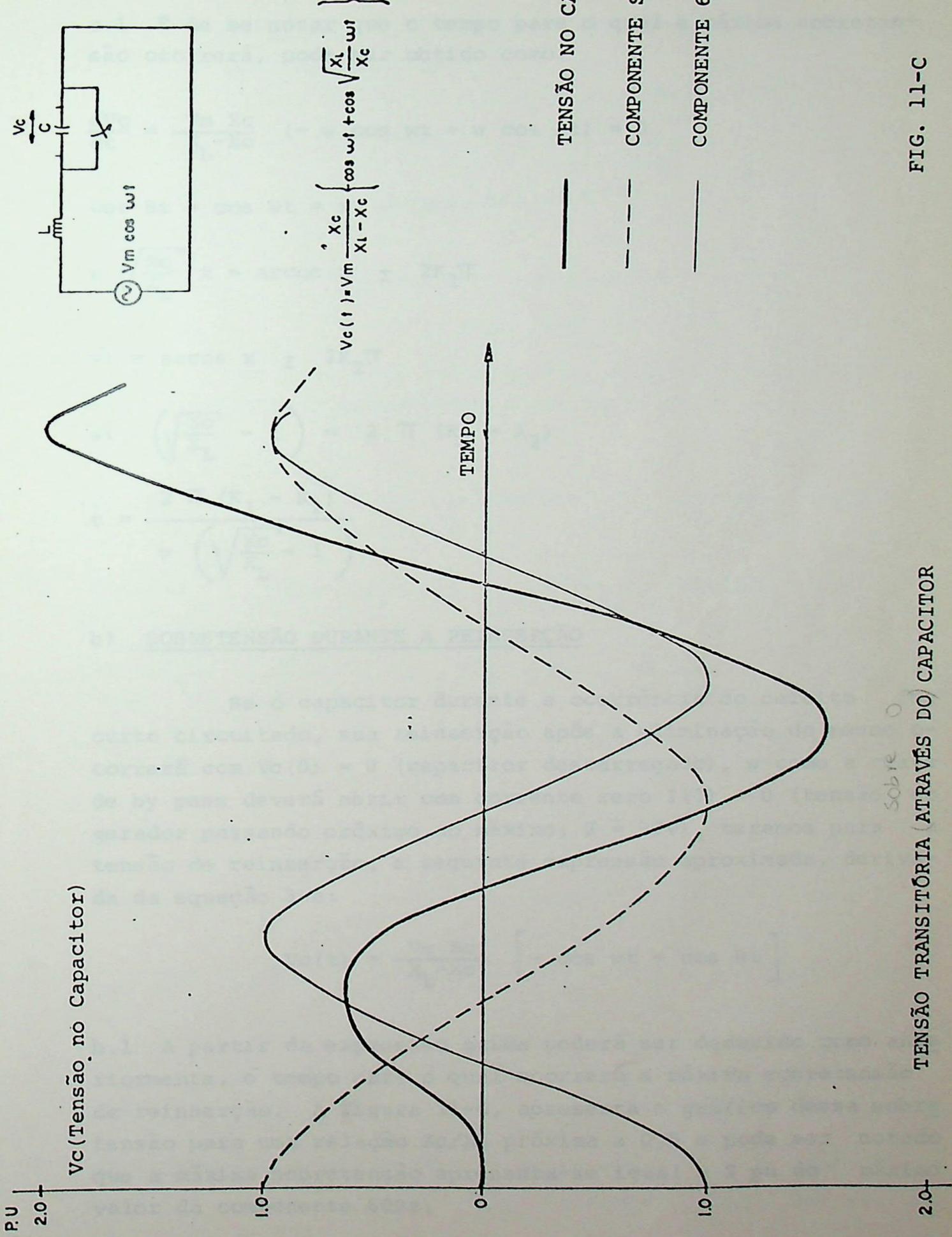
$$V_c(t) = \frac{V_m X_c}{X_L - X_c} \left[-\text{sen } \omega t + \sqrt{\frac{X_L}{X_c}} \text{sen } Bt \right]$$



TENSÃO TRANSITÓRIA ATRAVÉS DO CAPACITOR
DURANTE UM CURTO CIRCUITO

FIG. 11-B





sobre 0

TENSÃO TRANSITÓRIA (ATRAVÉS DO) CAPACITOR DURANTE A REINserÇÃO

FIG. 11-C

a.1 É de se notar que o tempo para o qual a máxima sobretenção ocorrerá, pode ser obtido como:

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{V_m X_c}{X_L - X_c} (-w \cos wt + w \cos Bt) = 0$$

$$\cos Bt = \cos Wt = x \quad ? \quad \Leftrightarrow Bt = Wt \pm 2K_1\pi$$

$$w \sqrt{\frac{X_c}{X_L}} t = \arccos x \pm 2K_1\pi$$

$$wt = \arccos x \pm 2K_2\pi$$

$$wt \left(\sqrt{\frac{X_c}{X_L}} - 1 \right) = 2\pi (K_1 - K_2)$$

$$t = \frac{2\pi (K_1 - K_2)}{w \left(\sqrt{\frac{X_c}{X_L}} - 1 \right)}$$

b) SOBRETENSÃO DURANTE A REINSERÇÃO

Se o capacitor durante a ocorrência do defeito for curto circuitado, sua reinserção após a eliminação do mesmo ocorrerá com $V_c(0) = 0$ (capacitor descarregado), e como a chave de by pass deverá abrir com corrente zero $I(0) = 0$ (tensão do gerador passando próximo ao máximo, $\varnothing \cong 90^\circ$), teremos para a tensão de reinserção, a seguinte expressão aproximada, derivada da equação 3-a:

$$V_c(t) = \frac{V_m X_c}{X_L - X_c} \left[-\cos wt + \cos Bt \right]$$

b.1 A partir da expressão acima poderá ser deduzido como anteriormente, o tempo para o qual ocorrerá a máxima sobretenção de reinserção. A figura 11-C, apresenta o gráfico dessa sobretenção para uma relação X_c/X_L próxima a 0,5 e pode ser notado que a máxima sobretenção apresenta-se igual a 2 pu do máximo valor da componente 60Hz.

IV.1.2 - DEFEITO NUM CIRCUITO COM DOIS MÓDULOS DE BANCOS DE CAPACITORES SÉRIE

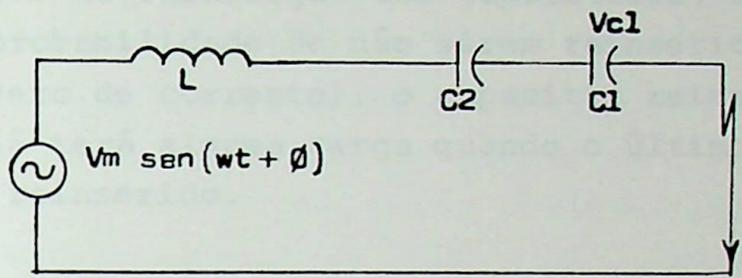


FIG. 11-D

Procedendo da mesma maneira como para o circuito LC com um capacitor, chegaríamos a expressão 3-b:

$$\begin{aligned}
 V_{c1}(t) = & \frac{V_m X_{c1}}{X_L - (X_{c1} + X_{c2})} \left[- \sin(\omega t + \phi) + \left(\frac{X_L}{X_{c1} + X_{c2}} \cos^2 \phi + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \sin^2 \phi \right)^{1/2} \cos(Bt - m) \right] + \sqrt{\frac{X_L}{X_{c1} + X_{c2}}} X_{c1} I(0) \sin Bt + \\
 & + \left(\frac{V_{c1}(0) + V_{c2}(0)}{X_{c1} + X_{c2}} \right) X_{c1} \cos Bt + \frac{1}{X_{c1} + X_{c2}} \left(V_{c1}(0) X_{c2} - \right. \\
 & \left. - V_{c2}(0) X_{c1} \right) \tag{3-b}
 \end{aligned}$$

onde:

$$B = \omega \sqrt{\frac{X_{c1} + X_{c2}}{X_L}} \quad \text{e} \quad m = \arctg \left(\sqrt{\frac{X_L}{X_{c1} + X_{c2}}} \cotg \phi \right)$$

$V_{c2}(0)$ e $V_{c1}(0)$ - tensões no capacitor 1 e 2 no tempo zero.

$I(0)$ - corrente nos capacitores no tempo zero.

Discussão:

a) A básica diferença entre as expressões 3-a e 3-b é a componente de tensão CC (último termo da equação acima) que aparece

rã se C_1 e C_2 forem diferentes.

b) Sob o aspecto de reinserção dos capacitores, devido ao fato da grande probabilidade de não serem reinseridos ao mesmo tempo (mesmo zero de corrente), o capacitor reinserido em primeiro lugar, já terá alguma carga quando o último capacitor estiver sendo reinserido.

$$V_{c1}(0) = 0, \quad I(0) = 0 \quad \text{e} \quad V_{c2} \neq 0$$

A expressão para a tensão de reinserção no capacitor a ser reinserido por último, nesse caso será:

$$V_{c1}(t) = \frac{V_m X_{c1}}{X_L - (X_{c1} + X_{c2})} \left[-\text{sen}(wt + \phi) + \left(\frac{X_L}{X_{c1} + X_{c2}} \cos^2 \phi + \text{sen}^2 \phi \right)^{1/2} \cos(Bt - m) \right] + \frac{V_{c2}(0)}{X_{c1} + X_{c2}} X_{c1} (\cos Bt - 1)$$

Embora complexa, a equação acima demonstra existir no momento da reinserção do último capacitor em adição à tensão senoidal a 60Hz, uma componente oscilante à frequência B e uma componente de tensão C.C. Para reduzir essas tensões, usa-se geralmente um resistor em paralelo com o capacitor no momento da reinserção, conforme será abordado a seguir. (2) (3)

IV.2 - REINSERÇÃO

IV.2.1 - CONSIDERAÇÕES SOBRE A REINSERÇÃO DOS CAPACITORES

Na ocorrência de um curto-circuito, o capacitor série da linha em falta deverá ser curto circuitado por seus elementos de desvio, enquanto que o desvio dos capacitores nas linhas adjacentes acontecerá dependendo da intensidade da corrente de defeito.

A determinação do tempo de reinserção dos capacitores após a eliminação da falta, será feita em função de pro-

blemas que sua ausência possa acarretar a estabilidade transitória do sistema, ou somente para se obter menor tensão de reinsertão no capacitor, tendo em vista a corrente de oscilação a 60 Hz, que ocorre no circuito após a eliminação do defeito.

Embora não exista definição do que seja reinsertão rápida, pode-se assim considerá-la apenas para as linhas adjacentes aquela em curto, já que nesta linha a reinsertão será efetuada para o sistema somente após o religamento da mesma; o tempo que qualifica a reinsertão como rápida, usado pelos fabricantes e empresas de eletricidade, é atualmente em torno de 6 ciclos após a eliminação do defeito. (18)

A escolha do arranjo do equipamento de curto-circuito do capacitor (descrição feita no item IV.3), é de especial importância para se obter a rapidez desejada na reinsertão, pois após a eliminação do defeito, o gap embora deixe de conduzir corrente, terá o seu espaço ionizado, e o tempo de sua desionização, no qual sua tensão de recuperação atinja um valor suportável à tensão de reinsertão, terá que ser compatível com o tempo desejável para a reinsertão do capacitor; caso contrário haverá novamente o curto-circuito do capacitor.

É de se notar, que caso o sistema não apresente problemas de estabilidade devido a ausência do capacitor, poderia se usar um arranjo que conduzisse a um tempo maior de reinsertão, porém atenção especial deve ser dada a possibilidade de se reinserti-lo próximo ou no pico da corrente oscilante a 60 Hz, o que poderia provocar novamente o seu curto-circuito. (19)

IV.2.2 - RESISTOR DE REINSERTÃO

Conforme demonstrado no item IV.1, ao se reinsertir um capacitor no circuito após operação de seu sistema de desvio, ocorre uma sobretensão em seus terminais devido a cargas armazenadas em segmentos já reinsertidos e/ou oscilações subsíncronas que se somam à tensão a frequência fundamental.

Essa sobretensão de reinserção é um fator determinante para a escolha do ajuste do gap e deve estar abaixo de sua mínima tensão de disparo, a fim de que o capacitor não seja novamente curto circuitado quando reinserido.

Como o preço do capacitor varia diretamente proporcional ao ajuste de seu gap para valores abaixo de 3 pu, e ao quadrado do ajuste para valores maiores do que 3 pu, é de fundamental importância obter-se o menor ajuste possível, e que seja compatível com os requisitos de estabilidade do sistema em estudo.

Com o objetivo de se reduzir a amplitude dessa sobretensão, é boa prática colocar em série ou em paralelo com o gap um resistor chamado de reinserção, cuja presença no circuito durante um curto-circuito, (o que ocorrerá em função do arranjo do desvio), contribui ainda para a limitação da corrente de curto.

Seja em série ou em paralelo com o gap, como será visto adiante, os capacitores nas linhas adjacentes à do curto, tentarão reinserir após a eliminação deste, e o farão tendo agora o resistor em paralelo, cuja finalidade vista acima deve ser alcançada com a mínima perda de compensação (por questão de estabilidade) enquanto durar sua permanência em paralelo com o capacitor, que deve ser a mínima possível, se houver exigência de rápida reinserção da total compensação. O valor do resistor portanto deve ser maior do que a reatância do capacitor durante o paralelismo, e ser determinado a um valor de tensão inferior à mínima tensão de disparo do gap, pois esse valor será o da tensão de reinserção para a qual não se deseja novo disparo. (20) (21) (22)

IV.3 - SISTEMA USUAIS DE DESVIO DOS CAPACITORES

Antes de se iniciar a descrição dos arranjos existentes para desvio dos capacitores é conveniente descrever a nomenclatura dos bancos de capacitores, cujas definições são:

- a) ELEMENTO - é a parte indivisível do capacitor, consistindo de eletrodos separados por um dielétrico.
- b) UNIDADE - é um conjunto de um ou mais elementos em um único compartimento, arranjados interiormente em série e em paralelo, com apenas dois terminais exteriores.
- c) SEGMENTO - grupo monofásico de unidades composto de equipamentos de desvio e sistema de controle e proteção do conjunto.
- d) MÓDULO - grupo trifásico de segmentos.
- e) BANCO - conjunto total de módulos de capacitores eletricamente conectados.

Os comentários sobre os componentes de um sistema de desvio podem ser efetuados, considerando-se a figura 12, onde dois segmentos de capacitores (1) que são conectados a fase (2) de uma linha de transmissão, podendo ser retirados pelas suas chaves isoladoras (3), são compostos de:

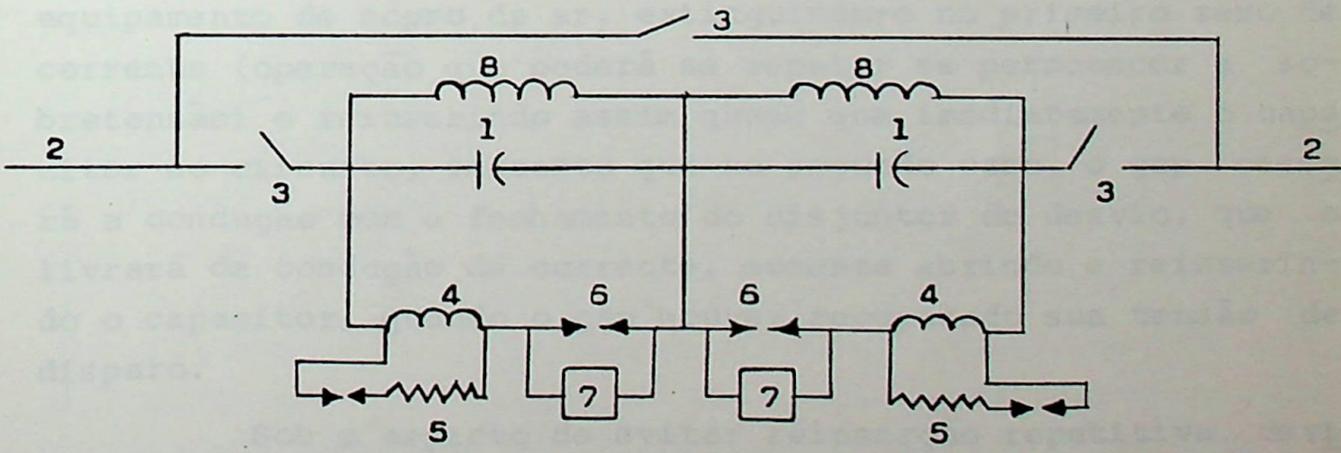


FIG. 12

(4) e (5) - ELEMENTOS DE AMORTECIMENTO

No desvio de um capacitor, pelo disparo do gap (6) ou pelo fechamento do disjuntor de desvio (7), é importante

limitar a corrente de descarga a um valor que seja seguro para os próprios capacitores, gap e disjuntor. Conforme está demonstrado no Capítulo III, quando da ocorrência do desvio de um circuito como o estudado, fluirá uma corrente oscilante a alta frequência que poderá ser amortecida rapidamente utilizando-se adequados valores de L e R que constituem os elementos 4 e 5. Em situações normais de desvio, como para controle de reativos se se fizer necessário, ou caso o circuito de amortecimento fique em série com o capacitor na própria linha, o resistor (5) ficará desconectado do circuito de amortecimento por meio de seu gap para evitar contínuas perdas, pois este gap serve para ligar o resistor somente quando houver descarga do capacitor em caso de operação automática do gap 6.

(6) - GAP

Qualquer distúrbio no sistema que faça aparecer sobretensão nos bornes do capacitor a um valor igual ao ajuste do gap, causará o seu disparo protegendo assim o banco. O gap pode ser classificado em duas categorias, isto é, gap do tipo auto extingüível ou gap do tipo arco mantido. No primeiro caso, a interrupção do arco se dará pelo acionamento do equipamento de sopro de ar, extingüindo-o no primeiro zero de corrente (operação que poderá se repetir se permanecer a sobretensão) e reinserindo assim quase que imediatamente o capacitor no circuito, enquanto que no segundo caso, o gap cessará a condução com o fechamento do disjuntor de desvio, que o livrará da condução de corrente, somente abrindo e reinserindo o capacitor, quando o gap houver recuperado sua tensão de disparo.

Sob o aspecto de evitar reinserção repetitiva devido a sobretensões de reinserção, a opção pelo segundo tipo é mais vantajosa, pois caso haja novo disparo do gap, este se dará com o seu meio mais desionizado devido ao tempo de reinserção ser maior; ao se adotar um gap auto extingüível, por ter que ser mais resistente pela possibilidade de suportar re

inserções repetitivas, e na linha em falta conduzir a corrente de falta durante o tempo de sua duração, o seu custo se torna maior.

Entretanto sob o aspecto de estabilidade o primeiro tipo é mais vantajoso, pois o seu tempo de reinserção é menor, isto é, caso não haja novos disparos devido a sobretensão na reinserção.

(7) - DISJUNTOR DE DESVIO

Além de servir para manobrar o banco se for necessário, o disjuntor tem como finalidade curto circuitar o capacitor em caso de defeito no banco de capacitores, e quando do disparo do gap, em caso deste ser do tipo arco mantido.

Como a abertura do disjuntor se faz no zero de corrente, a tensão no capacitor será máxima e o disjuntor deve ser capaz de suportá-la sem dar reiguição (na descrição do funcionamento dos arranjos para desvio dos capacitores, isto poderá ser melhor compreendido).

(8) - REATOR

Quando se reinsere segmentos de capacitor na linha de transmissão, o último segmento ficará sujeito a uma sobretensão conforme já demonstrado no item IV.1. Essa sobretensão poderá ser amortecida por um resistor não mostrado na figura exemplificante, e sobre o qual serão tecidos comentários nas descrições dos arranjos a seguir. Mesmo assim o capacitor estará sujeito ainda a essa sobretensão, que embora reduzida pelo resistor persistirá por algum tempo expondo o capacitor a esforços que poderão diminuir o seu tempo de vida.

Com o objetivo de acelerar o amortecimento dessa sobretensão, um reator de descarga deve ser colocado em paralelo com o capacitor e além da utilização acima, em caso de se desligar a linha ele tem a função de absorver a carga acumulada no capacitor, isto é, dependendo do tempo de desligamento,

pois sua constante de tempo é alta; se o desligamento for por curto-circuito, ele não atuará, já que nesse caso a descarga do capacitor se dará pela atuação de seu equipamento de desvio. (23) (24) (25)

IV.4 - DESCRIÇÃO DOS ARRANJOS DE DESVIO

Será feita a seguir descrição dos arranjos de desvio que foram utilizados nos testes do Capítulo VI.

a) O arranjo da figura 13 que é mostrado em condições normais e que usa gap do tipo arco mantido tem o seguinte funcionamento:

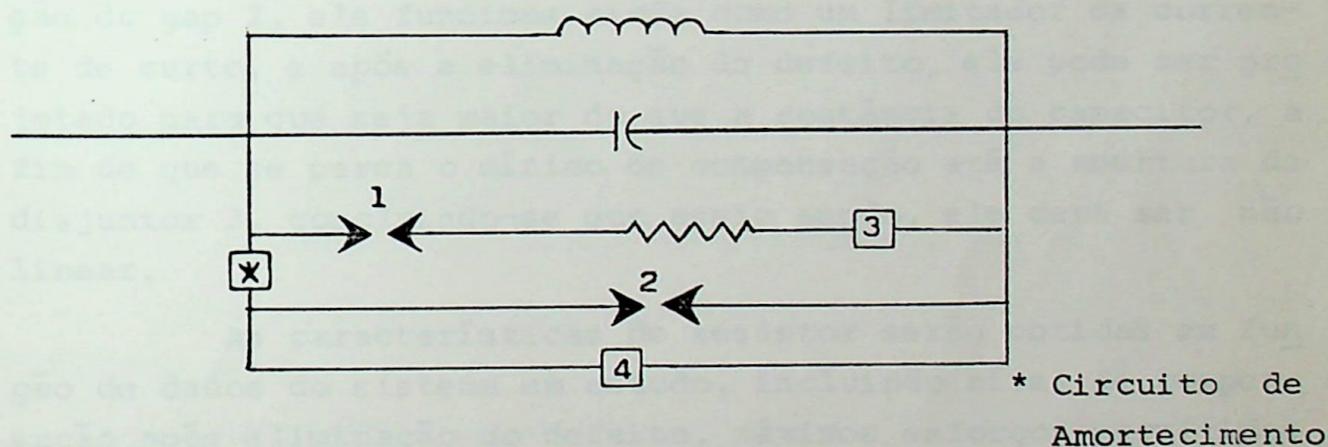


FIG. 13

O gap 1 permite o ajuste para faltas externas (menores correntes) e o gap 2 para faltas internas. Na ocorrência de curto-circuito em linhas adjacentes (instante 0) o gap 1 fecha (normalmente esse disparo acontece em torno de 0,5 ciclo - 60Hz) e sendo a falta eliminada entre 2 e 5 ciclos o capacitor será reinserido pela abertura do disjuntor 3 em torno de 5 a 9 ciclos; esse disjuntor torna a fechar após 18 a 22 ciclos, tempo suficiente para que o gap se desionize e esteja preparado para novo disparo, em caso de haver nova sobretenção devido a religamento mal sucedido da linha em curto.

Na ocorrência de uma falta interna à linha em que estiver colocado o capacitor a sequência descrita anteriormen

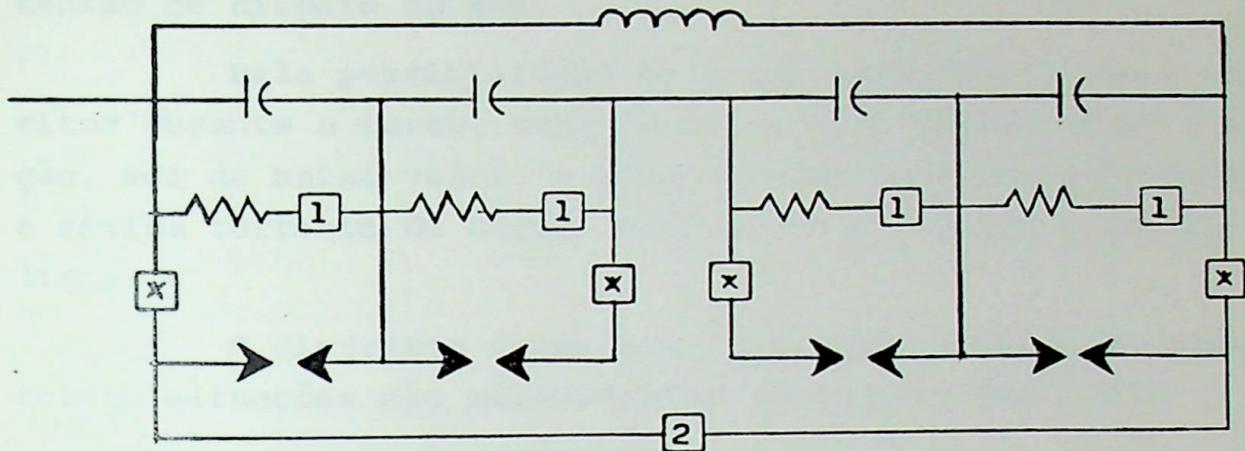
te se sucede até a abertura do disjuntor 3, o qual tendo em vista o alto valor de corrente, permanecerá aberto para permitir a desionização do gap; em caso de religamento mal sucedido o capacitor estará protegido pelo gap 2 e o disjuntor 4 fechará, curto circuitando o capacitor por um tempo compatível com a desionização do gap 2, que por ser do tipo arco mantido é grande para altos valores de corrente.

O resistor em série com o gap 1, que serve para amortecer a sobretensão de reinserção, deve ser dimensionado para evitar o fechamento do gap 2, na reinserção que se seguirá à eliminação de um defeito externo.

É de se notar, que embora esse resistor deva ser o mais baixo possível durante a falta, para não causar a operação do gap 2, ele funciona ainda como um limitador da corrente de curto, e após a eliminação do defeito, ele pode ser projetado para que seja maior do que a reatância do capacitor, a fim de que se perca o mínimo de compensação até a abertura do disjuntor 3, concluindo-se que assim sendo, ele deva ser não linear.

As características de resistor serão obtidas em função de dados do sistema em estudo, incluindo nível de compensação após eliminação do defeito, máximos esforços permitidos no capacitor, máximo tempo de eliminação de defeitos, etc., sendo esse último para determinar a sua capacidade térmica, o que deve ser efetuado para a pior situação possível, isto é, curto máximo próximo ao capacitor supondo-se falha do disjuntor da linha. (20)

b) O arranjo da figura 14, difere dos anteriores pela possibilidade de se utilizar um módulo do banco de capacitores, protegido por diversos gaps, isto devido a menor capacidade desses gaps, e utilizar nesse caso, um único disjuntor de desvio, sendo o gap do tipo auto extingüível, isto é, interrompido por equipamento adicional de sopro de ar.



* CIRCUITO DE AMORTECIMENTO

FIG. 14

Muito embora, devido a características do gap em uso, seja possível varias tentativas de reinserção, isto pode ser um fator prejudicial ao sistema, e em tal caso, um resistor de reinserção é adicionado ao sistema de desvio.

Seu funcionamento em termos de tempo pode ser exemplificado como a seguir:

Na ocorrência de um curto-circuito, tempo 0, ocorre a operação do gap (0,5 ciclo), e o fechamento do disjuntor 1 ocorre antes da condução do gap ser eliminada pelo sopro de ar, o que se dará a partir de 3 ciclos (tempo necessário ao acionamento e formação do sopro de ar) da ocorrência do disparo do gap.

Após a interrupção do arco no gap, o capacitor ficará então em paralelo com o resistor até a abertura do disjuntor 1, por um tempo aproximado de 3 a 6 ciclos, resultando num baixo tempo de reinserção total do capacitor.

Esse resistor também deve ser maior do que a reatância do capacitor para não se perder a total compensação quando estiverem em paralelo, e quando da abertura do disjuntor 1, esse valor deve ser escolhido de tal forma que o valor da tensão de reinserção limitada por ele esteja abaixo da mínima

tensão de disparo do gap.

Pela possibilidade de ficar em paralelo com o capacitor durante o curto, esse resistor deve também nessa situação, ser de baixo valor, e dimensionado para um valor próximo a máxima corrente de curto, supondo-se falha do disjuntor da linha.

O disjuntor 2 tem por finalidade desviar o capacitor em situações não relacionadas a sobretensões. (21)

c) A figura 15, mostra um arranjo que utiliza um gap do tipo arco mantido, por módulo, e difere do funcionamento do anterior por haver fechamento dos disjuntores 1 e 2 imediatamente após a ocorrência do disparo do gap.

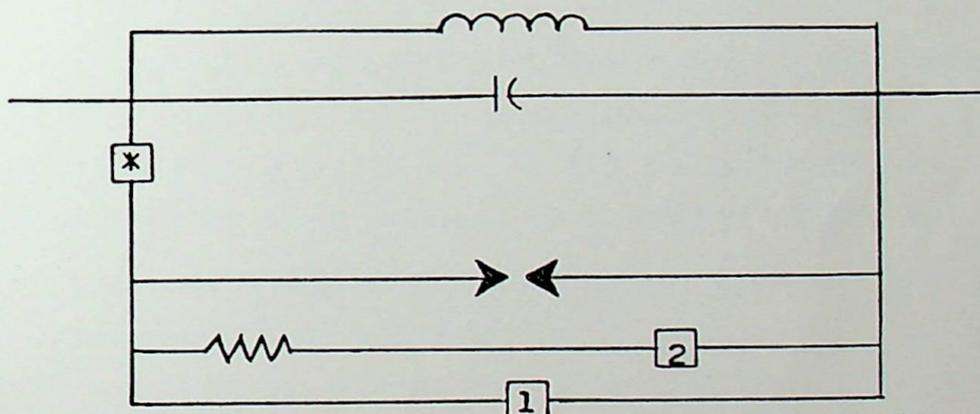


FIG. 15

Com a eliminação da falta num tempo estimado de 3 ciclos, o disjuntor 1 é aberto num tempo compatível com o da desionização do gap, e o resistor fica em paralelo com o capacitor, devendo pois ter as mesmas características da descrição anterior, não necessitando entretanto, de ser dimensionado para suportar altos valores de corrente, já que pelas características do gap, o disjuntor 1 somente abrirá quando o curto for eliminado.

Os arranjos descritos acima, são do tipo que permitem se obter alta velocidade de reinserção do capacitor, após ocorrência da operação do sistema de desvio. Se as condições do sistema permitirem, poderá ser cogitado o uso de arranjos

com tempos maiores de reinserção, o que poderá acarretar menor custo dos bancos de capacitores a serem usados, já que não haveria necessidade de valores tão baixos em tempo para operação dos disjuntores, e o arranjo poderia ser reduzido a um tipo singelo como o da figura 12, onde após o disparo do gap e fechamento do disjuntor, esse deverá abrir somente depois da desionização do gap, e desaparecimento da corrente resultante da oscilação do sistema após ocorrência de defeitos, tomando-se cuidado apenas com a sobretensão de reinserção.

Este trabalho, que descreve os resultados das pesquisas realizadas em referência II de Sibirskaya, é que está apresentado neste Capítulo VI.

VI.1 - DESENVOLVIMENTO DA SIMULAÇÃO

A pesquisa dos valores dos ajustes dos gaps, a ser levada em consideração com a localização dos bancos de capacitores de compensação escolhidos, e de que a taxa de elevação não seja aumentada pela indutância desses bancos.

Como as sobretensões nos capacitores, no nível de serviço, aplicadas nos sistemas de transmissão no Brasil, são consideradas, de no momento de dimensionar os capacitores, o estudo deverá consistir basicamente:

a) Aplicações de faltas no ponto de conexão, com a finalidade de se determinar os níveis de tensão de pico nos capacitores durante a ocorrência de faltas e sobretensões nos sistemas de transmissão.

b) Pesquisas das sobretensões de reinserção resultantes, consistindo de aplicação de falta, nos sistemas, e análise das sobretensões nos capacitores adjacentes ao ponto de falta, em casos reais.

Os valores da corrente I_c analisada em função das necessidades do sistema, a capacidade de absorção de energia de reserva imediata, e a capacidade de reserva de longo prazo, e o valor da tensão de serviço, e a taxa de elevação

C A P Í T U L O - V

A DETERMINAÇÃO DO AJUSTE DO GAP

É objetivo desse Capítulo apresentar como sugestão, um roteiro para a determinação dos valores dos ajustes dos gaps para os bancos de capacitores série num Sistema de Transmissão. A descrição a seguir, baseou-se na interpretação pelo autor deste trabalho, dos resultados das simulações contidas na referência 22 da Bibliografia, e que serão apresentados resumidamente no Capítulo VI.

V.1 - O DESENVOLVIMENTO DA SIMULAÇÃO

A pesquisa dos valores dos ajustes dos gaps, somente deverá ser iniciada com a localização do capacitor e o valor da compensação escolhidos, a fim de que o custo do estudo não seja aumentado pela indefinição desses fatores.

Como as sobretensões nos capacitores, ao nível de desvio, aparecerão com a presença de curto-circuito no Sistema considerado, ou no momento da reinserção dos capacitores, o estudo deverá constar basicamente:

- a) Aplicações de faltas ao longo do circuito, com a finalidade de se pesquisar as regiões em que os capacitores ficarão expostos a maiores sobretensões devido a ocorrência de defeitos.
- b) Pesquisa das sobretensões de reinserção nessas regiões, consistindo de aplicação da falta, sua eliminação, e medição das sobretensões nos capacitores adjacentes ao ponto de falta, ao serem reinseridos.

Os valores da operação b, analisados em função das necessidades do Sistema (estabilidade), e/ou dos equipamentos de desvio (reinsertões rápidas ou lentas), permitirão a escolha do valor mais confiável e econômico para o ajuste do gap.

Será necessário então, como primeiro passo, o estabelecimento de critérios para o procedimento do estudo, e estes critérios se basearão nas piores condições para a ocorrência de sobretensões durante a reinserção dos capacitores.

V.1.1 - A APLICAÇÃO DE FALTAS

Com os critérios de reinserção estabelecidos, o estudo poderá ser iniciado, pesquisando-se inicialmente as regiões do item a da exposição anterior.

A corrente de curto deverá ser maximizada, aplicando-se faltas a cada ponto das ondas de tensão, divididas ou não em intervalos iguais, e além disto, para o caso de curtos trifásicos, aplicando-se a falta em tempos diferentes que acarretem a não simultaneidade da aplicação.

Pelo visto, pode-se concluir que a maximização da corrente de curto é uma simulação complexa, e é de fundamental importância sob o aspecto de tempo e economia, a escolha do aparelho simulador.

O TNA tem sido um simulador mais prático do que o computador digital para a análise descrita, já que com controles acessíveis ao homem, a variação dos pontos na onda de tensão pode ser mais facilmente executada do que no computador digital.

Com o resultado das aplicações de faltas ao longo do Sistema em estudo, estarão assim determinadas as regiões de interesse para a pesquisa das sobretensões de reinserção, que conduzirão à escolha do ajuste do gap dos capacitores.

V.1.2 - A REINSERÇÃO

A simulação de faltas no TNA, tendo em vista o grande número de aplicações a serem efetuadas, é mais vantajosa do que no computador digital sob o aspecto de custo e economia de tempo.

Entretanto para o estudo da reinserção, o computador digital torna-se mais atrativo, pois possibilita a utilização de grande número de chaves representativas dos gaps dos capacitores, e nos casos da necessidade de resultados mais precisos possibilita também, que as fontes de alimentação sejam variáveis durante a sequência: aplicação da falta, sua eliminação e reinserção dos capacitores que se desviaram.

Emboa o computador digital permita que se represente a máquina com todos os seus parâmetros, acarretando uma f.e.m. variável durante o processamento, resultados práticos de estudos de reinserção, têm demonstrado que o ajuste das condições iniciais das tensões nas máquinas, se fixas ou variáveis, acarretam pequenas variações das sobretensões nos capacitores; assim, a não ser pelo número de chaves (em modernos TNA's substituídas por gaps automáticos), o TNA e o computador digital se equivalem, e resultados comparativos podem ser feitos para reinserções decorrentes de aplicações de faltas monofásicas.

Se o Sistema em estudo, exigir a presença dos capacitores imediatamente após a eliminação de um curto-circuito, os testes deverão ser efetuados considerando-se apenas as reinserções rápidas dos capacitores. Caso (entretanto) não exista essa necessidade, as reinserções deverão ser estudadas em tempos rápidos e lentos, a fim de que se possa comparar os resultados das sobretensões de reinserção no início e no pico da corrente de oscilação a 60Hz; essa comparação será de fundamental importância na escolha do valor do ajuste do gap e do tipo do equipamento de desvio.

V.2 - A EXECUÇÃO DOS TESTES

Se decidido o uso de tensões fixas nas simulações, os dados para o ajuste do TNA ou entrada para o computador, deverão ser obtidos em programas de estabilidade, já que esses dados (tensões nas barras e fluxo de potência) estarão traduzindo a situação do sistema nas condições definidas pe-



los critérios adotados para o estudo. Isto significa, que os valores obtidos deverão representar o Sistema nas seguintes condições:

a) Em regime permanente

b) N ciclos após a eliminação de um defeito, em cada trecho do circuito. (N ciclos, significa o tempo escolhido para se medir a sobretensão de reinserção nos capacitores que se desviaram, devido à ocorrência de um defeito em suas adjacências).

A necessidade de se ter os dados de tensão e fluxo de potência em regime permanente, nas condições estabelecidas pelos critérios, significa que com o simulador ajustado com esses valores, poderão ser pesquisadas as regiões em que os capacitores ficarão expostos a maiores sobretensões, pela aplicação de curto-circuitos em suas adjacências.

A necessidade de se ter as tensões nas barras num tempo N após a eliminação de um defeito, é decorrente da decisão de se efetuar os testes de reinserção, considerando-se, para simplicidade e por economia, as f.e.m. dos geradores constantes; isto significa, que com o simulador ajustado para essas condições, os capacitores que se desviarem, devido a ocorrência de um curto em suas adjacências, encontrarão ao serem reinseridos, as tensões nas barras que ocorreriam se se tivessem partido das condições iniciais em regime permanente, isto é, se a fonte fosse variável durante a aplicação e eliminação do defeito. Devido a essa representação, os valores de sobretensão de reinserção obtidos não serão muito precisos, já que a tensão no instante do curto não é a mesma N ciclos após a sua eliminação, porém resultados práticos têm demonstrado que essa imprecisão é desprezível.

EXEMPLO: Adotando-se como critério, que os capacitores devam reinserir N ciclos após a eliminação de um curto-circuito monofásico, com uma linha fora de serviço, os valores de ajuste do simulador para o sistema abaixo, serão obtidos da seguinte maneira:

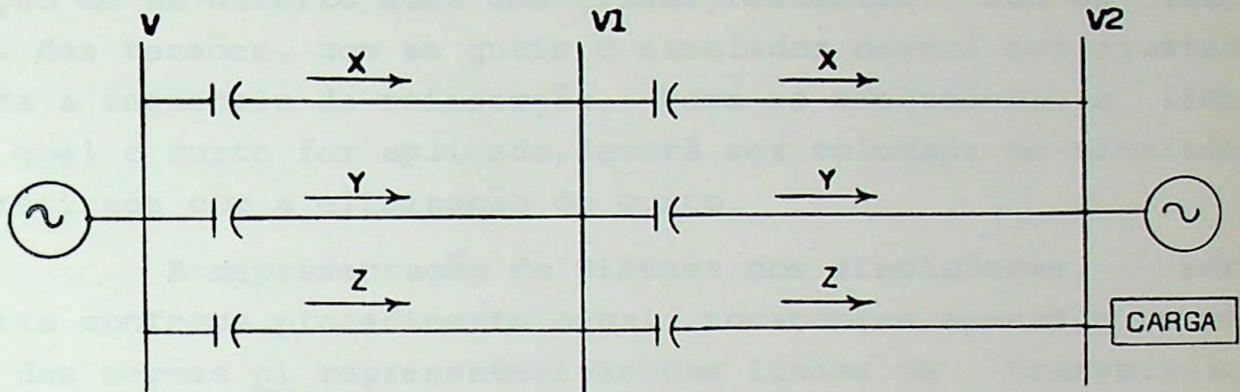
a) SISTEMA EM ESTUDO

FIG. 16-A

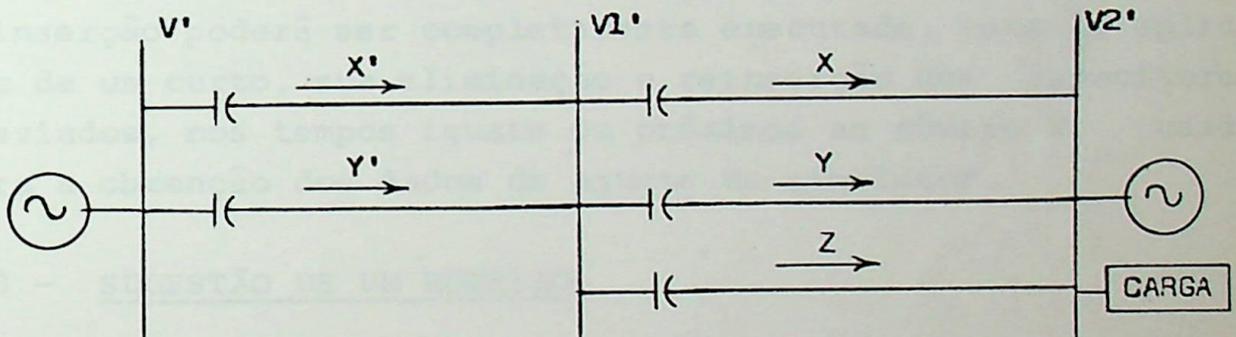
b) FLUXO DE CARGA EM REGIME PERMANENTE

FIG. 16-B

v' , v_1' e v_2' (tensões nas barras obtidas sem uma linha, em regime permanente), são os valores das tensões, com os quais o simulador deverá ser ajustado para aplicação de faltas.

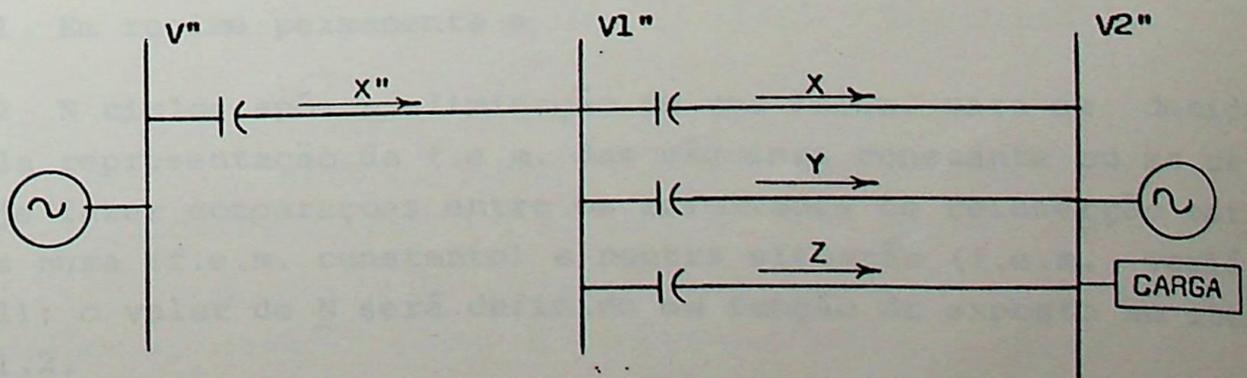
c) FLUXO DE CARGA, N CICLOS APÓS UM DEFEITO NUMA DAS LINHAS RESTANTES

FIG. 16-C

v'' , v_1'' e v_2'' (tensões nas barras obtidas N ciclos após a eliminação de um defeito numa das linhas restantes), são os valores das tensões, com as quais o simulador deverá ser ajustado para a sequência da reinserção. Para se executá-la, a linha na qual o curto for aplicado, deverá ser colocada no simulador e retirada com a eliminação do curto.

A representação do Sistema nos simuladores, será feita conforme procedimento usual, tomando-se apenas o cuidado das seções π representativas das linhas de transmissão, poderem responder também a valores inferiores à frequência fundamental, devido às componentes subsíncronas que estarão presentes.

Com o ajuste do simulador efetuado, a sequência da reinserção poderá ser completamente executada, isto é, aplicação de um curto, sua eliminação e reinserção dos capacitores desviados, nos tempos iguais ou próximos ao número N, usado para a obtenção dos dados de ajuste do simulador.

V.3 - SUGESTÃO DE UM ROTEIRO

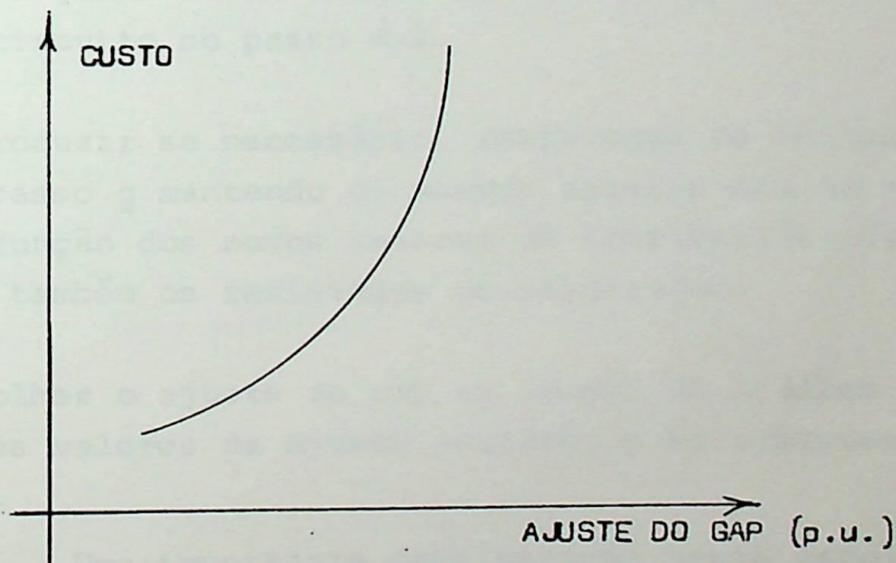
- a) Definir o valor da compensação e a localização dos capacitores.
- b) Definir os critérios de reinserção.
- c) Obter as tensões nas barras e fluxos de carga, nas condições definidas pelos critérios de reinserção adotados, nas seguintes situações:
 - c.1 Em regime permanente e
 - c.2 N ciclos após a eliminação de uma falta, caso se decida pela representação da f.e.m. das máquinas constante ou se deseje fazer comparações entre os resultados de reinserção obtidos numa (f.e.m. constante) e noutra situação (f.e.m. variável); o valor de N será definido em função do exposto no item V.1.2.

d) Ajustar o simulador com valores do passo c.1 e em ambos os casos abaixo, maximizar o valor da corrente de curto-circuito:

d.1 Efetuando as aplicações de faltas nas barras do circuito.

d.2 Efetuando as aplicações de faltas nas linhas após os seus capacitores, considerando-os desviados por um ajuste fictício do gap estimado em função dos resultados do item d.1. Os capacitores das linhas adjacentes não deverão ser desviados.

e) Analisar os resultados obtidos no item d, e com o auxílio da curva abaixo (custo do banco de capacitores) x (ajuste do gap em pu da tensão nominal), escolher as áreas em que as simulações de reinserção se façam necessárias.



f) Ajustar o simulador com os valores do passo c.1 se houver possibilidade de variação das f.e.m., ou com os valores do passo c.2, caso não haja ou não se deseje essa variação.

g) Nas regiões selecionadas no passo e, aplicar a sequência da reinserção, isto é, curto-circuito, desvio dos capacitores, eliminação do curto e reinserção dos capacitores.

Dependendo da potência dos bancos de capacitores, poderá ser necessária a sua divisão em módulos, e nesse caso, a simulação deverá ser efetuada, com pelo menos um dos bancos do

circuito dividido em pelo menos dois módulos, a fim de que se possa medir o acréscimo da sobretensão de reinserção, devido à não simultaneidade na reinserção dos módulos.

Neste passo, deverão ser pesquisadas as maiores sobretensões de reinserção nos capacitores adjacentes à linha com defeito, através da variação do tempo de eliminação da falta e do tempo de reinserção dos bancos e dos módulos.

O curto-circuito deverá ser aplicado no ponto(s) da (s) onda(s) de tensão, que originaram os maiores valores de corrente no passo d.

Os valores dos ajustes dos gaps usados nas simulações, deverão ser estimados em função da análise do passo e e com os quais foram feitos as mazimizações da corrente de curto-circuito no passo d.2.

h) Introduzir se necessário, resistores de reinserção e repetir o passo g mantendo os mesmos ajustes dos gaps ou variando os em função dos novos valores de sobretensões de reinserção. Variar também os resistores de reinserção.

i) Escolher o ajuste do gap em função da análise comparativa, entre os valores de ajuste estimado e as sobretensões de reinserção.

Uma importante consideração nesta escolha, será o estabelecimento de uma margem segura entre máxima tensão de reinserção considerada e a tensão de restabelecimento do gap, devido a sua ionização.

Conhecendo o grau de desionização (que depende do valor da corrente e do tempo de condução do gap) em termos da tensão de disparo antes da falta, será possível então a determinação da mínima tensão de disparo, e em consequência, pela adição a esta da margem de precisão de atuação do gap será obtida a máxima tensão de disparo, que é o fator determinante para o custo do banco de capacitores.

C A P Í T U L O - V I

EXEMPLO PRÁTICO

Este Capítulo, objetiva descrever os testes que foram efetuados para a determinação do ajuste do gap dos capacitores, planejados para instalação nas linhas de transmissão do Sistema de Itaipú, e que foram executados em caráter preliminar.

VI.1 - O SISTEMA SIMULADO

O Sistema de Transmissão de Itaipú foi inicialmente projetado para transportar 11.400 MW provenientes de Itaipú e Ilha Grande e 2.500 MW do Sistema da Eletrosul, até Jundiá e Tijuco Preto (fig. 17) em cinco circuitos de 765 kV, os quais foram compensados em 40% do valor de suas reatâncias indutivas, com bancos de capacitores localizados nos terminais das linhas, em decorrência da seguinte exposição:

VI.1.1 - A PORCENTAGEM DA COMPENSAÇÃO SÉRIE

Os estudos para a determinação do valor da compensação, indicaram que uma porcentagem média de 40% conduziriam a um melhor desempenho na estabilidade do Sistema, além de se constituir no valor mais econômico; existem pequenas variações na porcentagem de compensação nos trechos da figura 17, que resultaram da necessidade de minimização das perdas.

Os estudos de investigação de ressonância subsíncrona, demonstraram não haver evidência deste fenômeno até um nível de 60% de compensação série.

VI.1.2 - A LOCALIZAÇÃO DOS BANCOS DE CAPACITORES

Os resultados dos estudos de estabilidade, fluxo de

carga, curto-circuito, ressonância subsíncrona e sobretensões fase-terra causados por rejeição de carga ou ocorrência de curto-circuito, não foram afetados pela localização do capacitor, isto é, para esses estudos foi indiferente considerar-se o capacitor no meio ou nos terminais da linha.

Esperava-se, contudo, que-sendo o nível de curto-circuito nos terminais, maior do que no meio da linha, a capacidade dos equipamentos de desvio, constituíssem o principal obstáculo à localização dos capacitores nos terminais das linhas, já que-por razões de segurança (vandalismo) e por não se desejar controle remoto, objetivava-se evitar a localização dos bancos no meio dos trechos de linha.

Entretanto os estudos de curto-circuito, indicaram que, a exceção do terminal de Itaipú, o maior valor de corrente simétrica no equipamento de desvio de um banco de capacitores, localizado nos terminais dos trechos de linha, seria de 28 KA para ocorrência de faltas após a saída da linha, e a um custo pouco superior ao que seria, se os bancos de capacitores fossem localizados no meio da linha, foi possível dispor-se de arranjos de desvio como os das figuras 13, 14 e 15, que suportassem e até ultrapassassem esse nível de corrente.

Tendo-se decidido pela localização dos capacitores nos terminais das linhas, foram consideradas varias alternativas para sua distribuição, tendo sido selecionada a figura 17 com as seguintes características para os capacitores, resultantes da situação do Sistema com uma linha fora de serviço:

SEÇÃO	REATÂNCIA (ohms)	CORRENTE nominal (A)	POTÊNCIA (MVAR)	TENSÃO NOMINAL (KV pico) *
Itaipú - Ivaiporã	41,63	2.380	707	140,1
Ivaiporã - Itaberã (em cada barra)	17,86	2.655	378	67,1
Itaberã - Tijuco Preto	42,03	2.600	852	154,5
Itaberã - Jundiá	33,97	3.350	1.144	160,9

* Essas tensões correspondem aquelas entre os bornes dos capacitores.

VI.2 - ESTUDOS EFETUADOS E CRITÉRIOS ADOTADOS

Em concordância com o exposto no Capítulo V, o estudo foi dividido em três partes principais:

- 1) Obtenção dos valores de ajuste dos simuladores.
- 2) Investigação das sobretensões nos capacitores devido a aplicação de faltas trifásicas e monofásicas ao longo do Sistema.
- 3) Investigação das sobretensões de reinserção nos capacitores devido a faltas em linhas adjacentes.

Os critérios do estudo, relacionados abaixo, foram julgados como sendo as piores situações para o Sistema se recuperar, tendo os estudos anteriores, demonstrado não haver necessidade de reinserção rápida por questões de estabilidade

- a) Os capacitores devem ser capazes de reinserir em qualquer trecho do Sistema, num tempo aproximado de 6 ciclos após a eliminação de um curto monofásico, com uma linha fora de serviço, antes da falta (reinserção rápida).
- b) Idêntico ao critério a, porém num tempo aproximado de 250 ms (reinserção lenta).
- c) Idêntico ao critério a, porém sendo a eliminação do curto após faltas trifásicas, e com todas as linhas em serviço antes da ocorrência do curto.

VI.3 - AJUSTE DO SIMULADOR

Com a utilização de programas de computador digital, foram obtidos os fluxos nas seguintes condições, (os quais) foram utilizados para os ajustes dos simuladores:

a) Sistema em regime permanente, com todas as linhas em serviço. (figura 18).

b) Sistema em regime permanente, com uma linha fora de serviço. Foram obtidos os fluxos nos varios trechos do circuito para essa contingência, e a figura 19 apresentada como exemplo, mostra os resultados para uma linha fora, no trecho Itaipú-Ivaiporã.

c) Sistema se recuperando após 6 ciclos da eliminação de um curto-circuito, com os capacitores no circuito, com (curto 1Ø) e sem (curto 3Ø) uma linha fora de serviço, antes da ocorrência da falta. Foram obtidos os fluxos para os diversos trechos do circuito e a figura 20 apresenta os resultados obtidos para a contingência de uma linha fora no trecho Itaipú-Ivaiporã.

d) Análogos resultados foram obtidos, para o Sistema se recuperando após cerca de 250 ms da eliminação de um defeito, com uma linha fora antes da falta, a fim de se pudesse analisar o efeito da reinserção lenta.

VI.4 - INVESTIGAÇÃO DO VALOR DAS SOBRETENSÕES NOS CAPACITORES PELA APLICAÇÃO DE FALTAS

Em decorrência do exposto no Capítulo V, a simulação desta parte do estudo foi realizada em TNA, porém por fugir ao objetivo do presente trabalho, não serão apresentados detalhes de sua montagem, ressaltando-se apenas o fato de que as seções pi representativas das linhas, foram selecionadas para a obtenção de respostas adequadas à faixa de frequências de 20 a 200 Hz, já que as tensões através dos capacitores, dependem das correntes a 60 Hz e à frequência subsíncrona. Os ajustes do TNA foram feitos com os dados dos itens a e b da seção VI.3.

As simulações abaixo descritas tiveram como finalidade, visualizar em que pontos do Sistema se deveria pesqui-

sar os valores de sobretensão na reinserção dos capacitores.

Os principais resultados das sobretensões, em valores por unidade da tensão nominal, lidos com a ajuda da figura 17, foram:

a) Linha L 4 fora.

a.1 Curto 1Ø na barra 3.

Tensões máximas em: $16 - 17 = 2,92$ pu
 $20 - 21 = 3,20$ pu.

a.2 Curto 3Ø na barra 3.

Tensões máximas em: $16 - 17 = 4,00$ pu.

b) Todas as linhas em operação e curto 3Ø na barra 3.

Tensões máximas em: $16 - 17 = 3,70$ pu
 $16 - 17 = 4,20$ pu (não simultâneo).

c) Linha L 6 fora de operação e curto 1Ø na barra 3.

Tensão máxima em: $16 - 17 = 3,0$ pu.

Somente foram relacionados acima, os casos em que as tensões nos capacitores, foram iguais ou maiores do que 3 pu do valor nominal; isto quer dizer, que nos capacitores localizados na barra 3 (trecho Ivaiporã-Itaberã) e na barra 4, em nenhuma situação isto aconteceu.

Como o pior caso para os outros capacitores, será aquele em que acontecer uma falta na saída de linha após um capacitor, efetuou-se nesses pontos aplicação de curto, adotando-se um ajuste de gap fictício para o da linha em falta, com o intuito de se maximizar as tensões nos capacitores adjacentes; esse ajuste foi variável compativelmente com os valores encontrados na aplicação de curtos nas barras.

d) Linha L 4 fora de operação.

d.1 Curto 1Ø em 18, ajuste de 2,5 pu para 18 - 19.

Tensões máximas em: $16 - 17 = 3,43$ pu
 $20 - 21 = 3,28$ pu.



d.2 Curto 1Ø em 18, ajuste de 3 pu para 18 - 19.

Tensões máximas em: 16 - 17 = 3,74 pu

20 - 21 = 3,53 pu.

As tensões máximas no caso d.2, foram achadas variando-se o ponto de aplicação da falta na onda de tensão em 18, obtendo-se valores a 0º, 20º, 100º etc, sendo as máximas obtidas a 60º, demonstrando assim que as máximas tensões nos capacitores das linhas adjacentes ocorrem probabilisticamente.

d.3 Curto 1Ø em 18, ajuste de 4 pu para 18 - 19.

Tensões máximas em: 16 - 17 = 4,20 pu

18 - 19 = 3,93 pu

20 - 21 = 3,78 pu.

Observe-se que nesta situação, a tensão não atinge o valor de disparo em 18 - 19.

d.4 Curto 1Ø em 35, ajuste de 3 pu para 34 - 35.

Tensões máximas em: 16 - 17 = 2,88 pu

20 - 21 = 3,05 pu.

e) Linha L 6 fora de operação.

Curto 1Ø em 18, ajuste de 3 pu para 18 - 19.

Tensões máximas em : 16 - 17 = 3,64 pu

20 - 21 = 3,12 pu.

f) Todas as linhas em operação.

Curto 3Ø em 18, ajuste de 3 pu para 18 - 19.

Tensão máxima em 16 - 17 = 4,5 pu.

Dos testes acima efetuados, somados àqueles que não foram descritos, por se tornar demasiadamente extenso, foi possível concluir-se que:

1) As sobretensões nos capacitores das linhas sem falta foram sensíveis ao ponto de aplicação da falta na(s) onda(s) de tensão.

2) As mais altas sobretensões, devido a aplicação de faltas, ^{devidas} o correram nos capacitores localizados na barra 3 (trecho Itaipu-Ivaiporã), e foram produzidas por faltas perto a esse barramento. ^{desse}

3) Para os diversos testes efetuados, os capacitores localizados na barra 4 (Itaberã) e na barra 3 (trecho Ivaiporã-Itaberã) não ficaram sujeitos a sobretensões maiores do que 2,83pu (curto trifásico na barra 4, tensão máxima em 26 - 27), mesmo maximizando-se a aplicação da falta.

4) O aumento do ajuste do gap conduziu a maiores sobretensões nos capacitores das linhas sem falta.

5) O circuito de amortecimento (R, L) como visto no Capítulo IV, não teve praticamente nenhum efeito nas sobretensões resultantes nos capacitores.

VI.5 - INVESTIGAÇÃO DOS VALORES DAS SOBRETENSÕES DE REINserÇÃO

Os testes efetuados tiveram a finalidade de investigar as sobretensões resultantes das reinserções rápidas e lentas dos capacitores em linhas adjacentes a uma linha em curto circuito, ^{obtidos na} a fim de que se pudesse obter um valor de ajuste otimizado, com relação à economia e probabilidade de reinserção bem sucedida.

VI.5.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

As simulações foram efetuadas seguindo os critérios estabelecidos no item VI.2 e a metodologia apresentada no Capítulo V.

Com os dados para o ajuste do simulador, listados no item VI.3, houve flexibilidade para se efetuar os testes variando-se ou mantendo-se constante as f.e.m. dos geradores, porém essa comparação somente pode ser efetuada no computador digital, já que o TNA não permitia a variação da fonte.

Posteriormente, entretanto, constatou-se que a variação das f.e.m. das máquinas, acarretava apenas uma pequena variação nas sobretensões de reinserção, em comparação com aquelas obtidas com as f.e.m. constantes, e por questão de economia, quase todos os casos foram computados nestas condições, processados entretanto no computador digital, em consequência da limitação do número de chaves (representação dos gaps) no TNA.

Para efeito de comparação (entretanto, vários casos de reinserção após faltas monofásicas, foram efetuados no TNA, os quais comparados com os resultados do computador digital, *eles* permitiram concluir, que a diferença dos valores obtidos não é significativa para efeito da escolha do ajuste do gap; não se pode no entanto afirmar qual dos dois simuladores apresentou resultados mais confiáveis, já que não foram comparados com um terceiro resultado de simulação.

VI.5.2 - AS VARIÁVEIS DA SIMULAÇÃO E OS ARRANJOS DE DESVIO

O tempo de eliminação do defeito, foi variável na faixa de 3 a 4,5 ciclos.

A variação dos tempos de reinserção, *esta mostrada* estão mostrados na listagem dos resultados.

Os equipamentos de desvio representados foram os das figuras 13, 14 e 15.

Os valores usados para o circuito de amortecimento foram:

$L = 800 \text{ uH}$ e $R = 6 \text{ ohm}$, para $X_c \cong 40 \text{ ohm}$.

Entretanto a representação do esquema da figura 13, foi feita seguindo recomendação de seu fabricante em função dos dados do Sistema; os ajustes dos gaps e o resistor foram representados pelos valores sugeridos (gap 1 = 2,2 pu/gap 2 = 2,6 pu) a fim de que se pudesse verificar sua adequacidade, muito embora a maximização da corrente nas aplicações de faltas, não tenha sido efetuada para esse valor de ajuste do gap.

Com o critério adotado de uma linha fora, alguns pontos representativos da curva do resistor usado nas simulações no banco de 41,63 ohm, são listados abaixo:

TENSÃO (V)	CORRENTE (A)
5600	2,8
56000	140
148000	1120
220000	2800
296000	5600
408000	11200
680000	39200

Nas faltas internas foi considerada a operação do gap 2, por traduzir a pior condição.

As representações dos esquemas das figuras 14 e 15, foram variáveis com relação ao resistor, no intuito de se pesquisar os valores mais adequados para a limitação das sobretenções de reinserção.

Para o arranjo da figura 14 o resistor, por ser não linear, obedeceu a relação:

$$V = KI^{0,54}$$

dado fornecido pelo fabricante, e para o arranjo da figura 15 e representação foilinear.

VI.5.3 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Serão apresentados a seguir alguns casos dos resultados obtidos, que lidos com a ajuda da figura 17, poderão expressar resumidamente a simulação executada.

A) Testes na Barra 3 sem Resistores de Reinserção

A.1 Linha L4 fora de operação, curto lØ em 18.

A.1.1 Curto eliminado em 3,12 ciclos e os gaps dos capacitores ajustados em 3 pu do valor nominal.

Tensões máximas de reinserção em 5 ciclos, de:

$$16 - 17 = 2,43 \text{ pu}$$

$$20 - 21 = 2,43 \text{ pu}$$

A.1.2 Curto eliminado em 3,3 ciclos e ajuste dos gaps em 3,5 pu.

Tensões máximas de reinserção em 5 ciclos, de:

$$16 - 17 = 2,53 \text{ pu}$$

$$20 - 21 = 2,33 \text{ pu}$$

A.1.3 Curto eliminado em 3 ciclos e ajuste dos gaps dos capacitores em 3 pu; banco 16 - 17 dividido em dois módulos iguais.

(Leia-se: capacitor, tempo de reinserção e tensão de reinserção em pu do valor nominal).

16 - 166	3	3,28	fig. 21-1
177 - 17	3	3,28	fig. 21-2
20 - 21	3	2,78	fig. 21-3
16 - 166	5	3,13	fig. 22-1
177 - 17	5	3,13	fig. 22-2
20 - 21	5	2,46	fig. 22-3

A.1.4 Nesses casos, os disjuntores da linha L2, eliminaram o curto em tempos diferentes, isto é, o na barra 1 abriu em 3,5 ciclos e o na barra 3 em 3 ciclos. A divisão dos capacitores 16 - 17 foi feita na proporção de 7:1, isto é, o banco apesar de manobrado na simulação apenas por duas chaves, teve a parte 16 - 166 representada em 7 módulos e a 177 - 17 como um módulo; isto foi feito para se observar o efeito de vários capacitores já em operação, no último a ser reinserido e vice versa.

16 - 166	3	2,92	fig. 23-1
177 - 17	3,5	4,67	fig. 23-2
20 - 21	3	2,77	fig. 23-3

16 - 166	3	3,49	fig. 24-1
177 - 17	4	5,06	fig. 24-2
20 - 21	3,5	2,13	fig. 24-3
16 - 166	4	2,64	fig. 25-1
177 - 17	3	5,11	fig. 25-2
20 - 21	3	2,48	fig. 25-3



A.1.5 Curto eliminado como no caso anterior, porém nesses casos a reinserção foi retardada, para se saber a influência da corrente de oscilação do Sistema após eliminação do defeito; foi utilizado um ajuste de 1,7 pu para os gaps, a fim de garantir a ocorrência da reinserção, e os bancos foram divididos em dois módulos iguais.

16 - 166	15	3,80	fig. 26-1
177 - 17	15,5	3,80	fig. 26-2
20 - 21	15	2,98	fig. 26-3
16 - 166	15	4,07	fig. 27-1
177 - 17	15,5	4,07	fig. 27-2
20 - 21	16	2,47	fig. 27-3
16 - 166	15,5	3,54	fig. 28-1
177 - 17	16	3,55	fig. 28-2
20 - 21	15	3,20	fig. 28-3

A.2 Todas as linhas em operação, um banco de capacitores divididos em dois módulos iguais, curto 3Ø em 18 eliminado em 3 ciclos, e ajuste dos gaps dos capacitores em 3 pu.

16 - 166	3	2,46	fase 2
177 - 17	3,5	3,65	fase 1
20 - 21	3,5	2,85	fase 1

B) TESTES NA BARRA 3 COM RESISTORES DE REINSERÇÃO

Nos testes anteriores, foi observado que as variações do tempo de eliminação do defeito e do ajuste do gap (em

torno de 3 pu da tensão nominal) acarretaram pequenas variações nas sobretensões de reinserção. Quando da introdução dos resistores de reinserção, cujos resultados dos testes serão apresentados a seguir, foi adotado por simplicidade o tempo de eliminação do defeito igual a 3 ciclos, e o valor do ajuste do gap igual a 3 pu da tensão nominal, a não ser para simulações com o arranjo da figura 13.

B.1 Linha L4 fora da operação, curto lØ em 18 eliminado em 3 ciclos.

B.1.1 Representação do arranjo da figura 15, com $R = 3Xc$.

16 - 166	3	2,40	fig. 29-1
177 - 17	3,5	2,18	fig. 29-2
20 - 21	4	1,81	fig. 29-3

B.1.2 Representação do arranjo da figura 13, resistor com características descritas no item VI.5.2.

16 - 166	3	1,81	fig. 30-1
177 - 17	3,5	2,17	fig. 30-2
20 - 21	4	1,58	fig. 30-3

B.1.3 Representação do arranjo da figura 14, $R = 3Xc$ a 90% da tensão de disparo, com os módulos divididos em condições idênticas ao item A.1.4.

16 - 166	3	2,45	fig. 31-1
177 - 17	3,5	2,92	fig. 31-2
20 - 21	3,5	1,78	fig. 31-3

Repetição do caso acima, com $R = 3Xc$ a 70% da tensão de disparo.

16 - 166	3	2,29	
177 - 17	3,5	2,30	
20 - 21	3,5	2,07	

B.1.4 Representação do arranjo da figura 15, porém com equipamentos para reinserção a baixa velocidade, em condições i-

dênticas ao caso A.1.5.

Simulando com $R = 3X_c$:

16 - 166	15	2,84	fig. 32-1
177 - 17	15,5	3,03	fig. 32-2
20 - 21	16	2,17	fig. 32-3

Simulando com $R = 5X_c$:

16 - 166	15	2,67
177 - 17	15,5	2,9
20 - 21	16	2.16

B.2 Todas as linhas em operação, um banco de capacitores dividido em 2 módulos iguais, curto 3Ø em 18 eliminado em 3 ciclos.

B.2.1 Representação do arranjo da figura 13 em condições idênticas ao do item B.1.2.

16 - 166	3	1,71	fase 1 e 2	fig. 33A
177 - 17	4	1,98	fase 2	fig. 33B
20 - 21	4	1,43	fase 2	fig. 33C
22 - 23	4	1,43	fase 2	fig. 33C

B.2.2 Representação do arranjo da figura 15 com $R = 3X_c$.

16 - 166	3	1,97	fase 2
177 - 17	4	2,18	fase 1
20 - 21	3,5	1,86	fase 1

VI.5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Pelos testes efetuados constatou-se que:

1) A introdução do circuito de amortecimento, aberturas não simultâneas dos disjuntores em ambos terminais de uma linha em curto, tempo de eliminação do defeito e abertura sequencial dos pólos dos disjuntores, não tiveram efeito significativo nas sobretensões de reinserção.

2) Foram necessários resistores lineares ou não lineares, para limitar as sobretensões de reinserção a aceitáveis níveis, nas reinserções sequenciais dos módulos; esses resistores de mostraram ser de imperativa necessidade, principalmente quando se simulou a reinserção com o arranjo da figura 14.

2.1 Quando usado o equipamento da figura 15, o valor do resistor igual ao triplo da reatância do capacitor, demonstrou ser efetivo para a redução das sobretensões, enquanto que, no uso do arranjo da figura 14, o valor do resistor, determinado a partir da equação citada no item VI.5.2, para 70% da tensão de disparo do gap, foi o mais indicado.

3) A reinserção a baixa velocidade, conduziu à obtenção de maiores valores de sobretensão do que a reinserção rápida, e quanto maior a defasagem em tempos de reinserção dos módulos, maiores foram as sobretensões obtidas.

VI.5.5 ESCOLHA DO AJUSTE DO GAP

A) Trecho Itaipú-Ivaiporã

Tendo em vista os resultados obtidos, conclui-se que:

A.1 Adotando-se o arranjo da figura 13, os ajustes de 2.2 pu e 2.6 pu para os gaps 1 e 2, com a utilização do resistor des crito no item VI.5.2, demonstraram ser satisfatórios.

A.2 Empregando-se o arranjo da figura 14 ou da figura 15, con cluiu-se que uma tensão mínima de disparo de 3 pu, seria sufi ciente, usando-se resistores não lineares ou lineares respec tivamente; os não lineares sendo determinados a 70% da ten são de disparo do gap, e tendo nessa tensão o triplo da rea tância capacitiva, valor este, idêntico para o resistor li near da figura 15.

A.3 A reinserção a baixa velocidade, se adotada, conduziria a escolha da tensão mínima de disparo igual a 3,5 pu, e em consequência ao encarecimento aparente do capacitor, minimizado entretanto, pelo uso de equipamentos convencionais no sistema de desvio; optou-se porém, pelo arranjo que possibilite rápida reinserção.

B) Trechos:

Ivaiporã - Itaberã	- Capacitores nas barras 3 e 4
Itaberã - Tijuco Preto	- Capacitores na barra 4
Itaberã - Jundiá	- Capacitores na barra 4

Nesses trechos, tendo em vista os baixos valores de sobretensão através dos capacitores, obtidos por ocasião dos testes de aplicação de faltas, poder-se-ia pensar em adotar arranjos de desvio de rápida reinserção (figuras 14 e 15), considerando-se um ajuste do gap de menor valor do que para o trecho Itaipú-Ivaiporã, porém devido ao fato desse tipo de equipamento, ser de maior custo, e do ajuste do gap para valores inferiores a 3 pu da tensão nominal, não conduzir a reduções significativas no custo dos bancos de capacitores, foi recomendado a utilização de arranjos simples de desvio com tensão mínima de disparo igual a 3 pu.

Puderam então ser recomendados:

1) Para o trecho do item A

Equipamentos de rápida reinserção, com tensão máxima de disparo igual a 2,8 pu da tensão nominal se usado o arranjo da figura 13, ou 3,3 pu se escolhido um dos esquemas das figuras 14 ou 15.

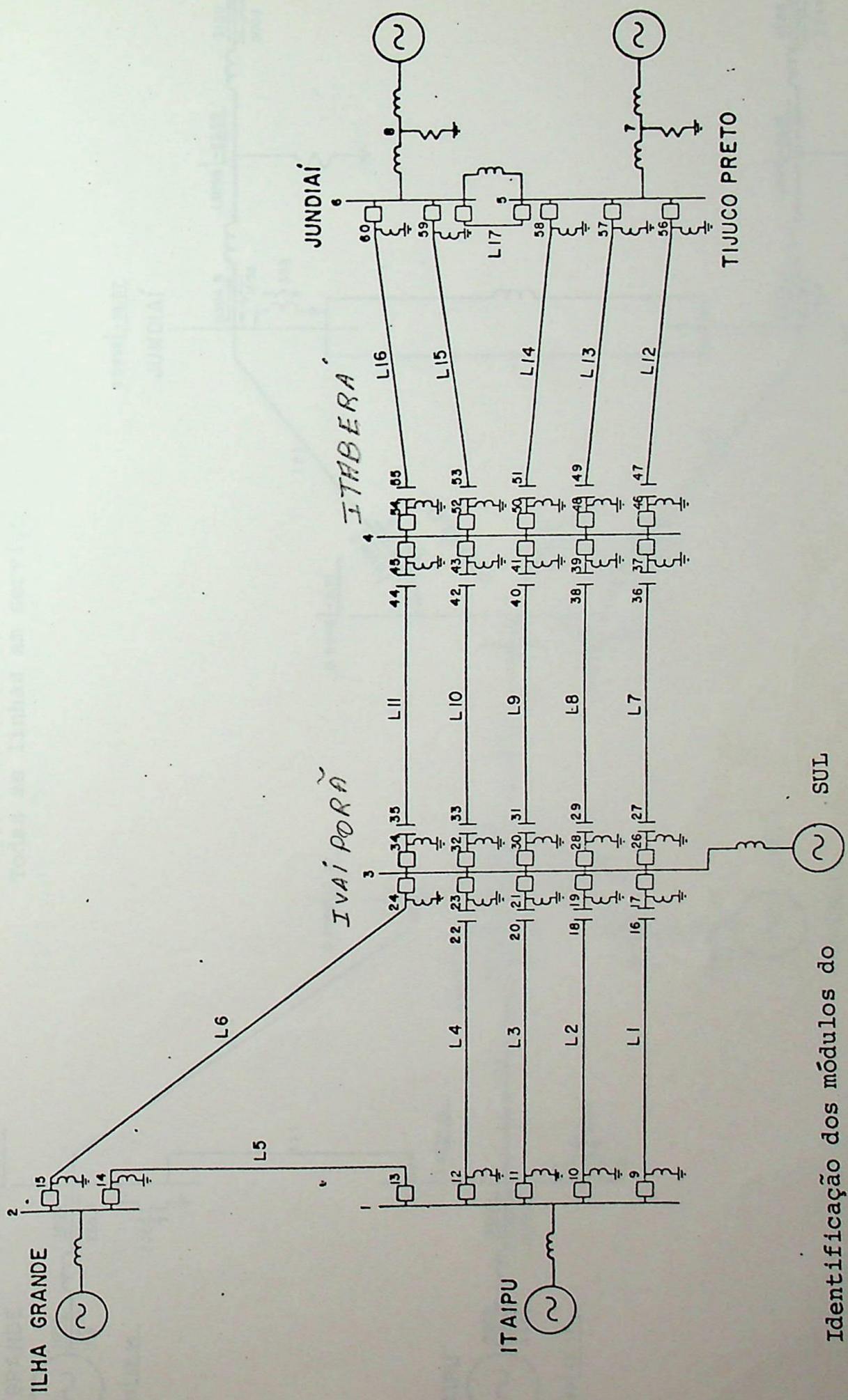
2) Para os trechos do item B

Equipamento de reinserção lenta do tipo da figura 12 com tensão máxima de disparo igual a 3,3 pu.

VI.5.6 - COMENTÁRIOS FINAIS

É importante ressaltar, que por ocasião da inserção dos bancos de capacitores no Sistema, como por exemplo após a sua manutenção ou por operação para controle de reativos, pode acontecer o desvio dos capacitores devido a não simultaneidade da inserção dos módulos. Entretanto as conseqüentes sobretensões, poderão ser diminuídas por um imposto defasamento em tempos de inserção ou pela utilização de um resistor no momento da inserção.

A experiência adquirida no decorrer do estudo, demonstrou que a operação dos gaps dos capacitores é probabilística, pois o desvio ocorrerá em função da configuração do sistema, localização do defeito na linha e ponto de ocorrência na onda de tensão.



Identificação dos módulos do banco de capacitores
 16 17 16 166 177 17

FIG. 17

FLUXO DE CARGA

Todas as linhas em serviço

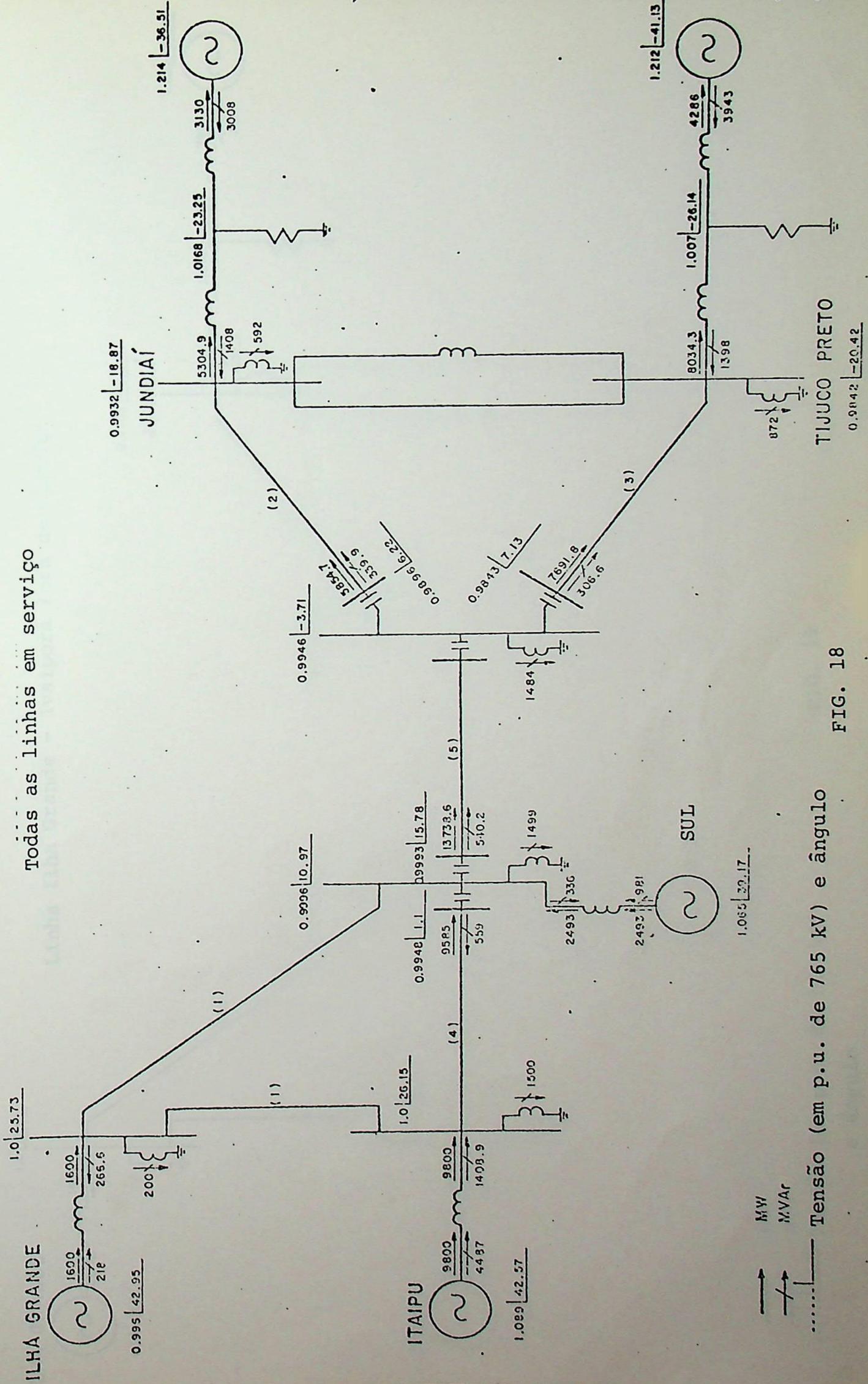


FIG. 18

Tensão (em p.u. de 765 kV) e ângulo

MW
MVAR

FLUXO DE CARGA

Linha Ilha Grande - Ivaiporã fora de serviço

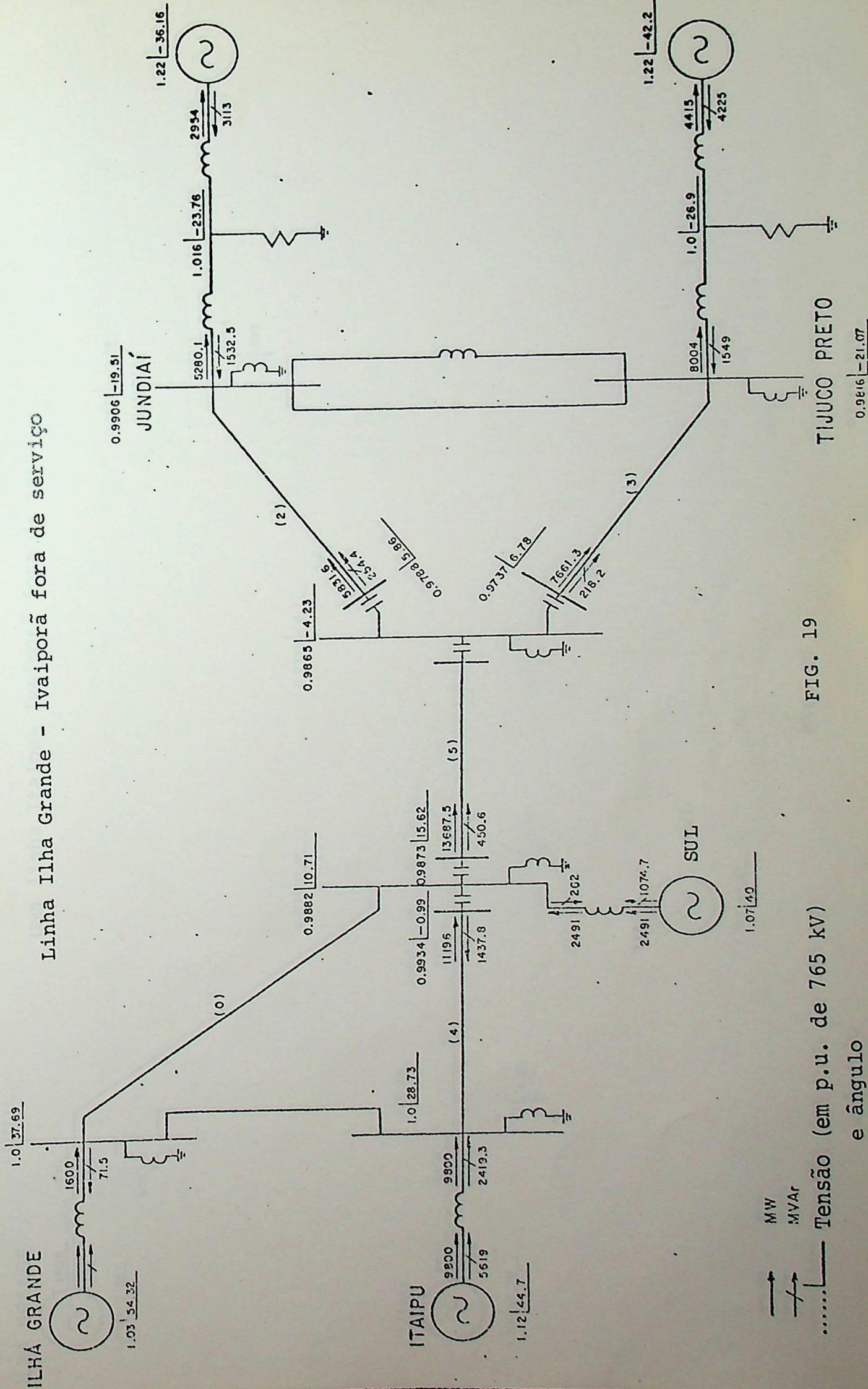


FIG. 19

Tensão (em p.u. de 765 kV) e ângulo

MW
MVAR

.....

FLUXO DE CARGA

Uma linha Itaipu- Ivaiporã fora de serviço.

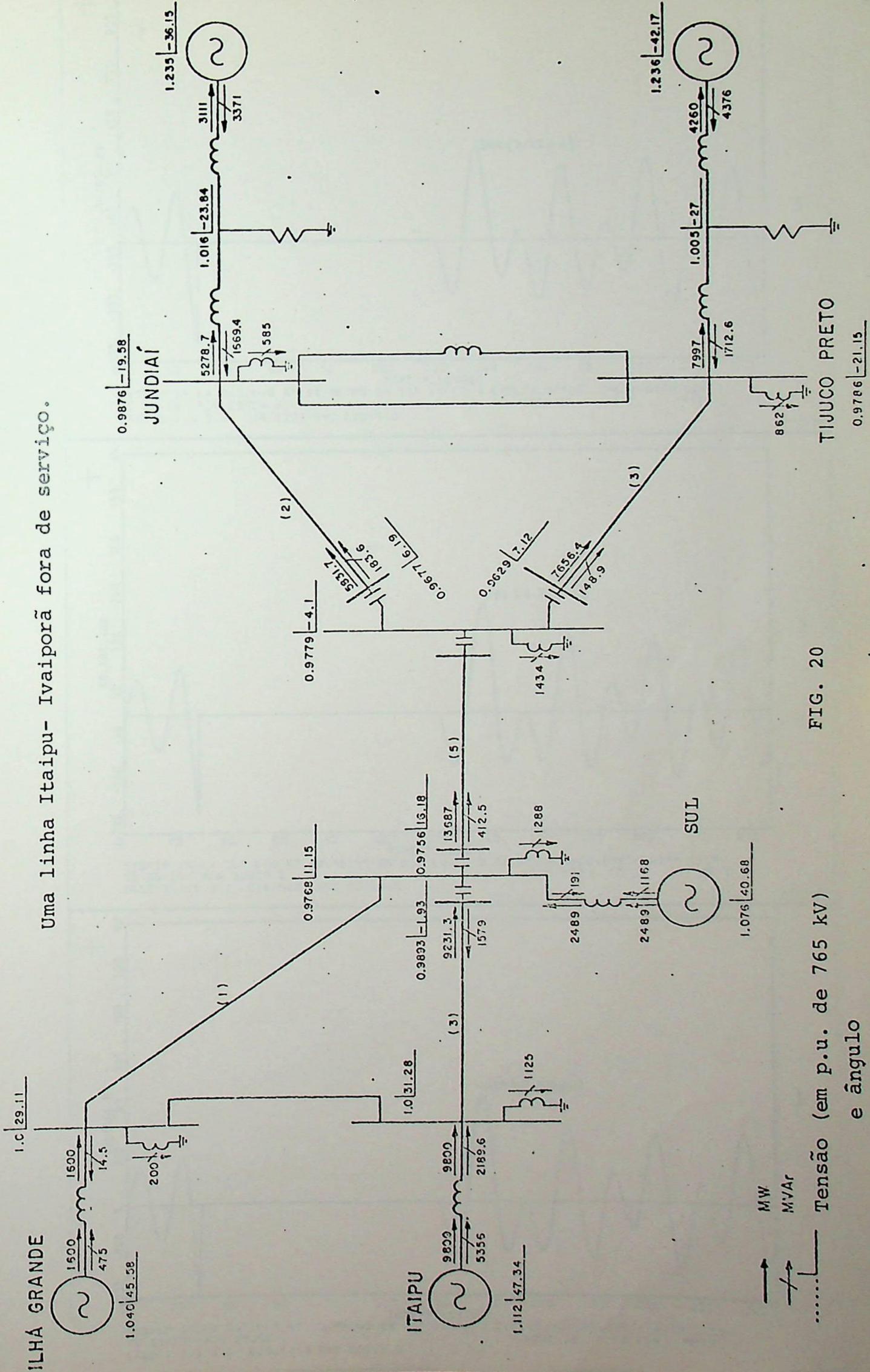


FIG. 20

Tensão (em p.u. de 765 kV) e ângulo

MW
MVar



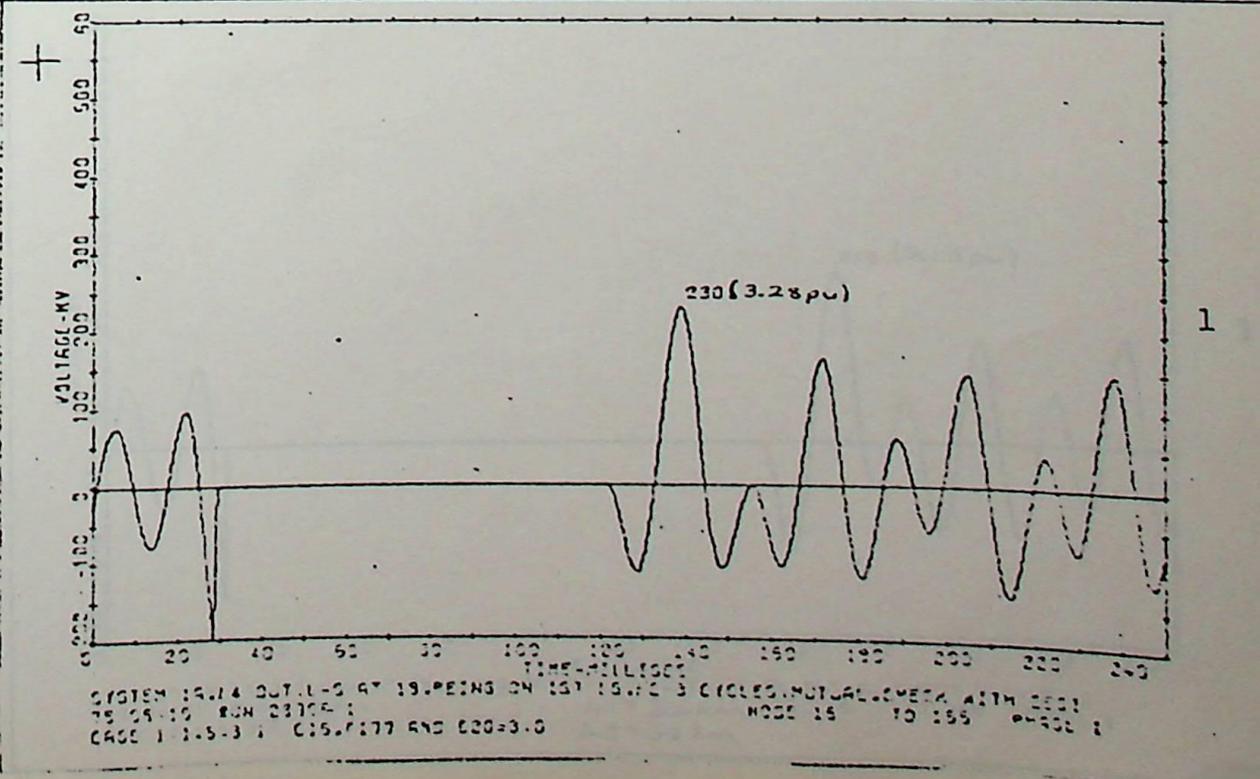
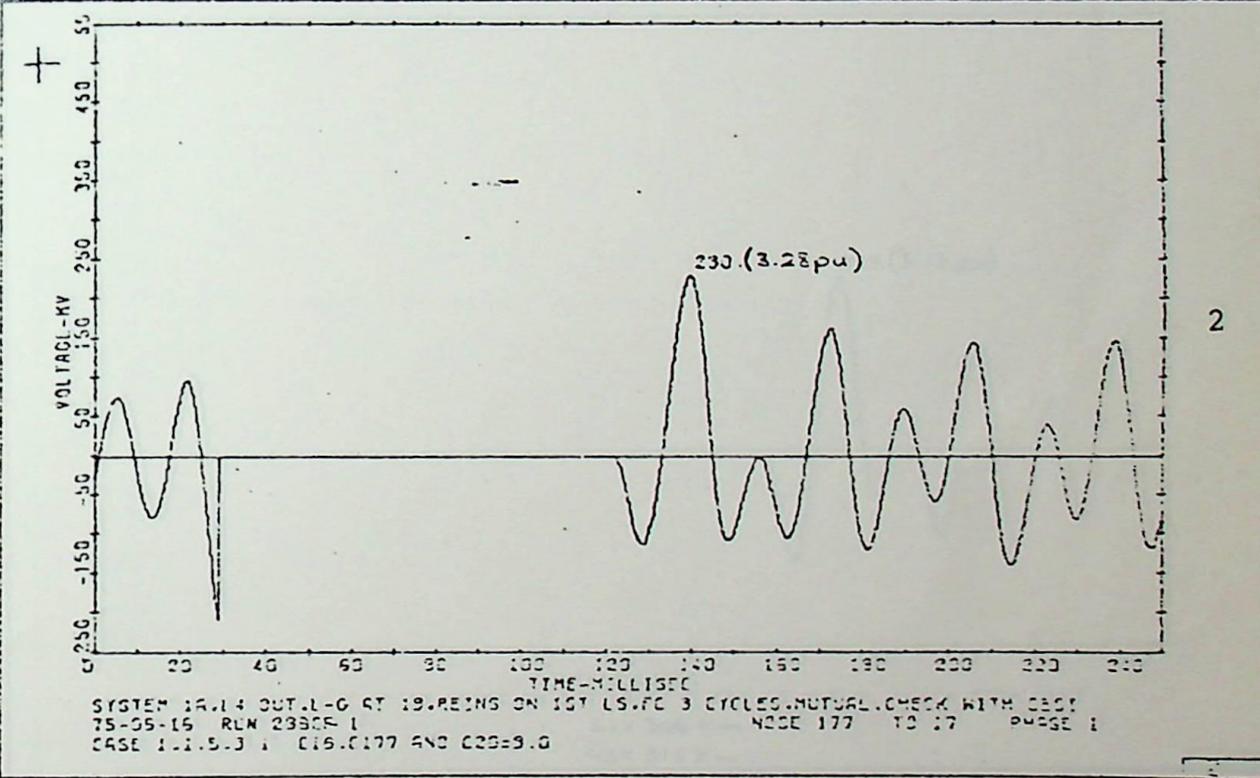
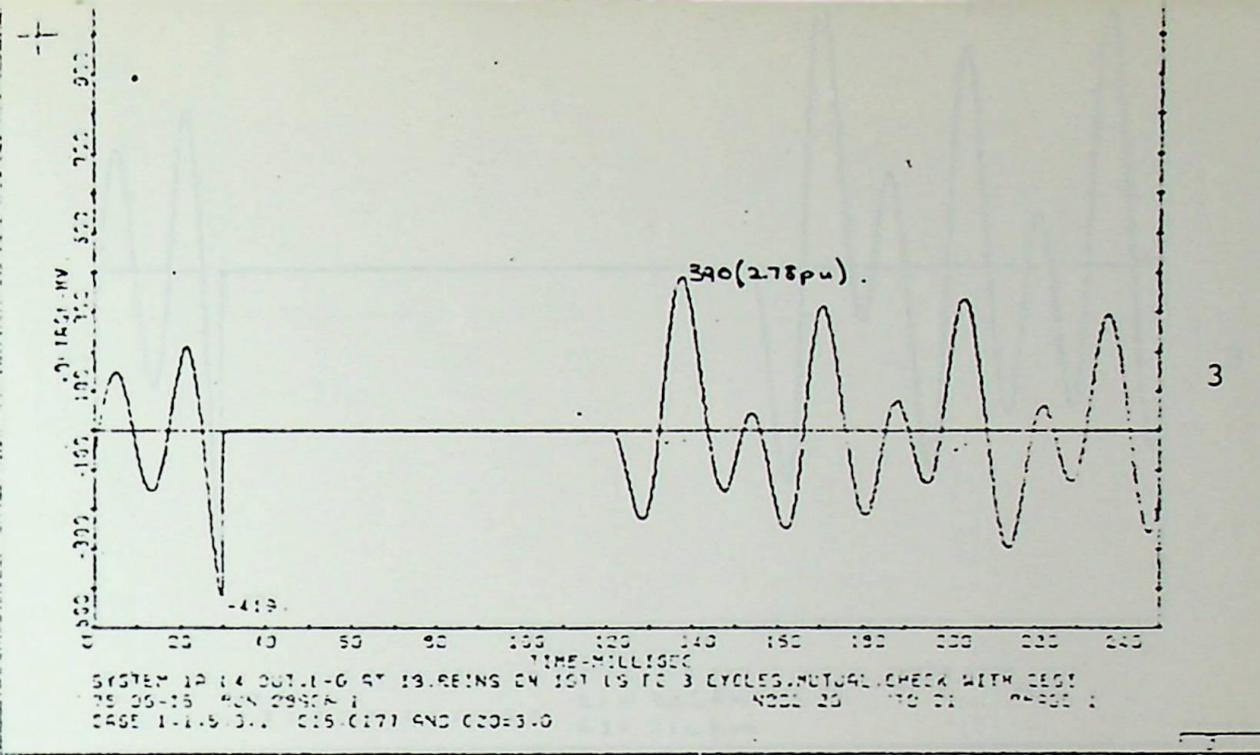


FIG. 21

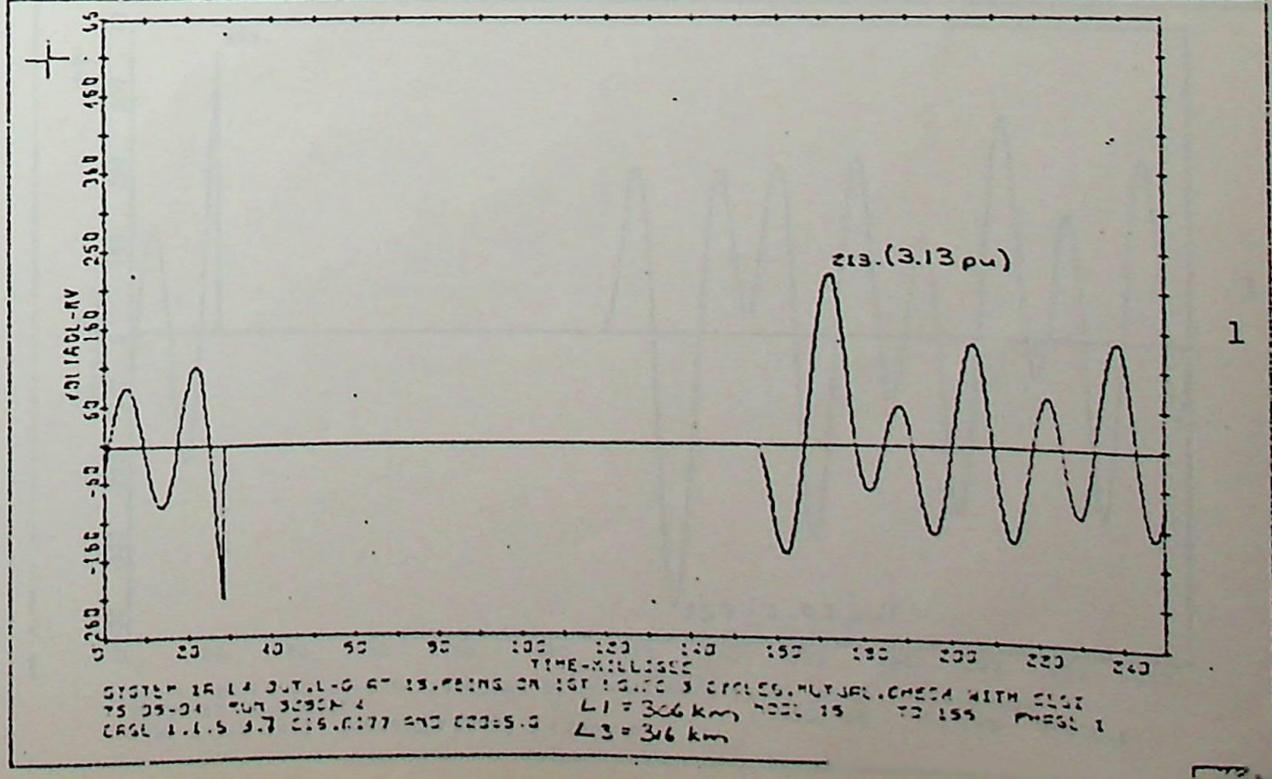
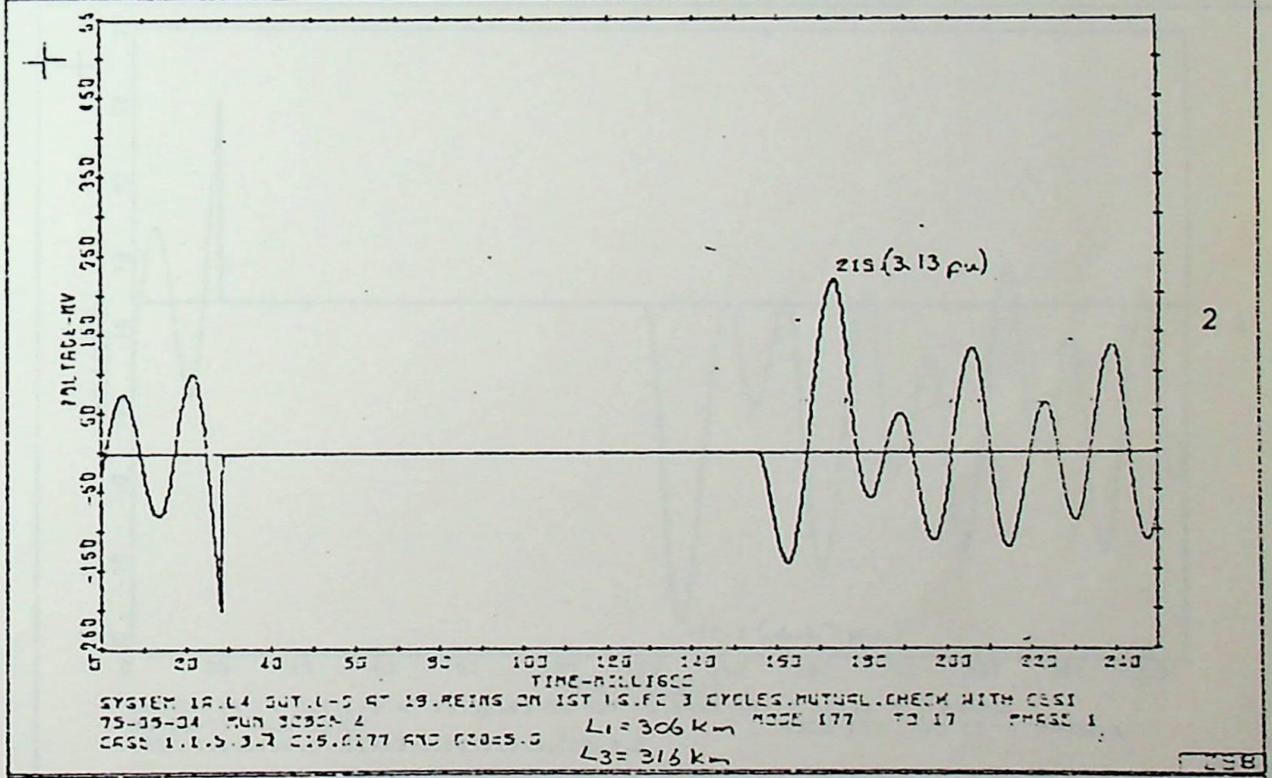
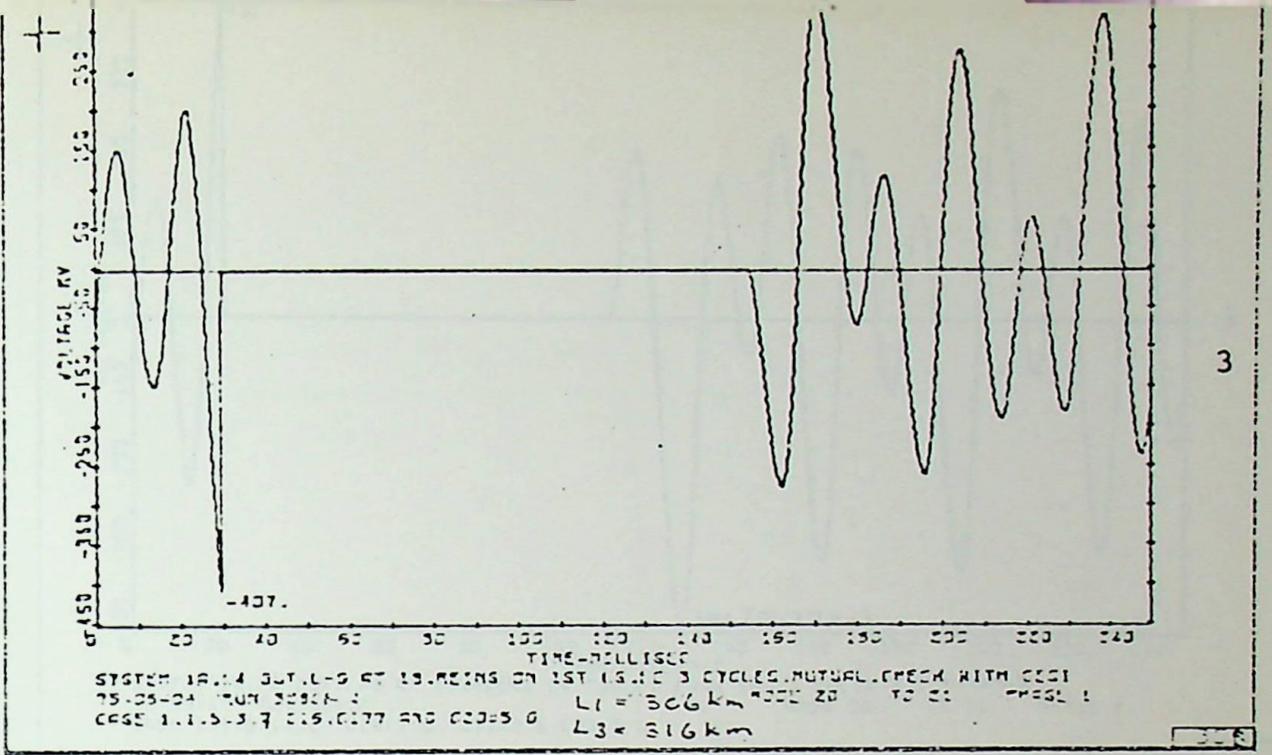


FIG. 22

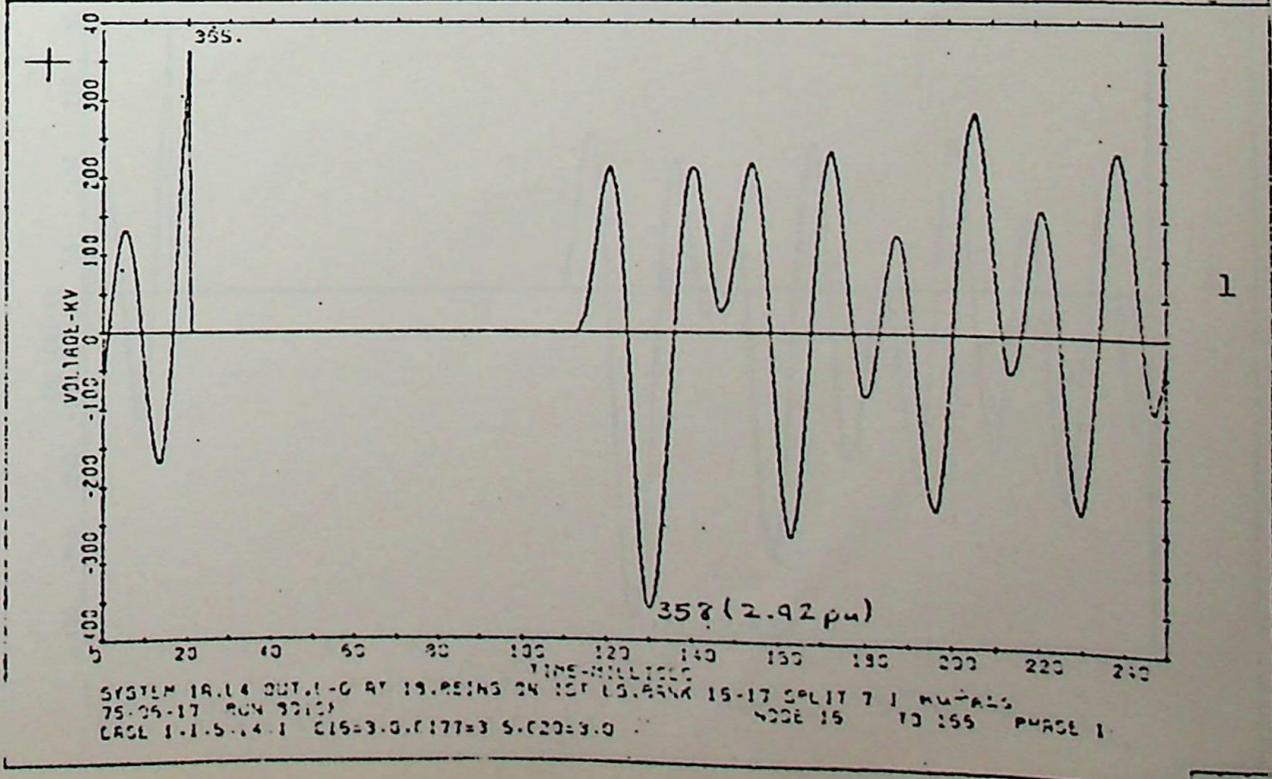
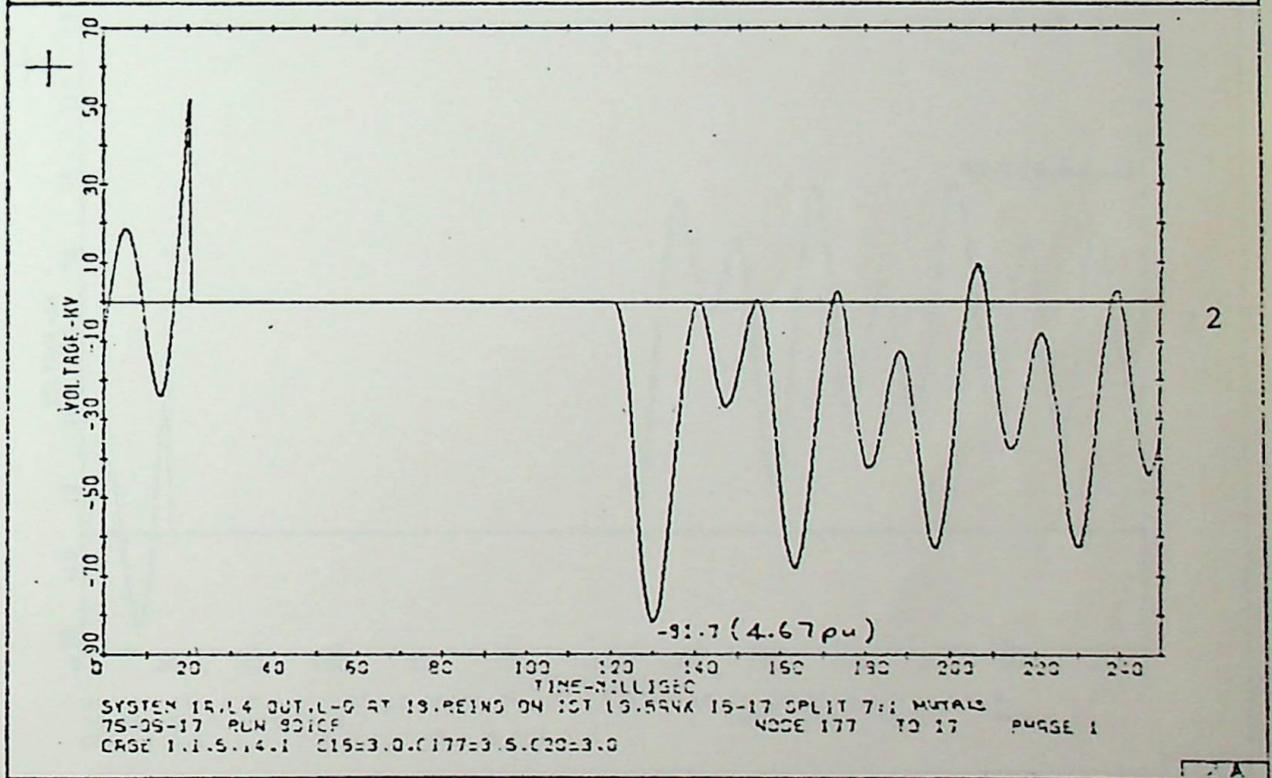
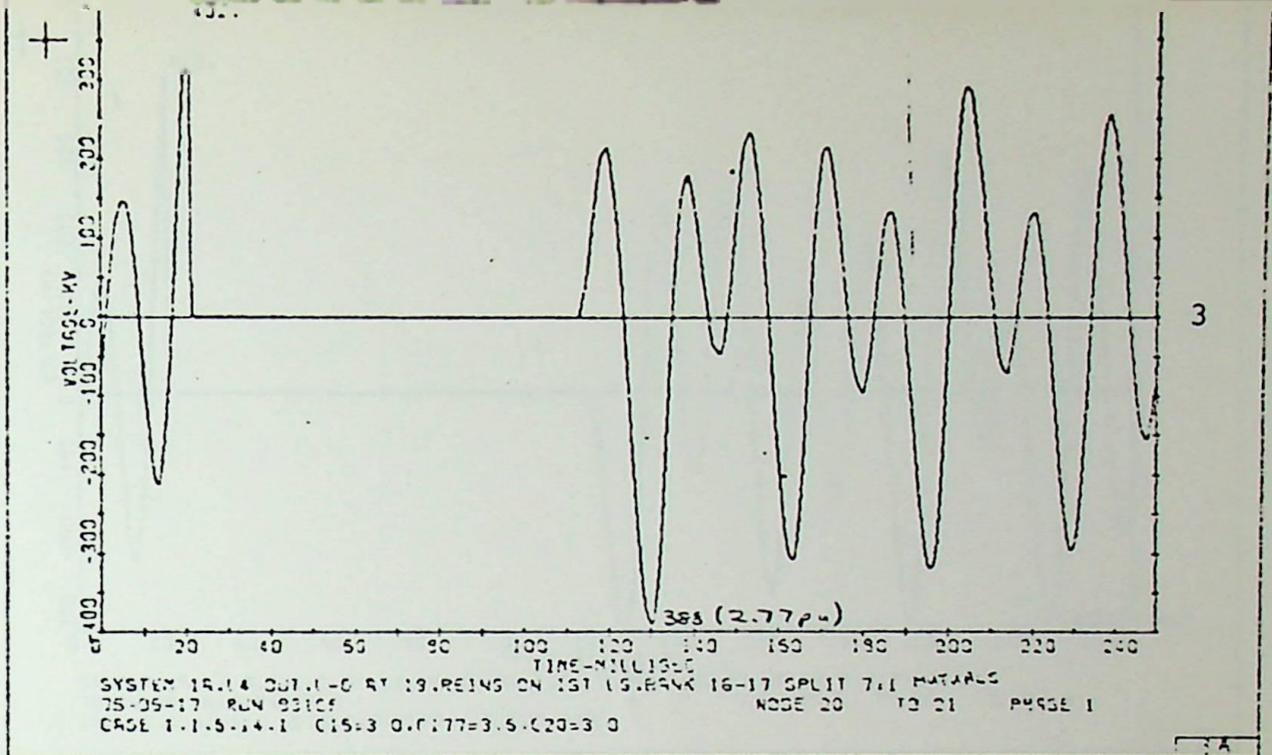


FIG. 23

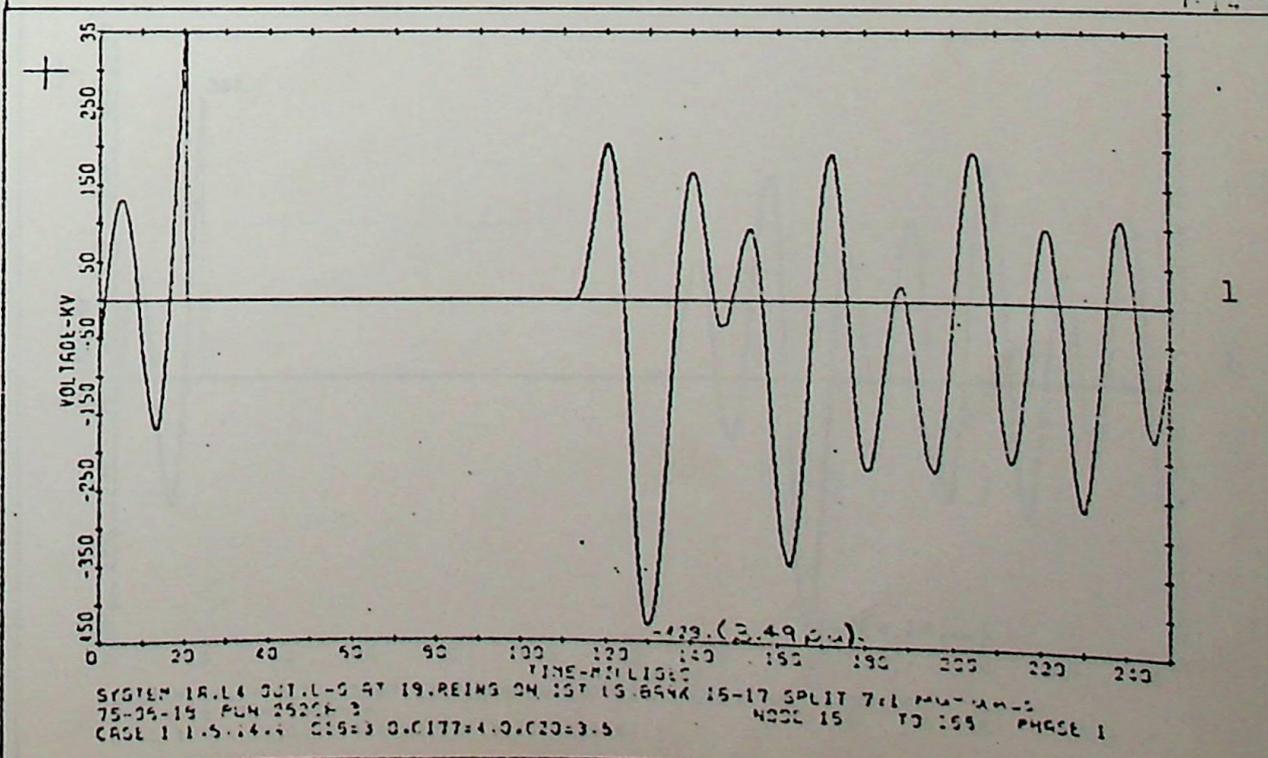
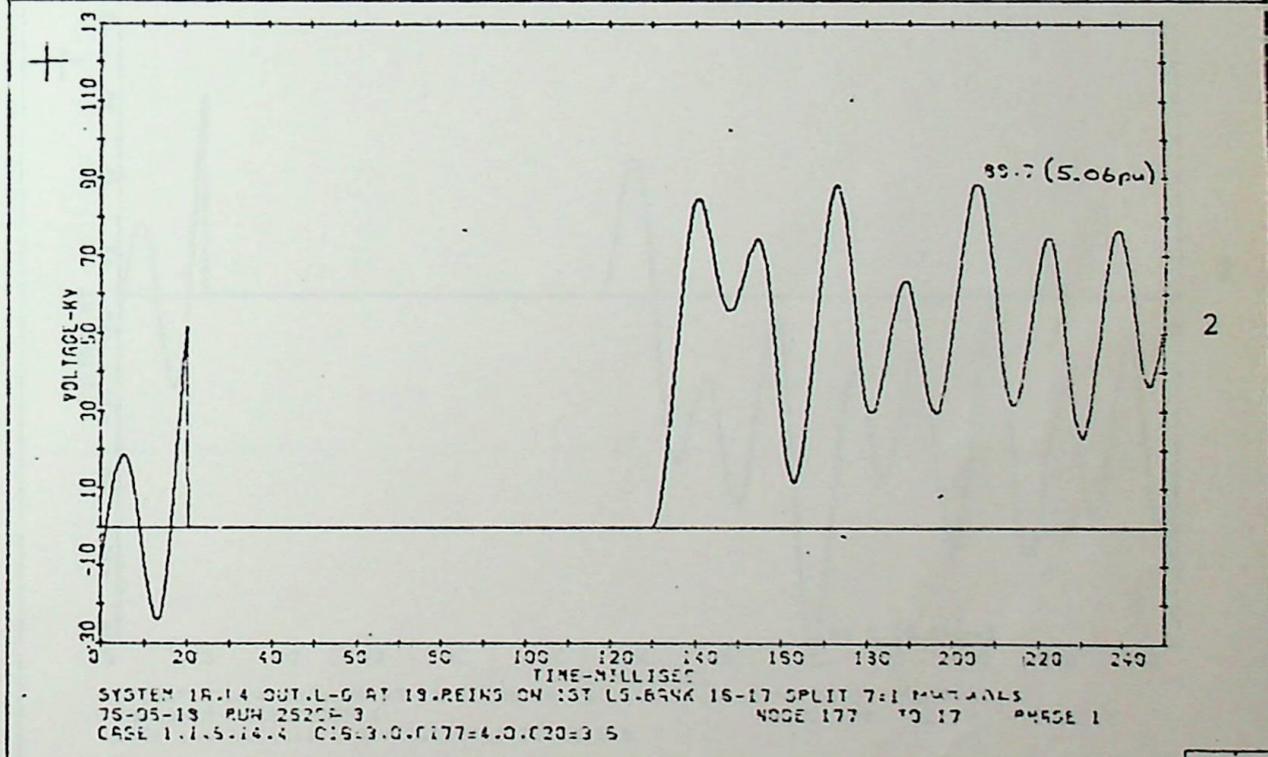
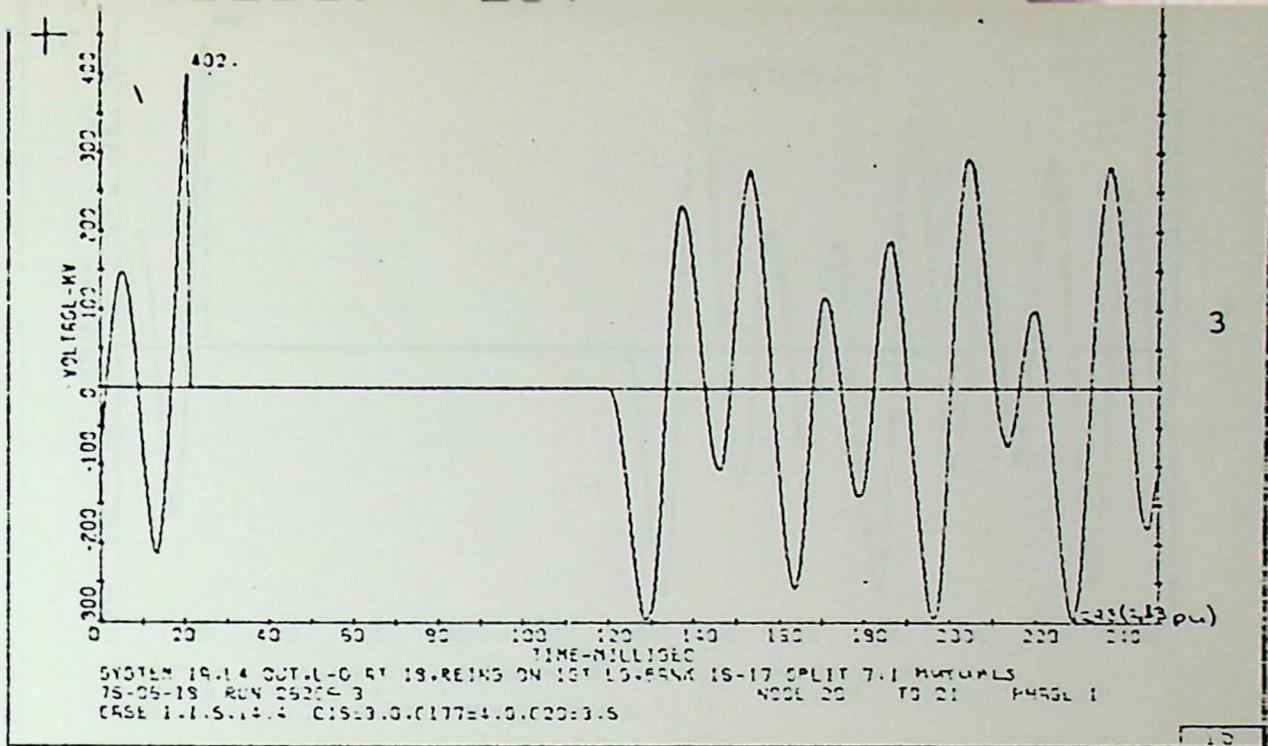


FIG. 24

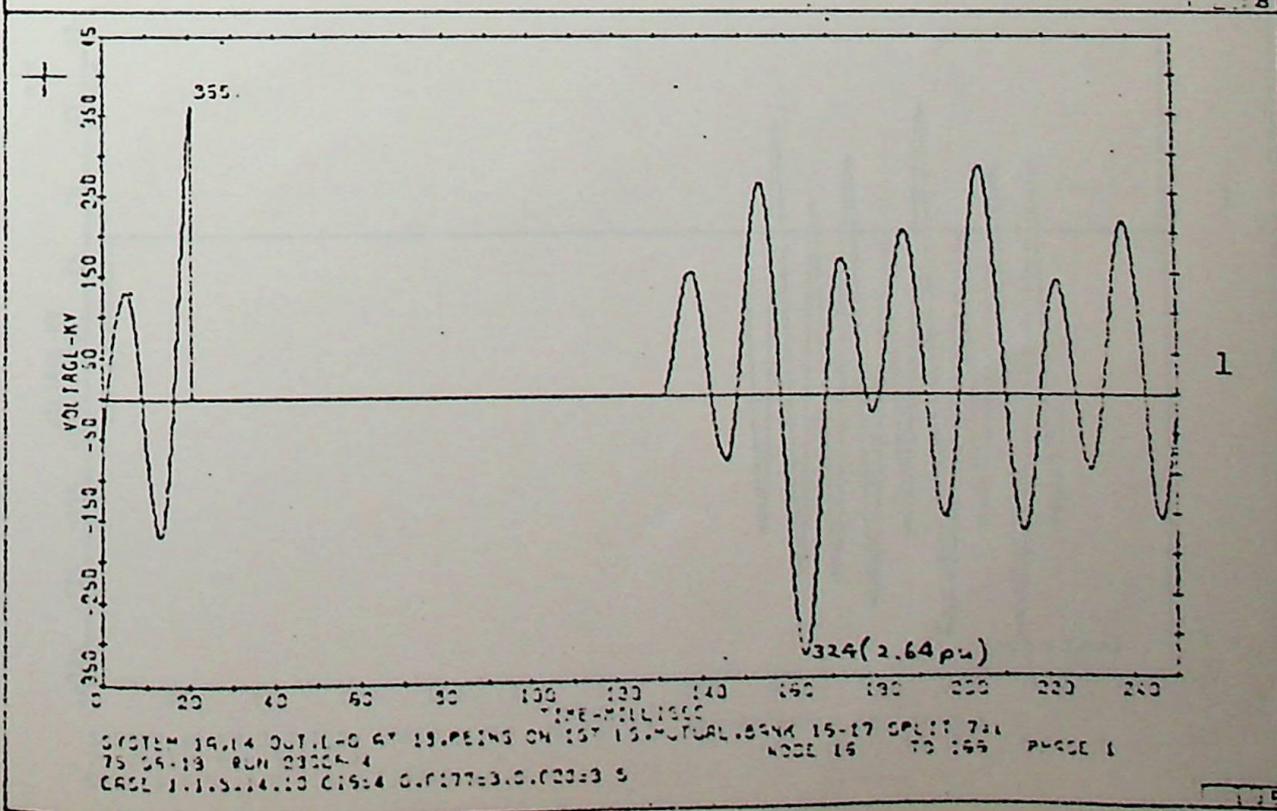
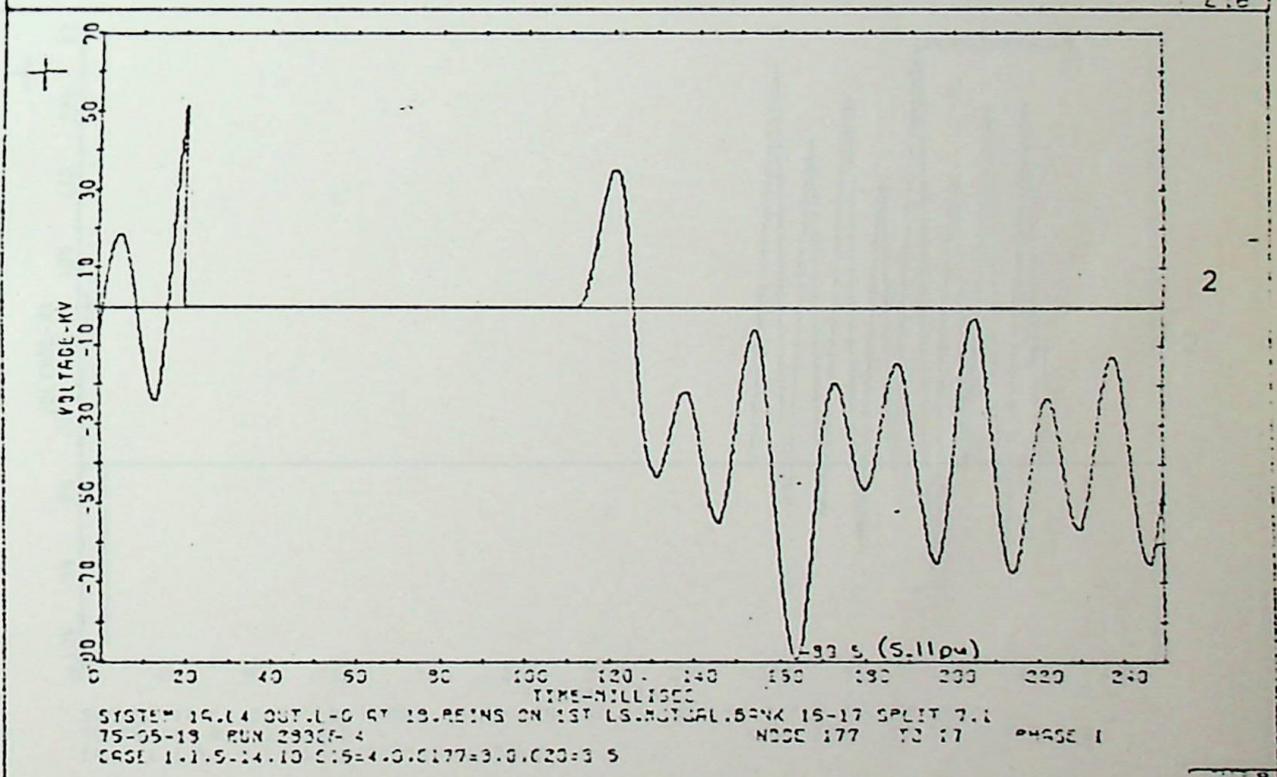
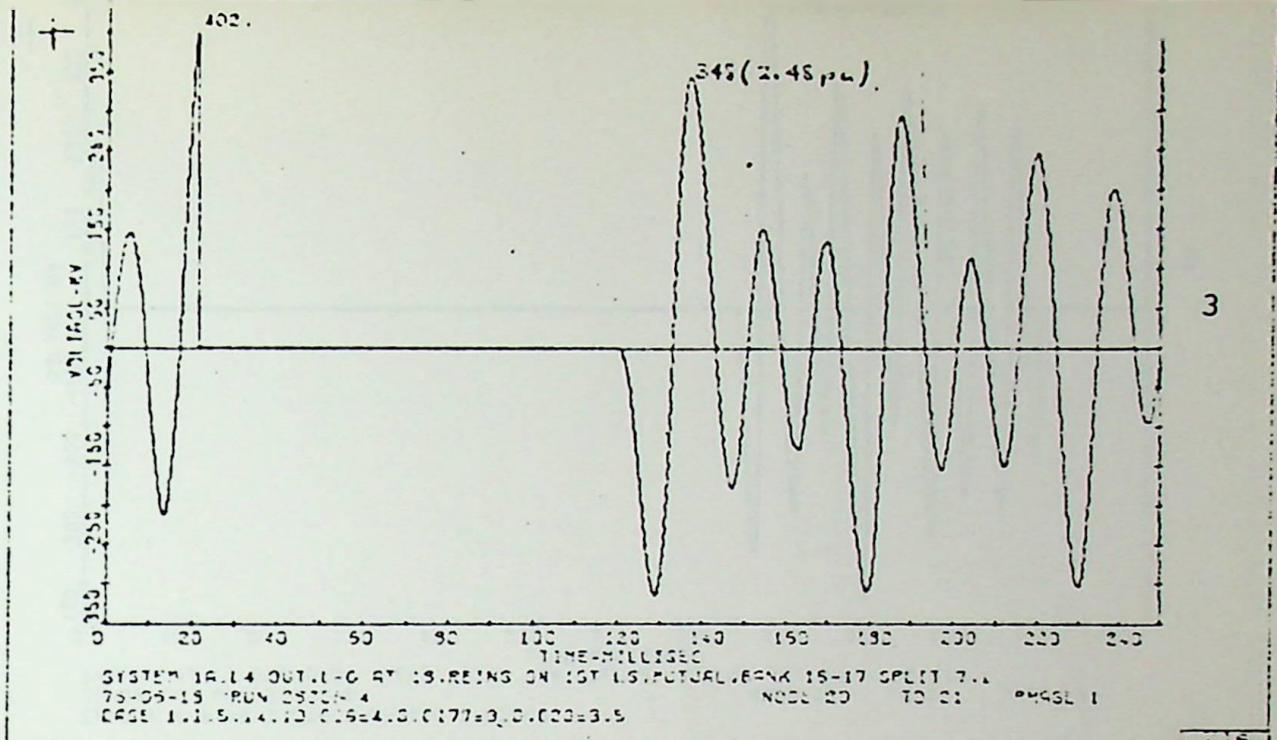


FIG. 25

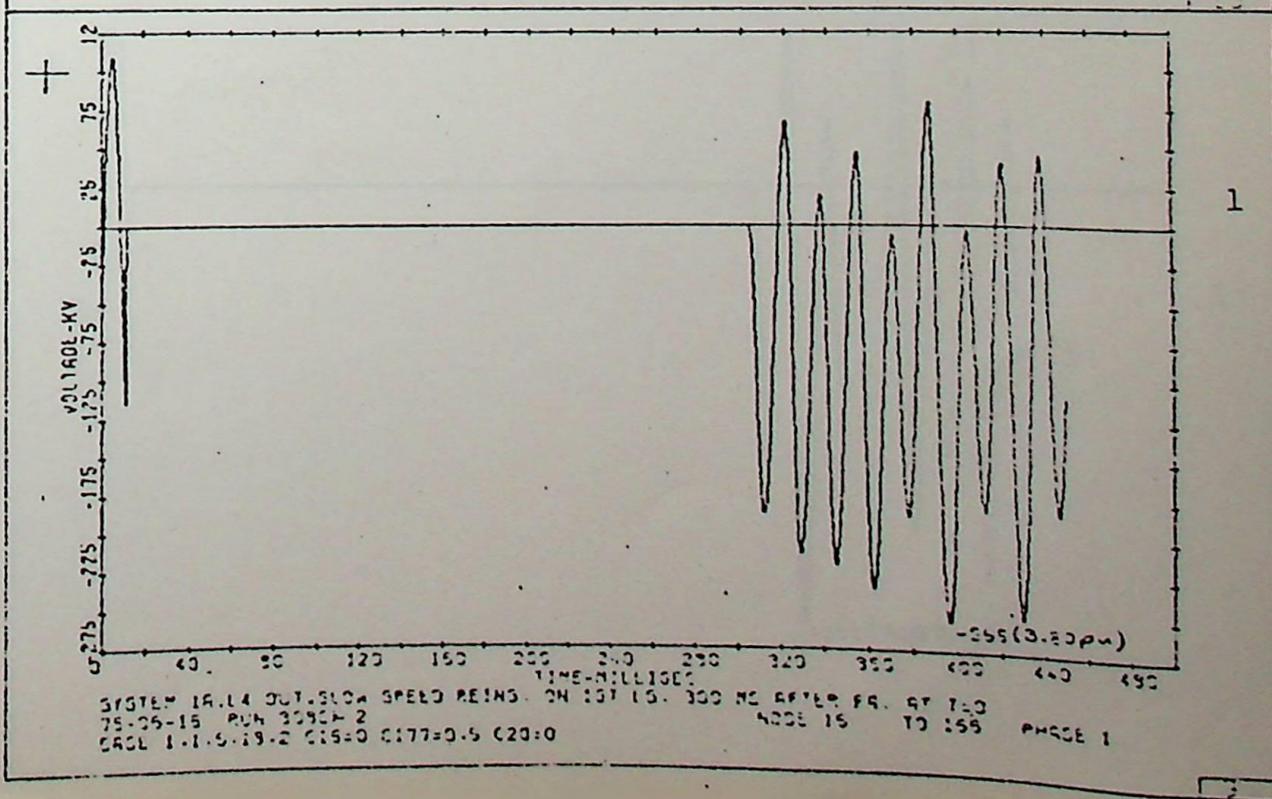
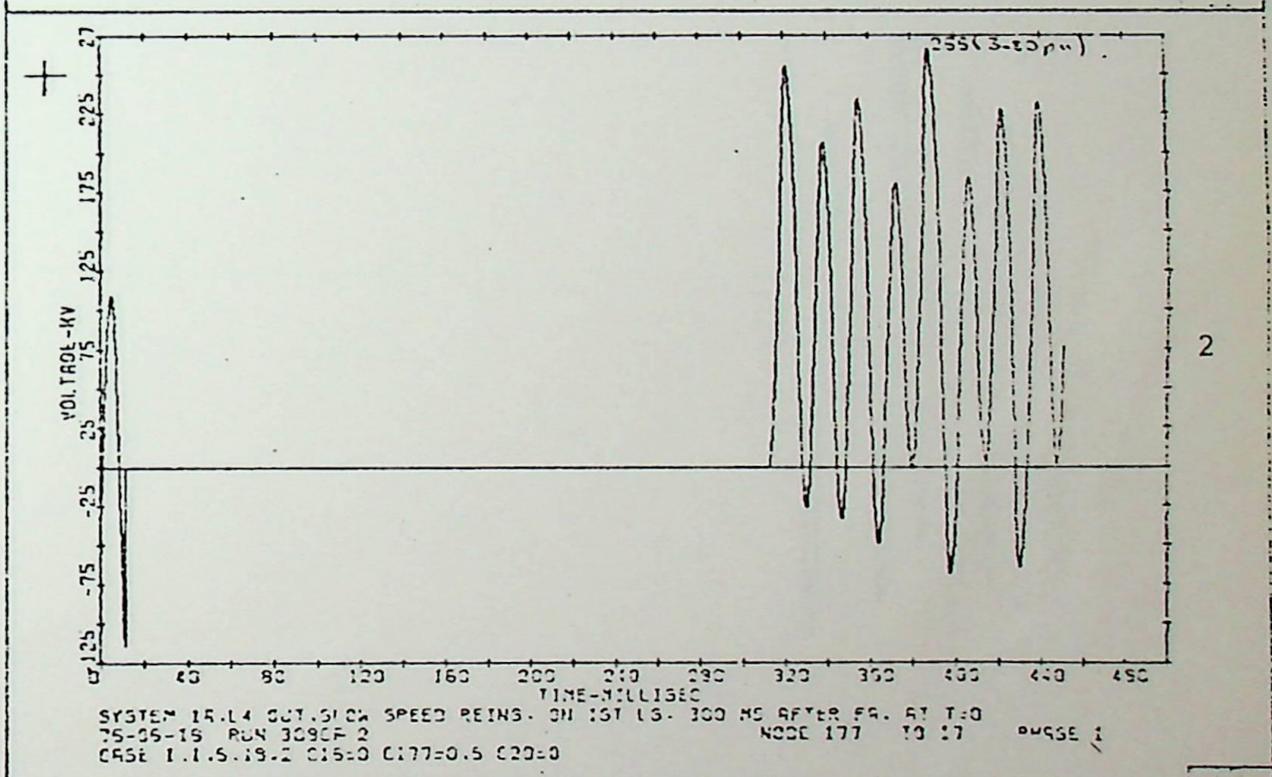
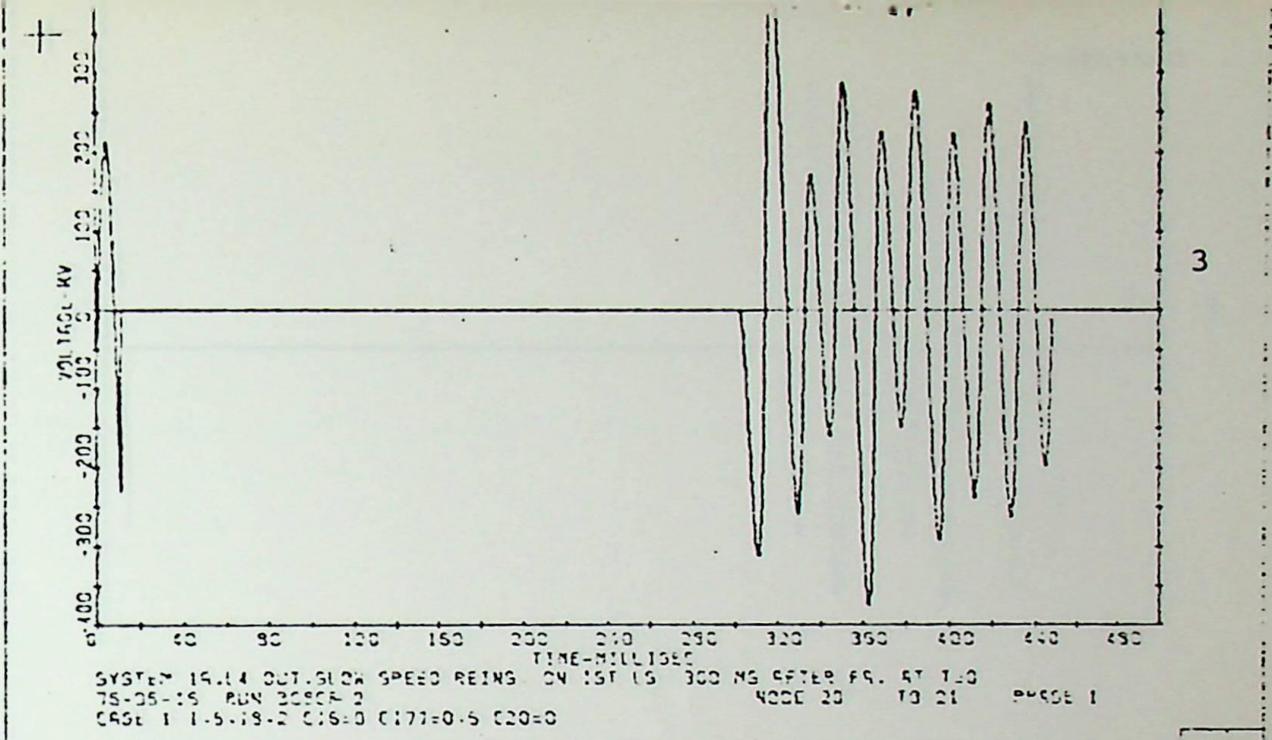


FIG. 26

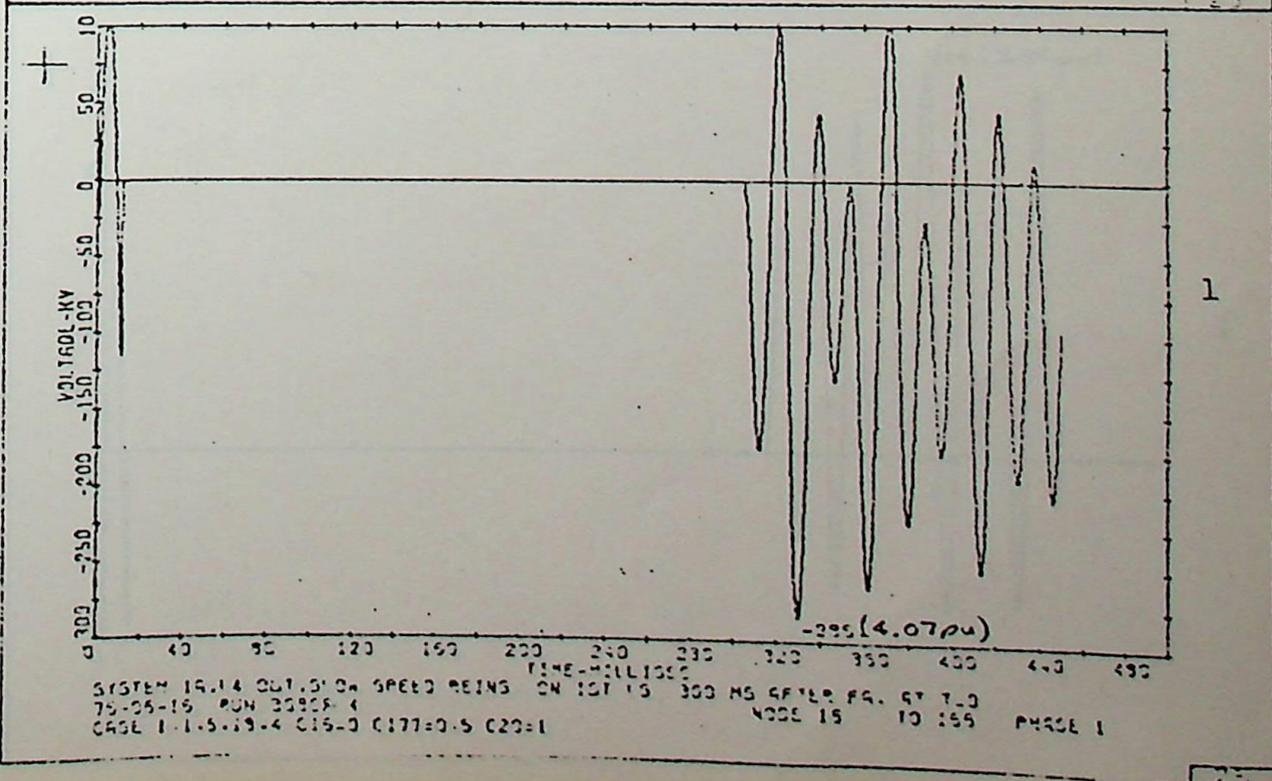
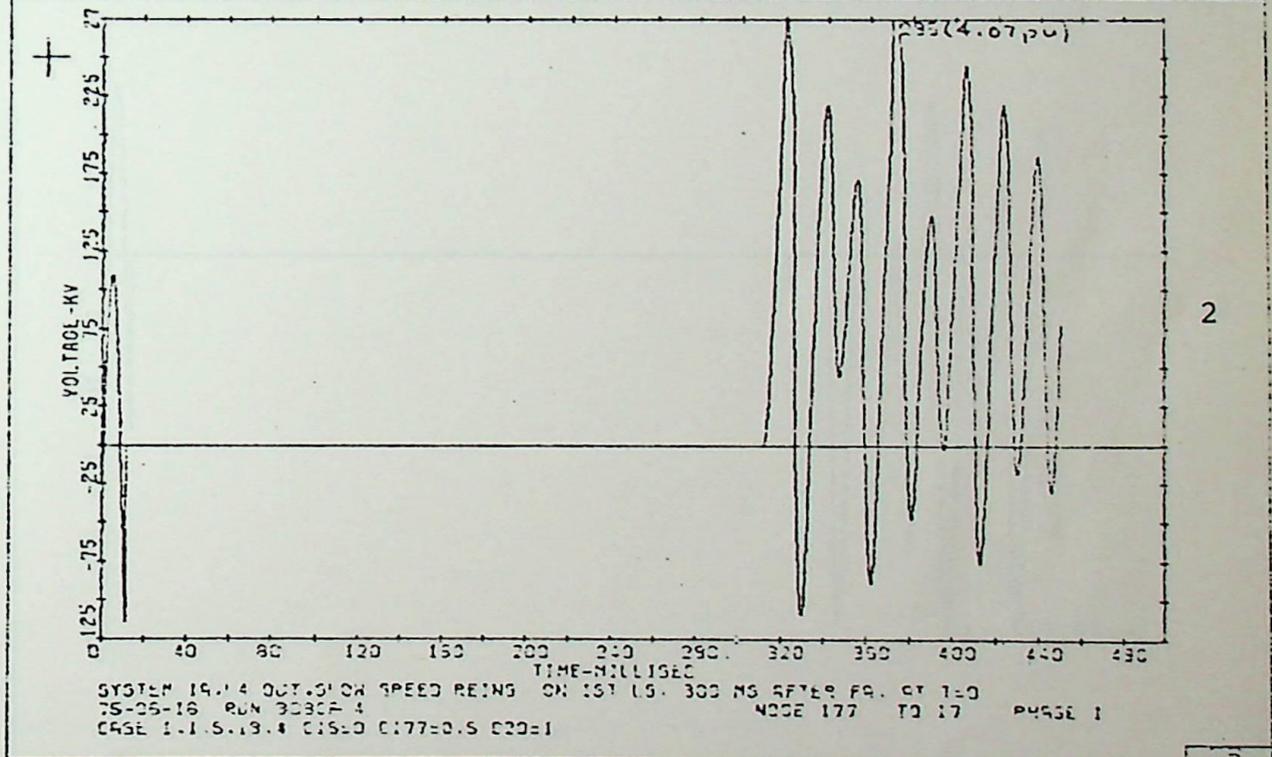
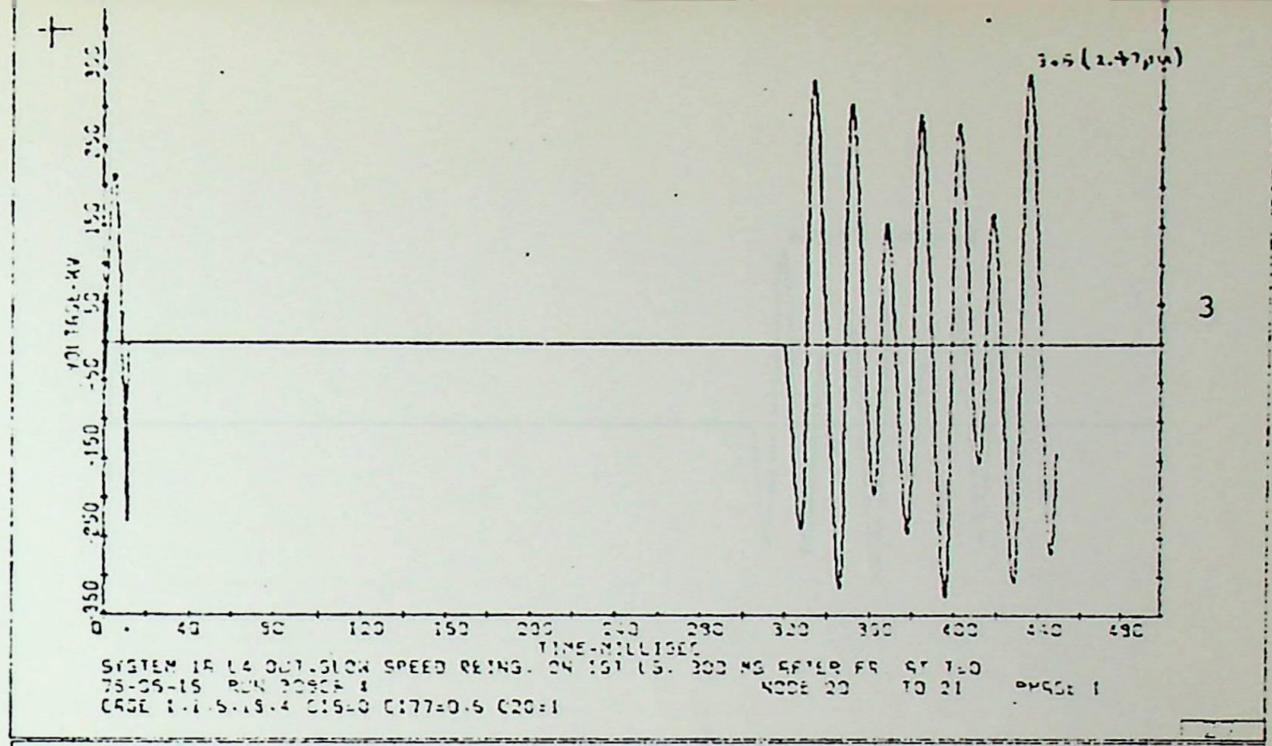


FIG. 27

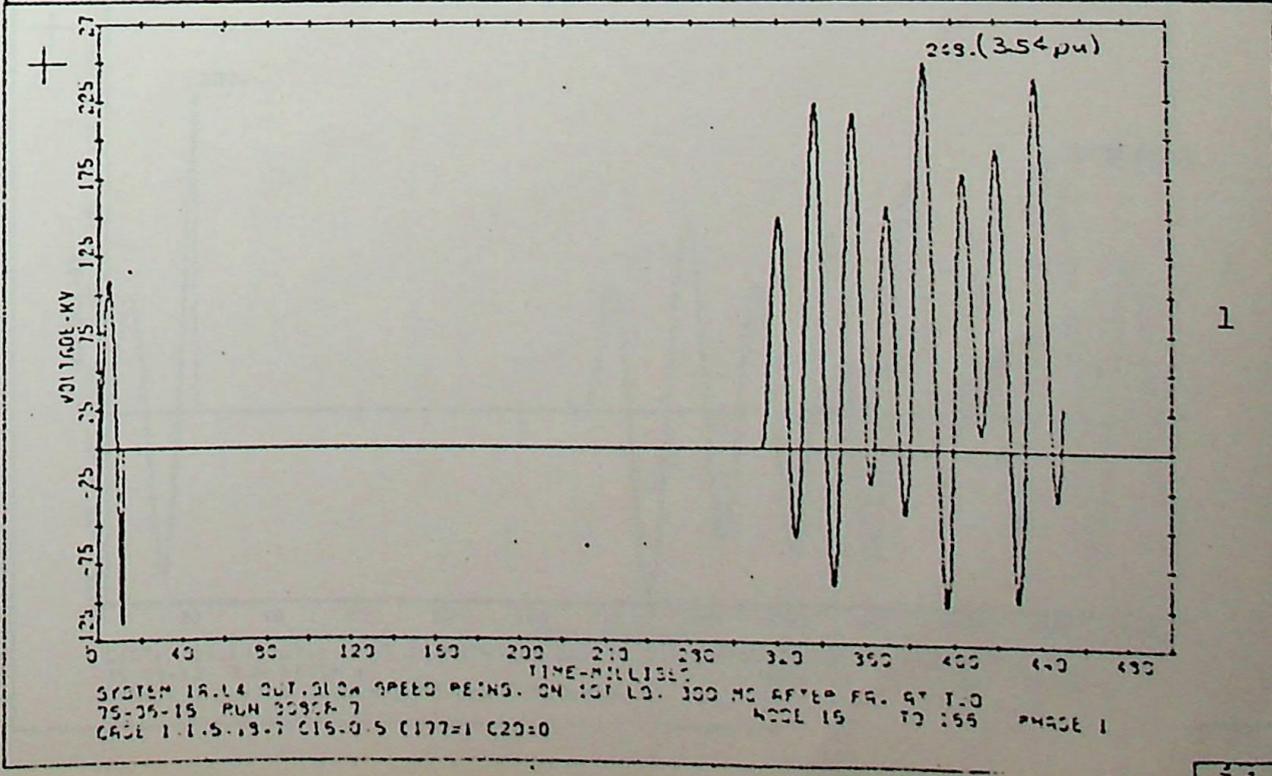
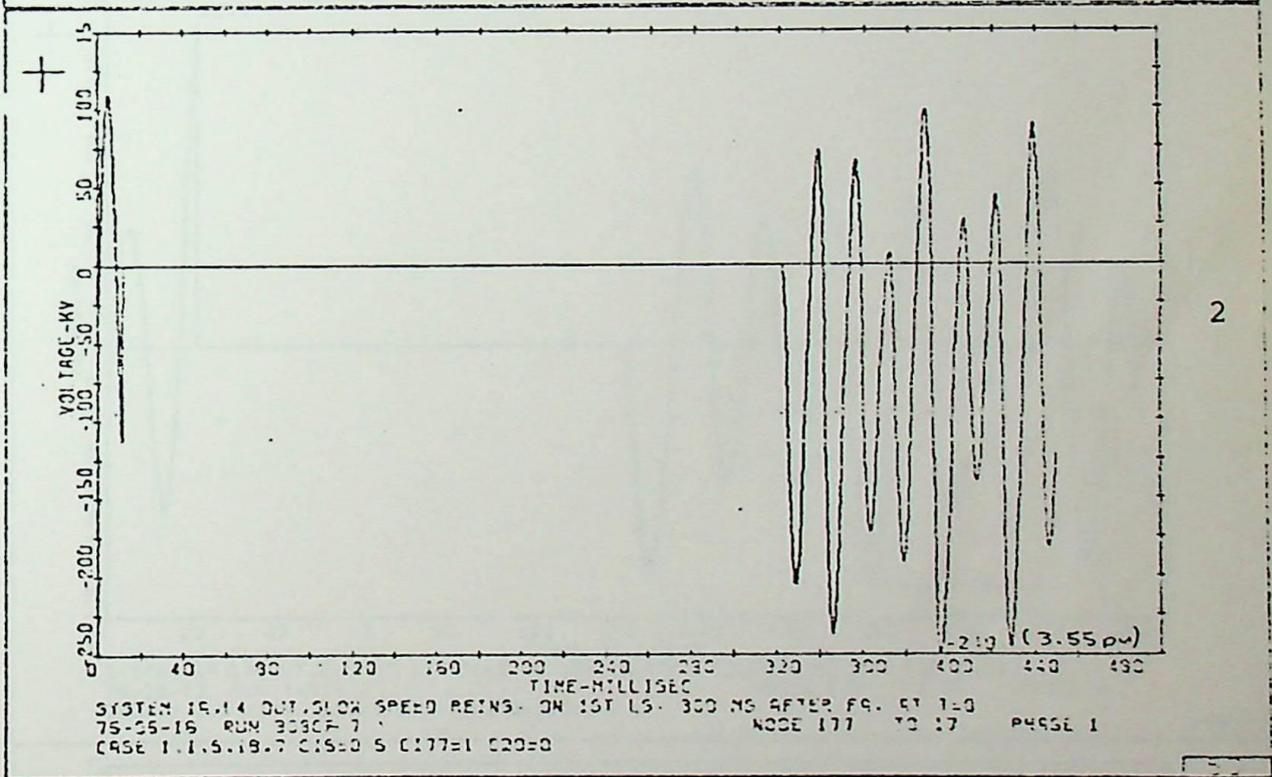
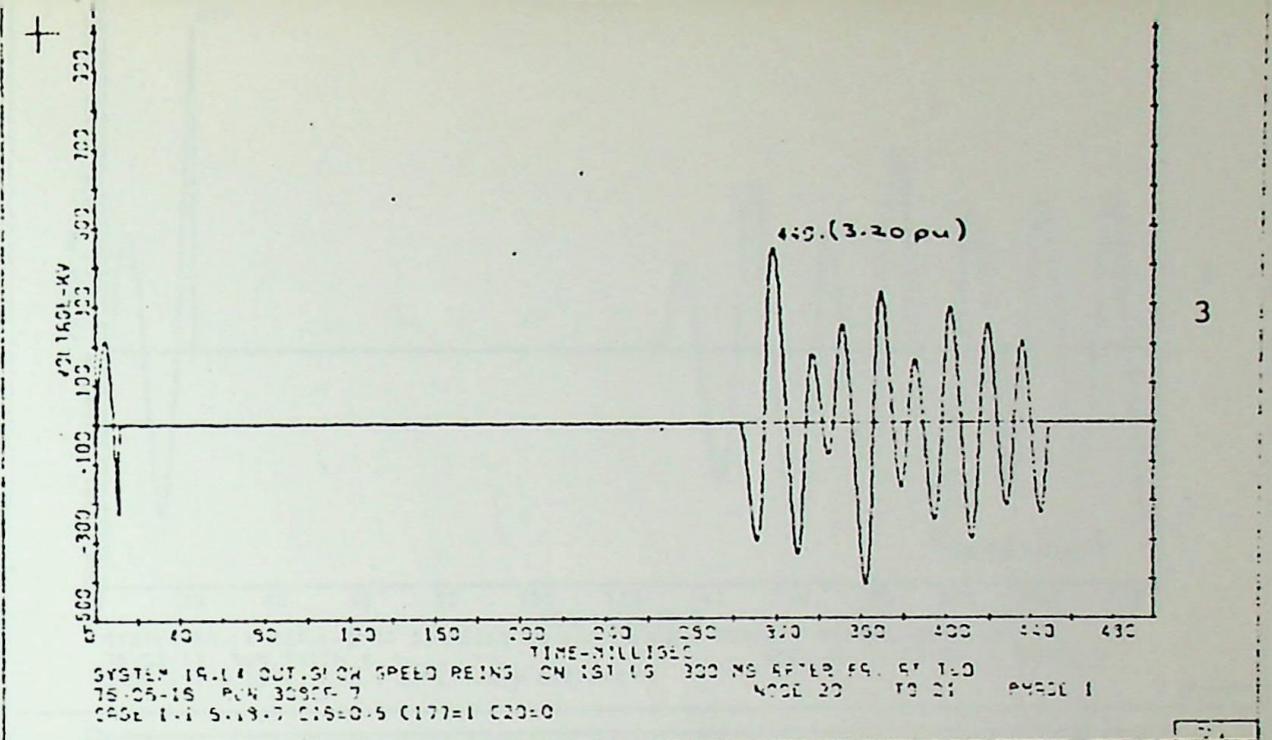
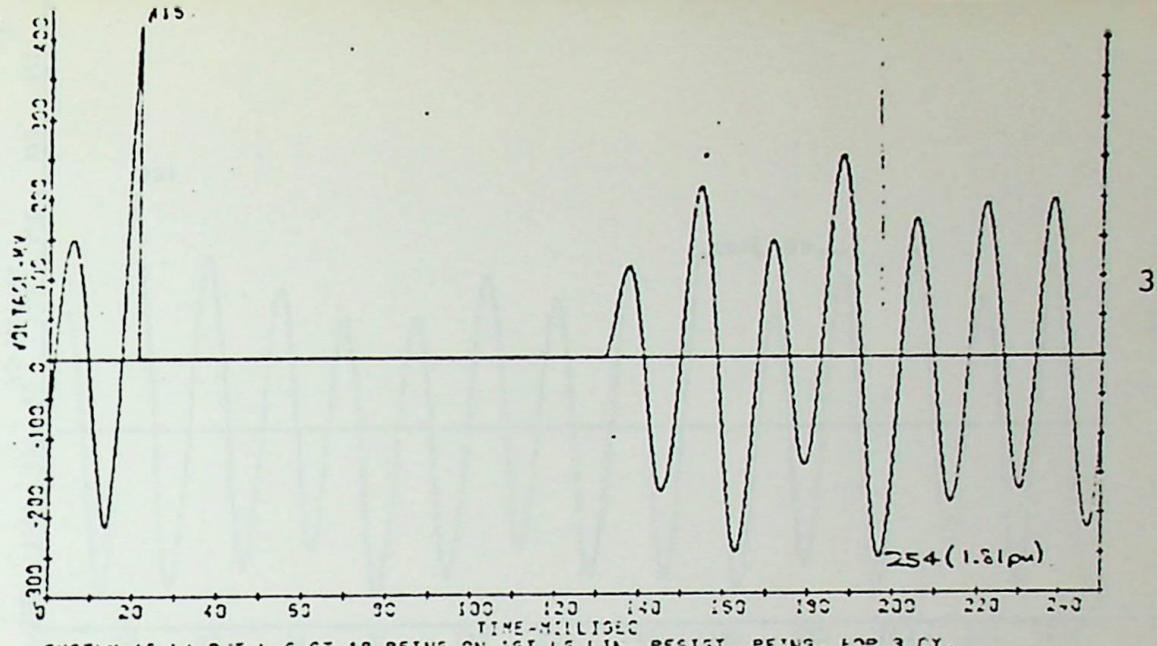
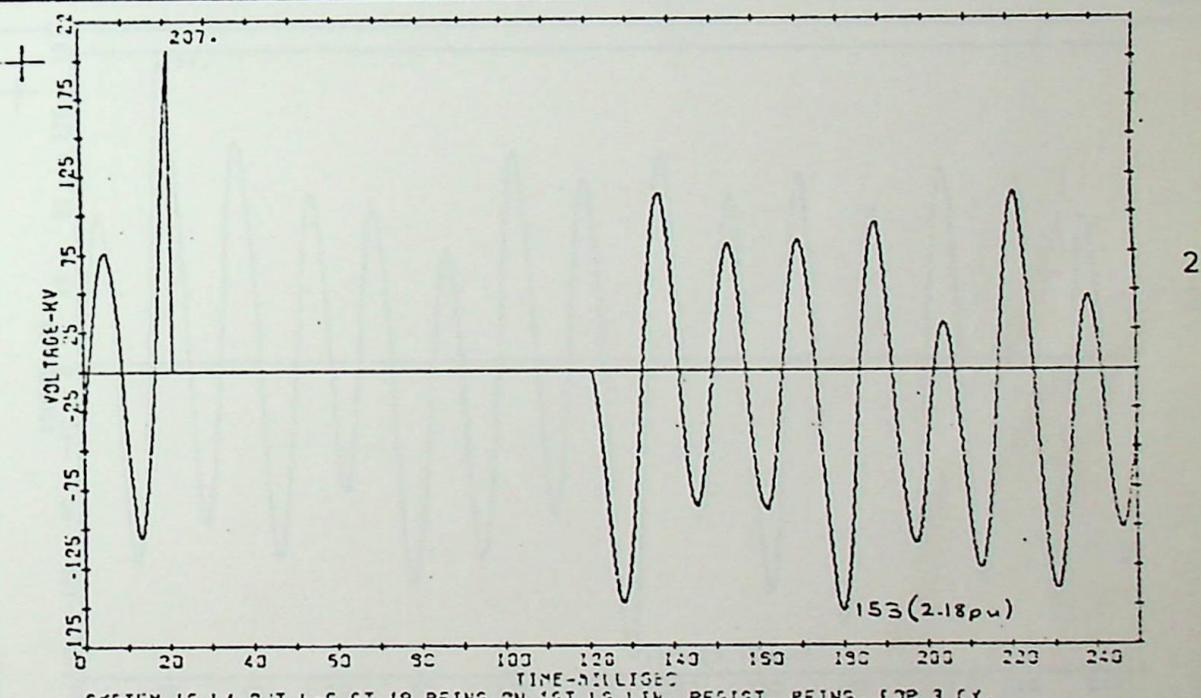


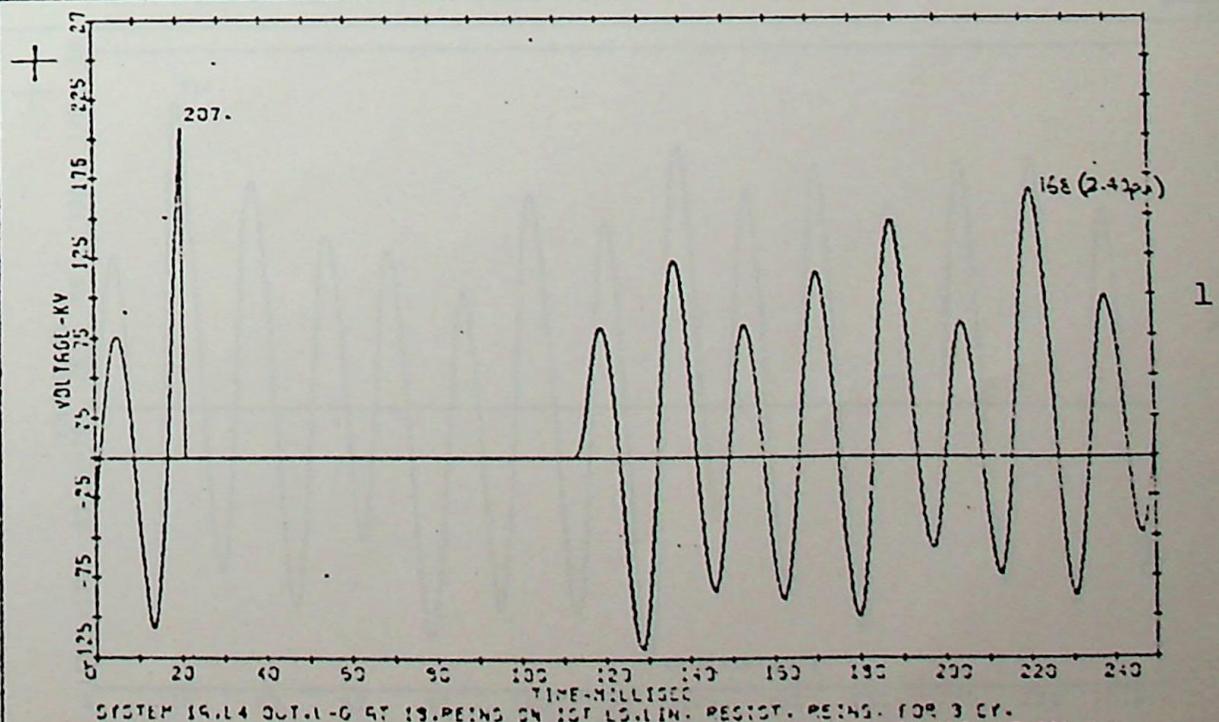
FIG. 28



SYSTEM 19.14 OUT. I-G AT 19. REINS ON 1ST 13. LIN. RESIST. REINS. FOR 3 CY.
 75-05-13 RUN 94704-4 NODE 20 TO 21 PHASE 1
 CASE 1-1.5-11-4 C15=3 0.0177=3.5.C20=4.0



SYSTEM 19.14 OUT. I-G AT 19. REINS ON 1ST 13. LIN. RESIST. REINS. FOR 3 CY.
 75-08-13 RUN 94704-4 NODE 177 TO 17 PHASE 1
 CASE 1-1.5-11-4 C15=3 0.0177=3.5.C20=4.0



SYSTEM 19.14 OUT. I-G AT 19. REINS ON 1ST 13. LIN. RESIST. REINS. FOR 3 CY.
 75-05-13 RUN 94704-4 NODE 15 TO 155 PHASE 1
 CASE 1-1.5-11-4 C15=3.0.C177=3.5.C20=4.0

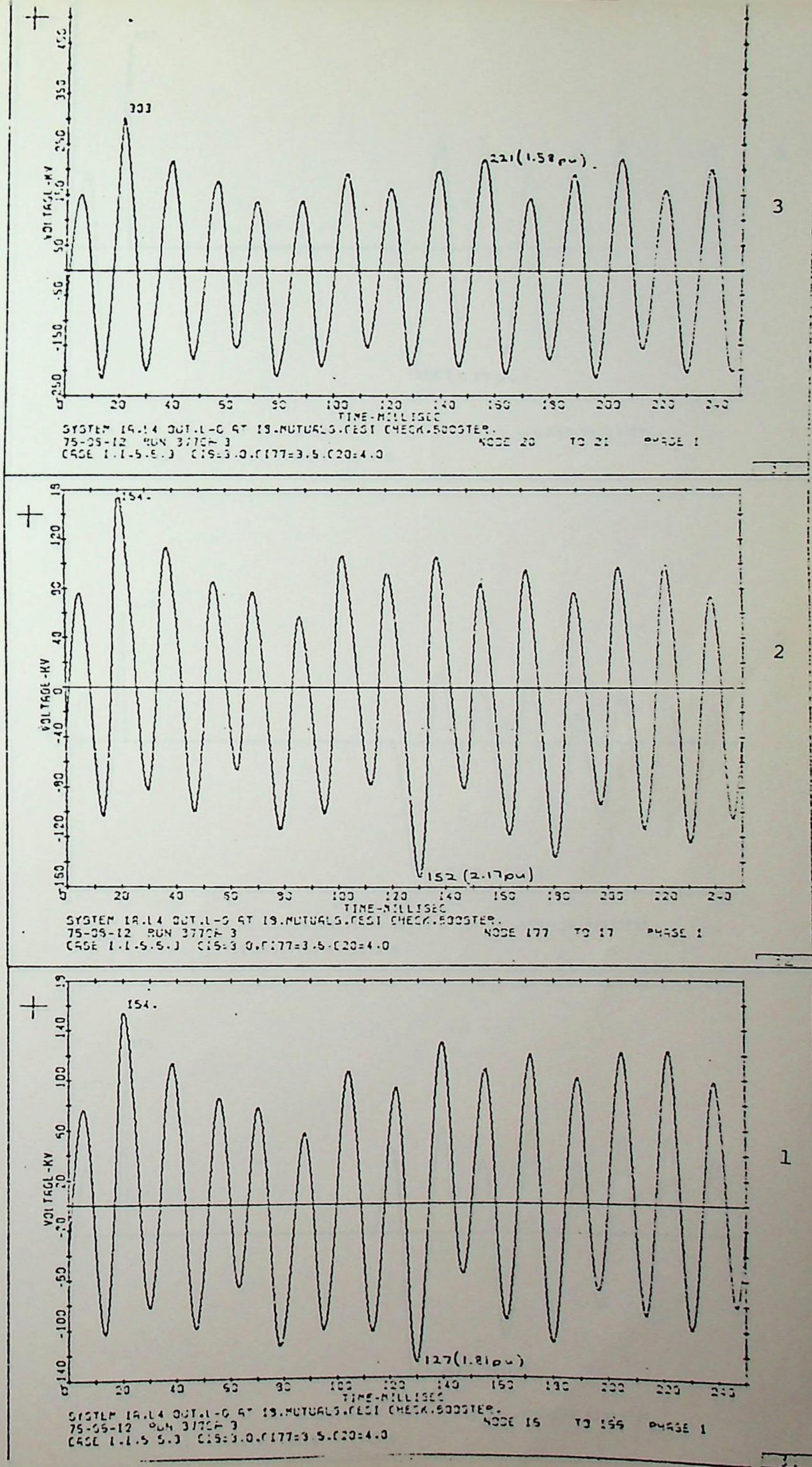


FIG. 30

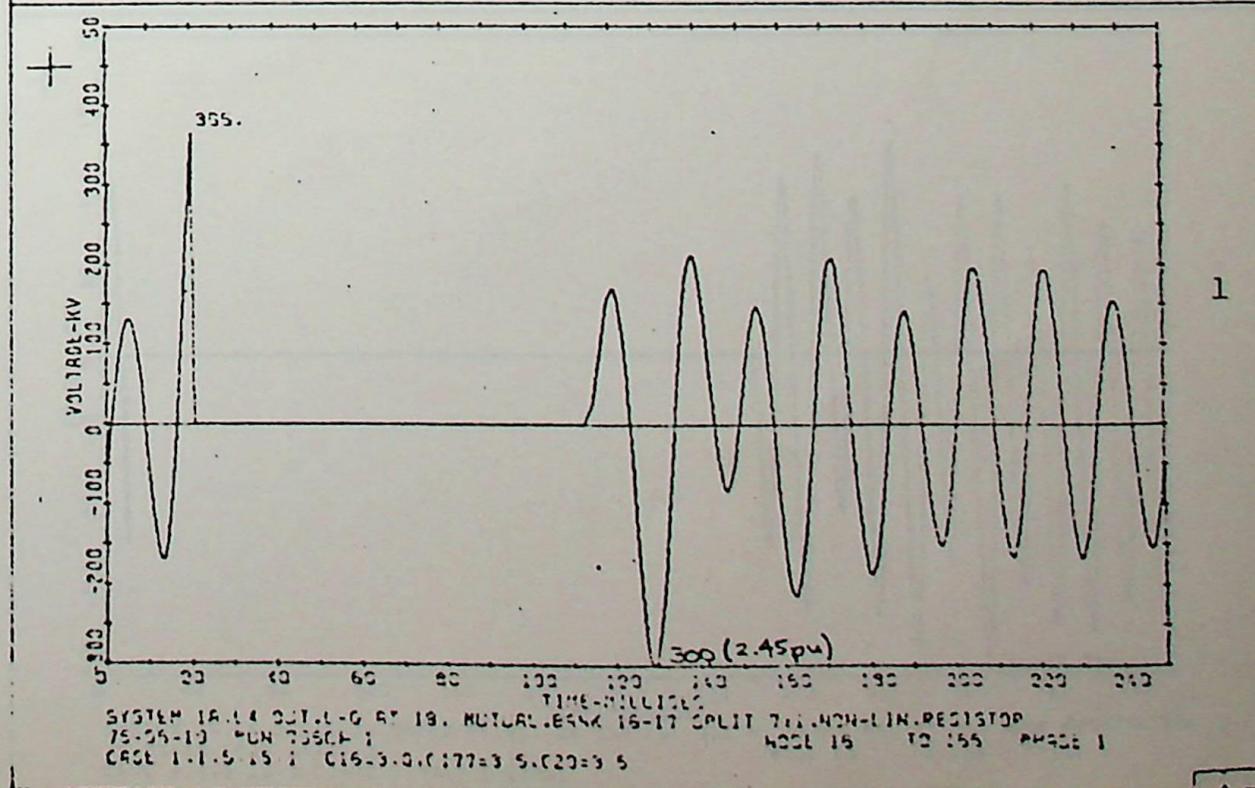
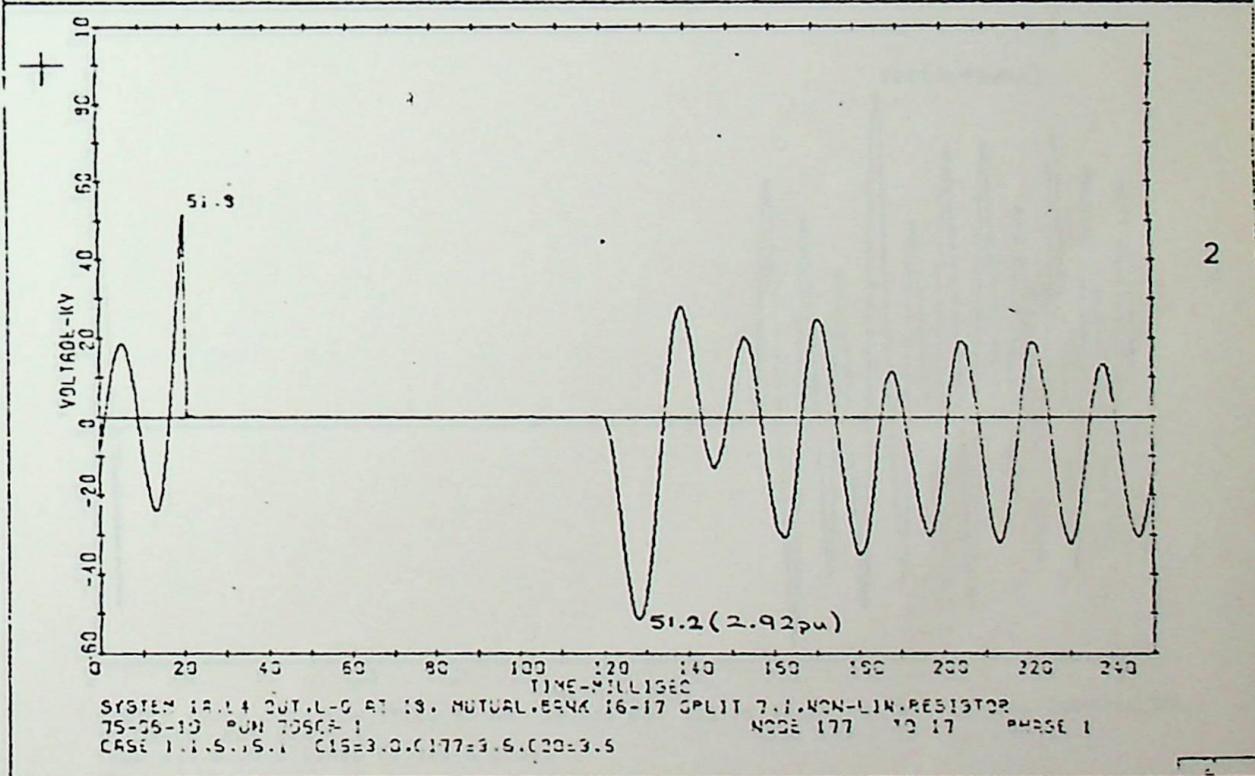
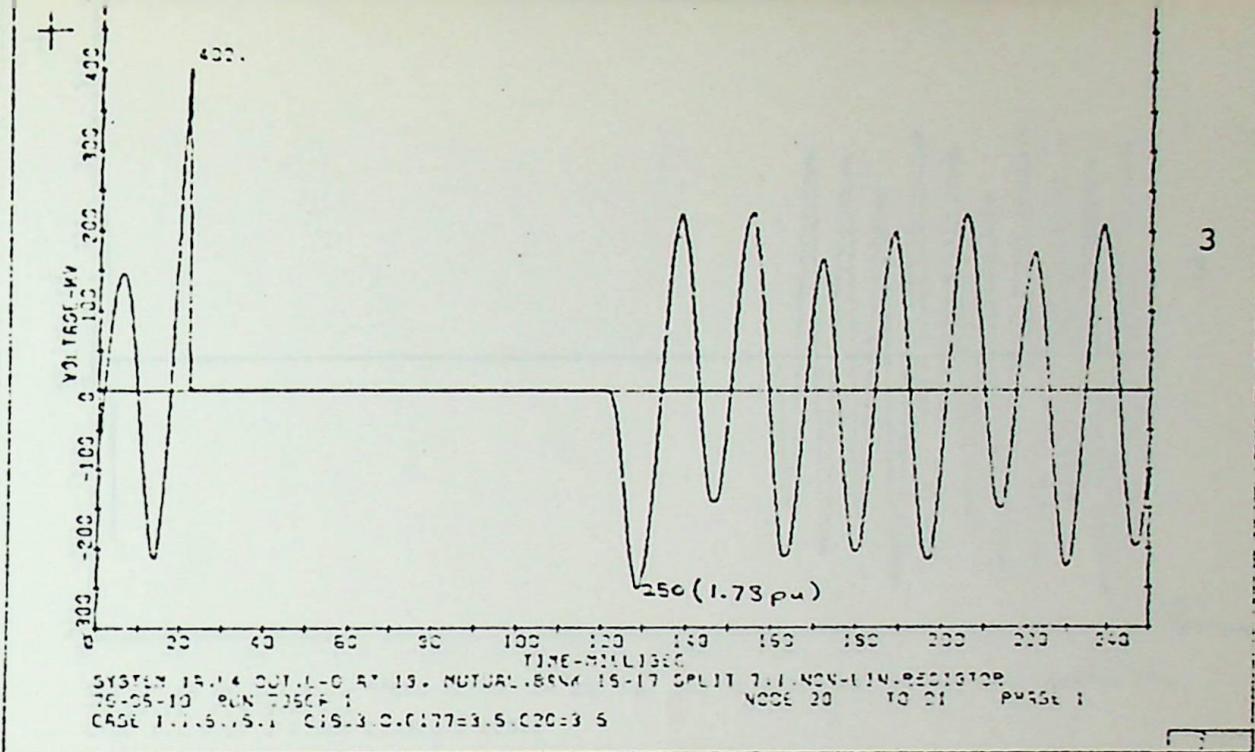


FIG. 31

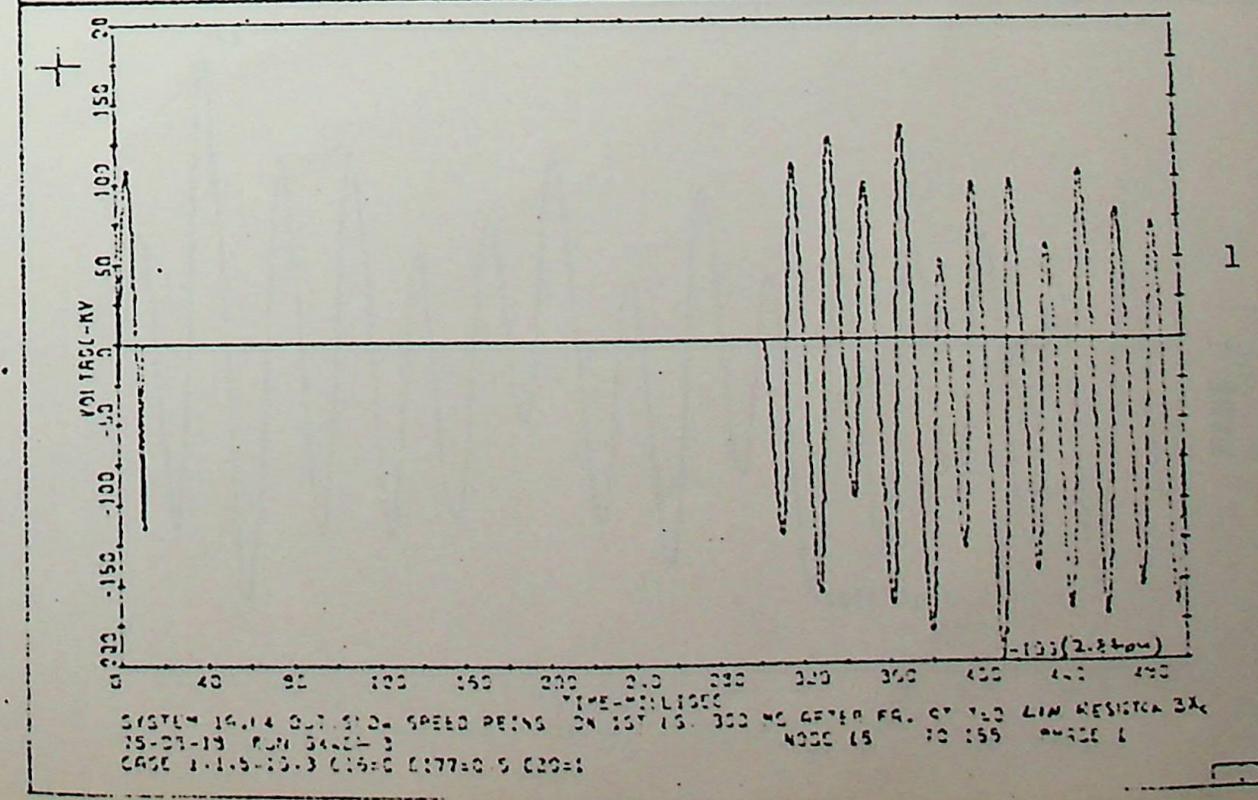
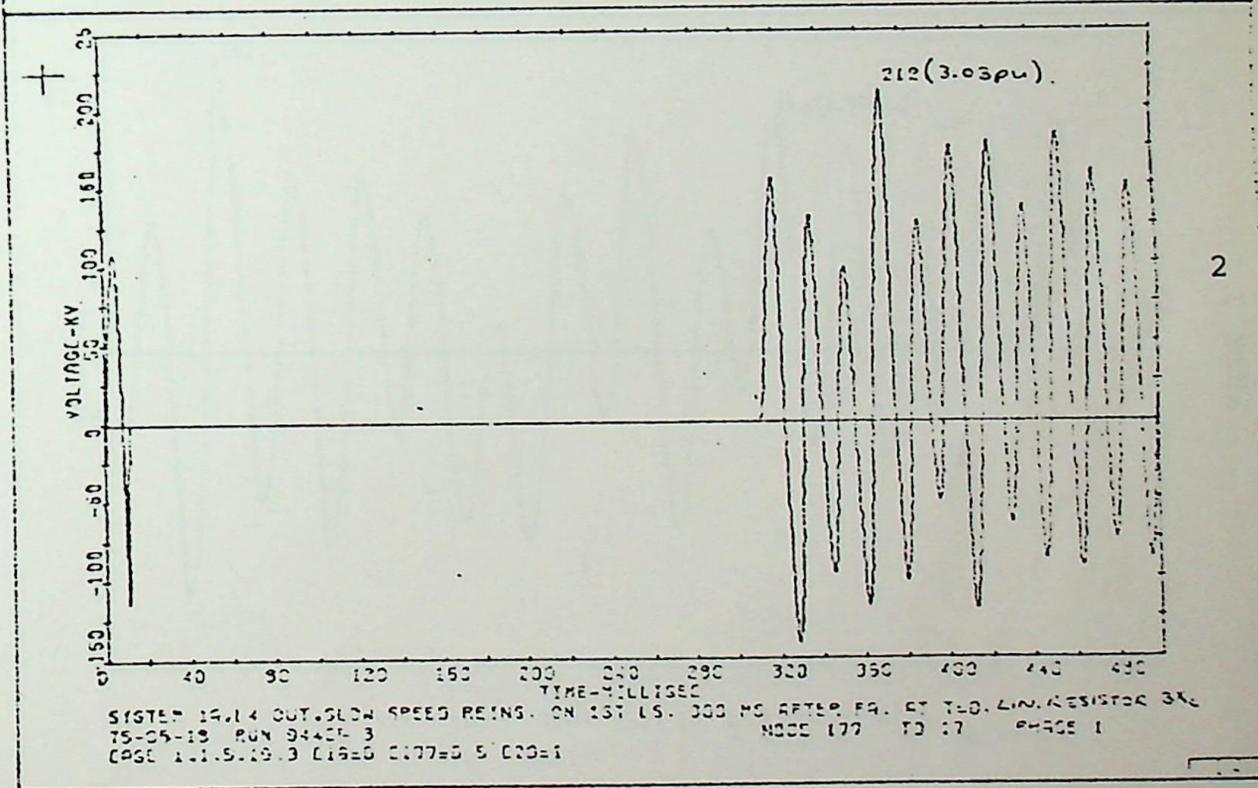
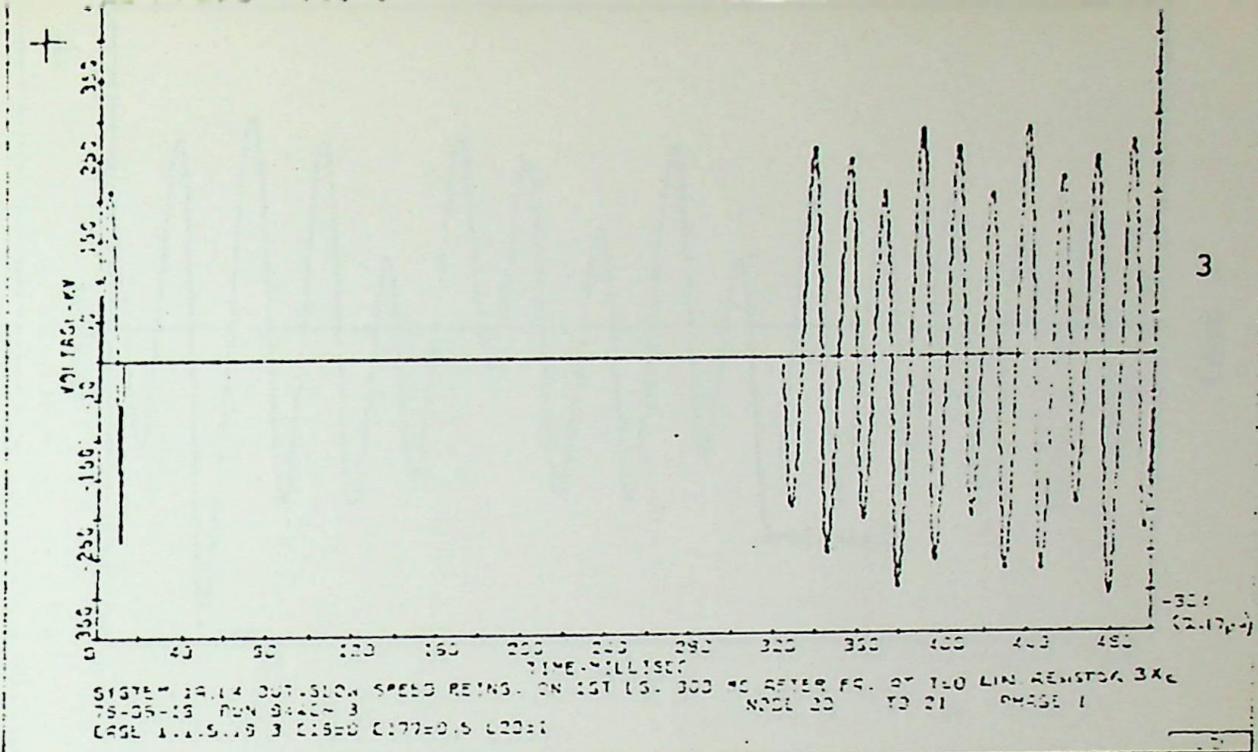


FIG. 32

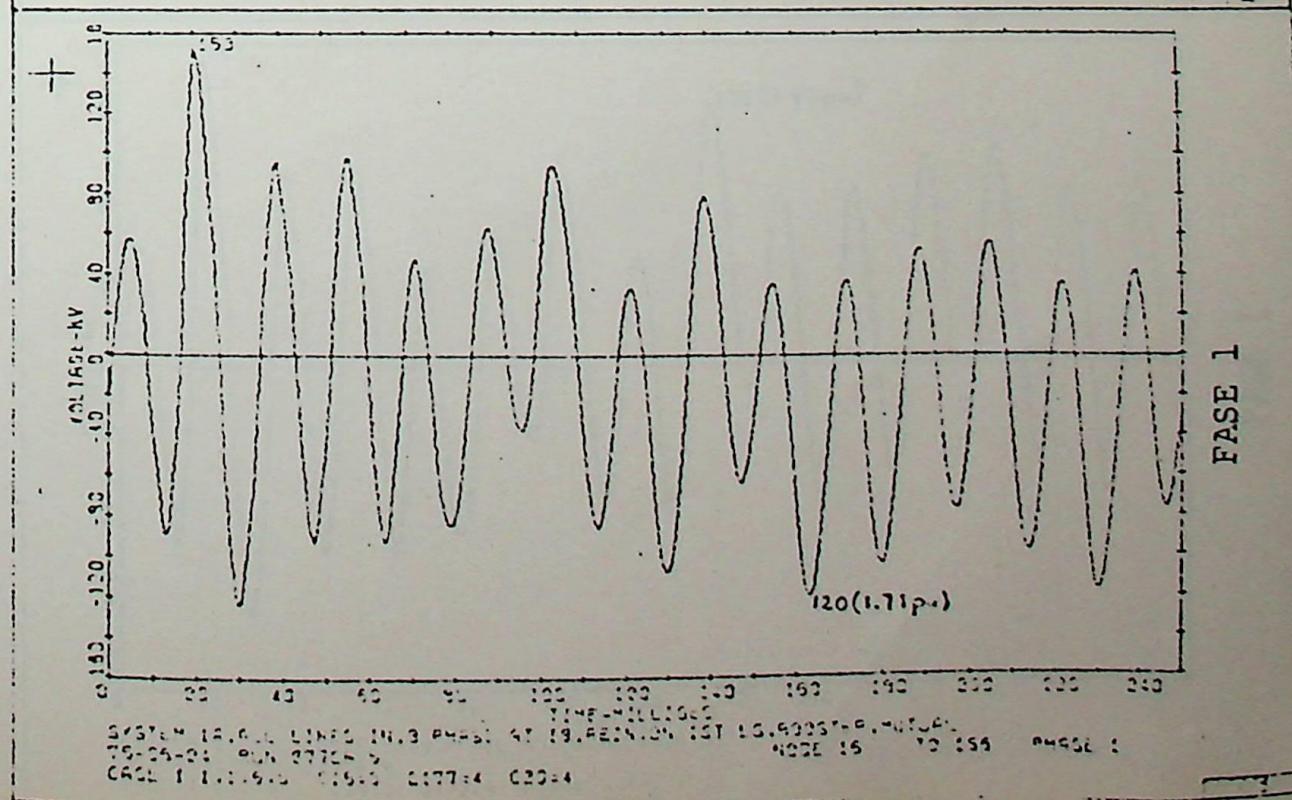
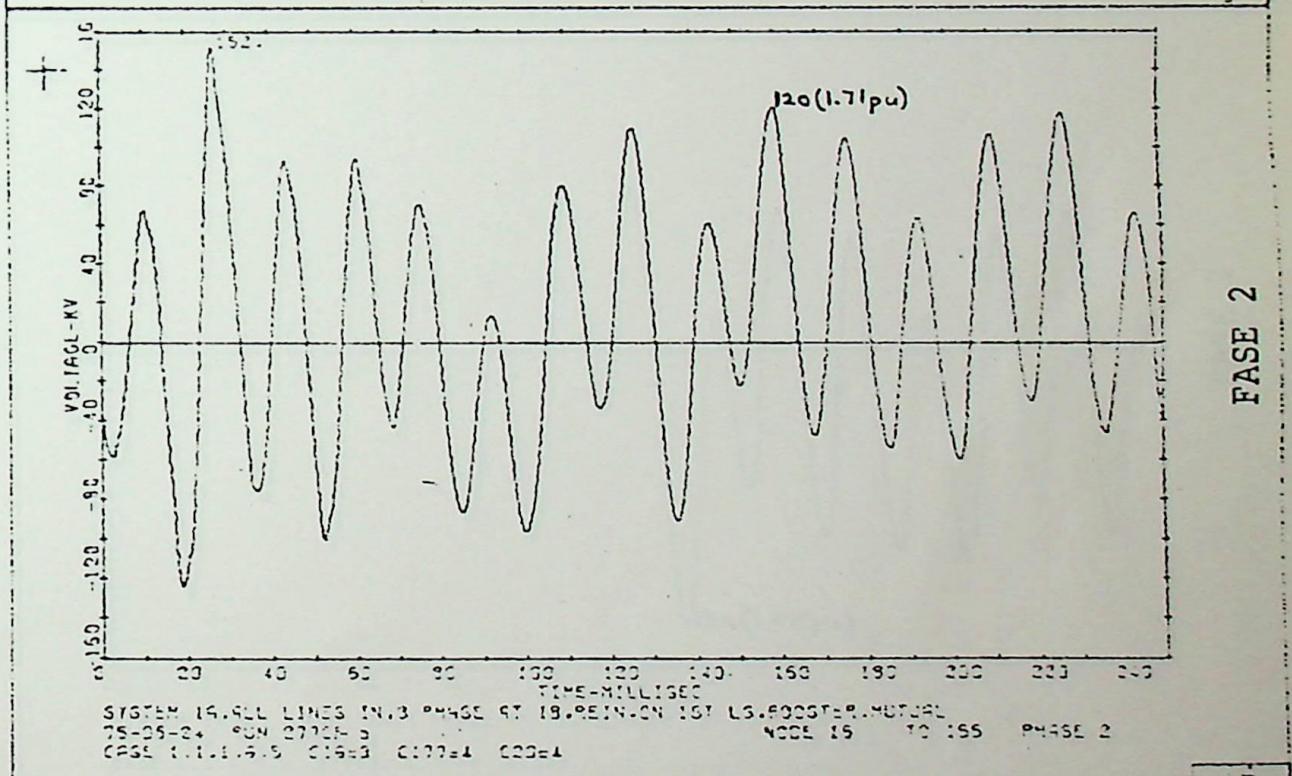
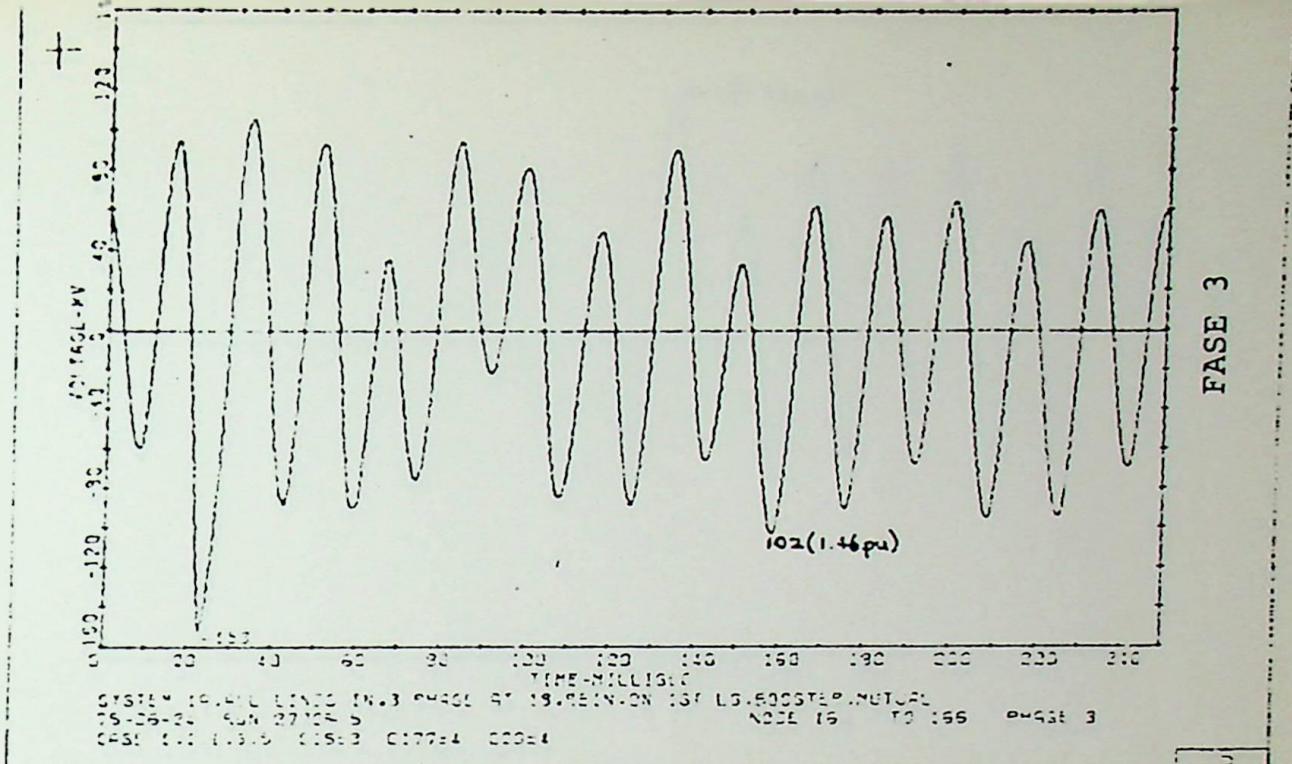


FIG. 33-A

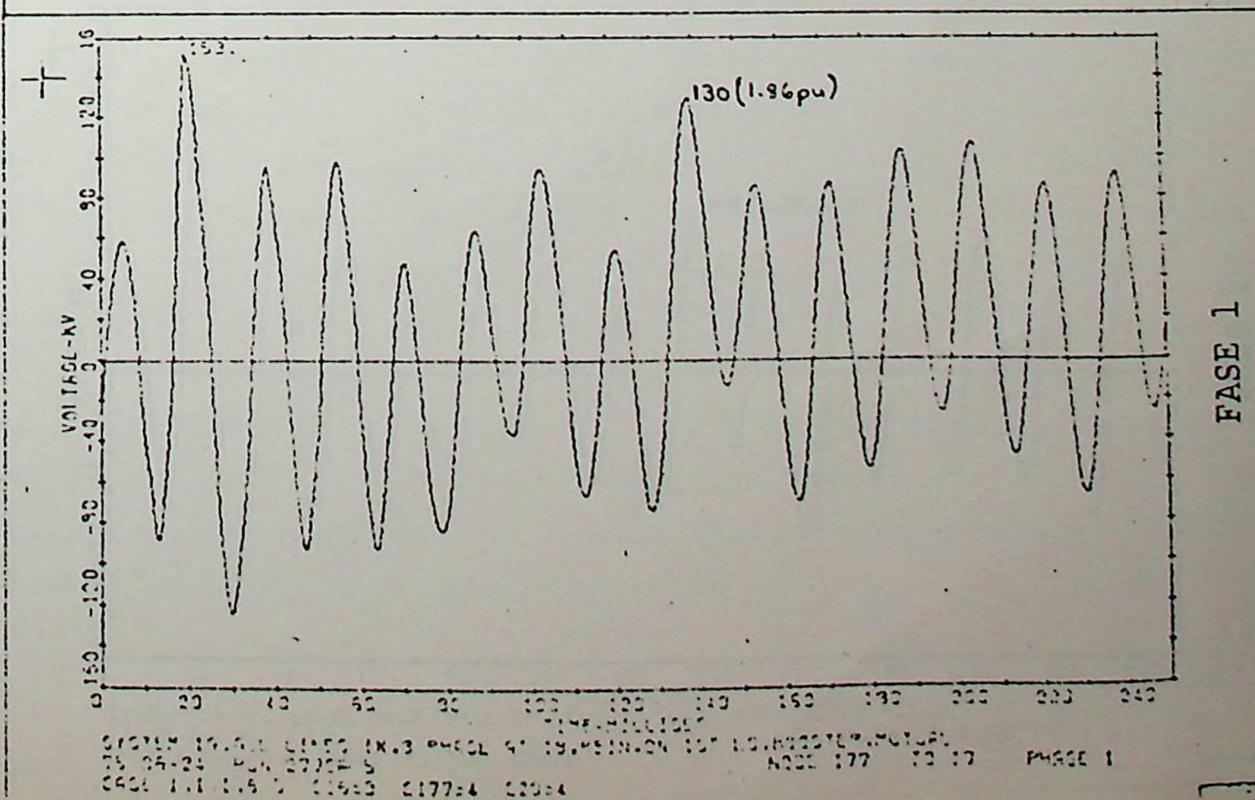
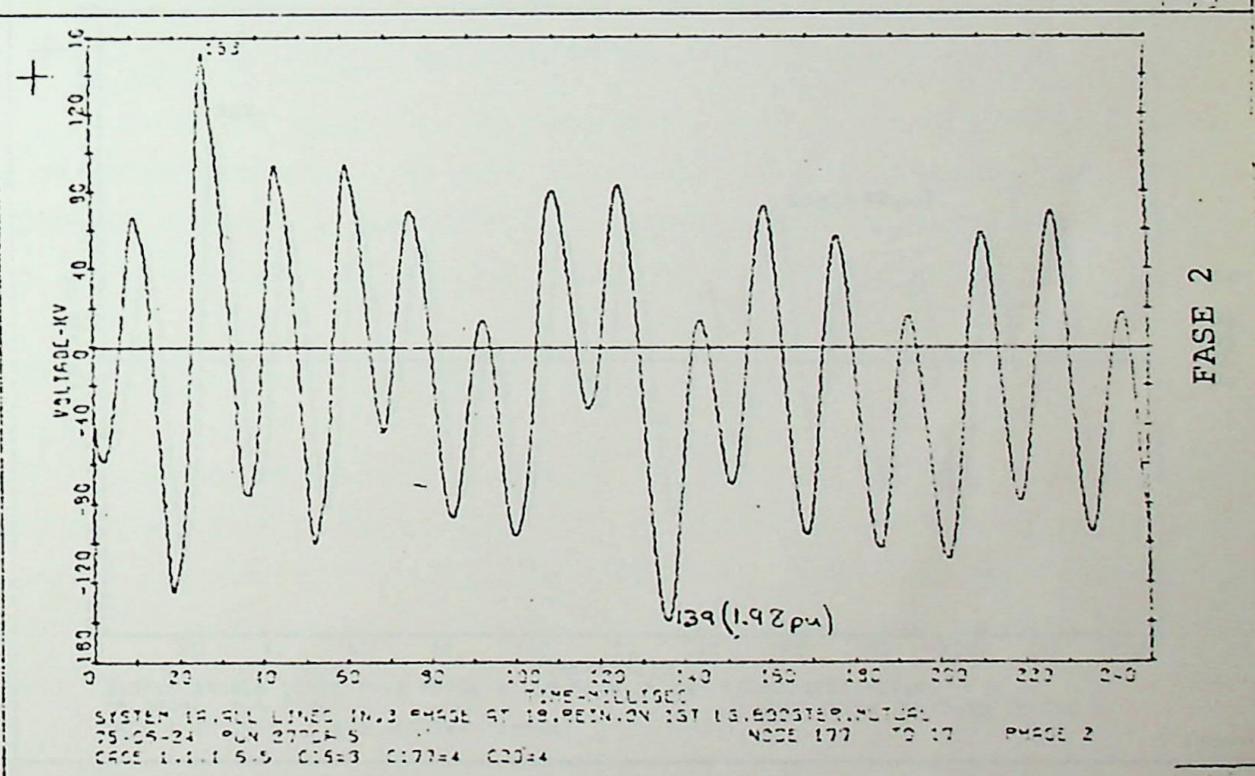
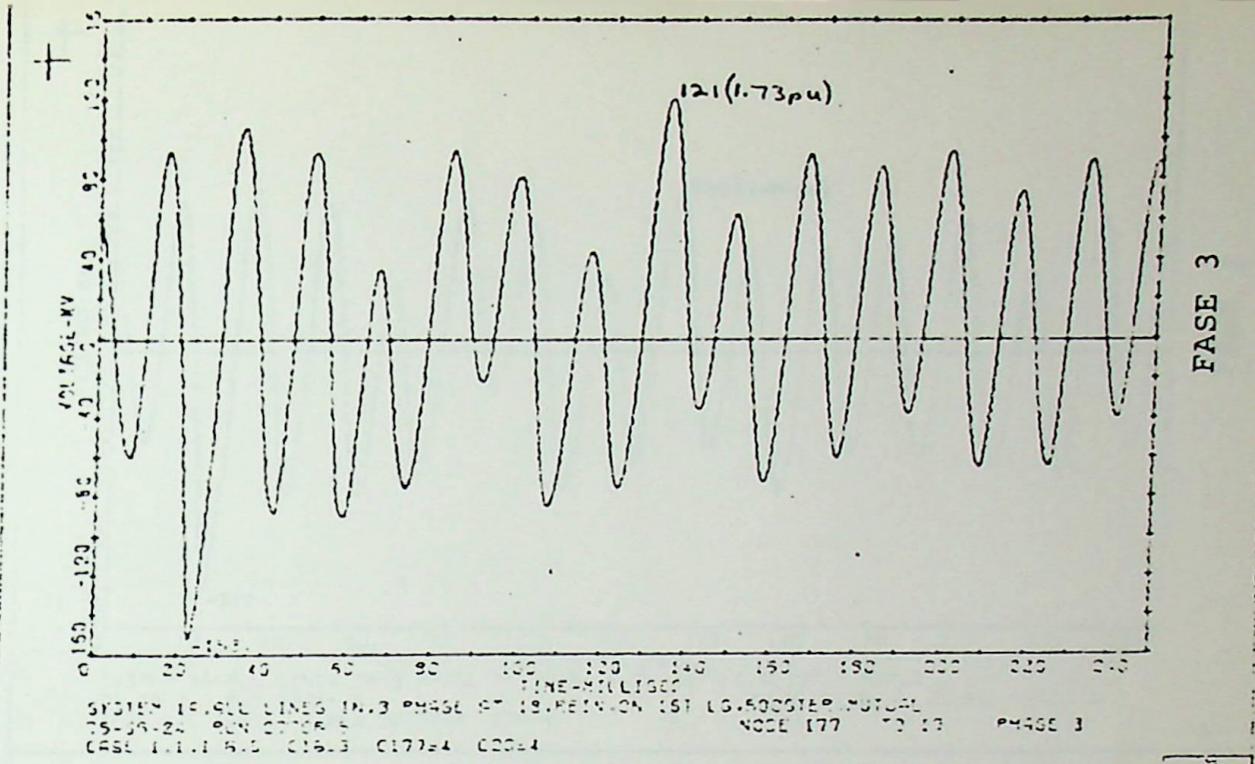
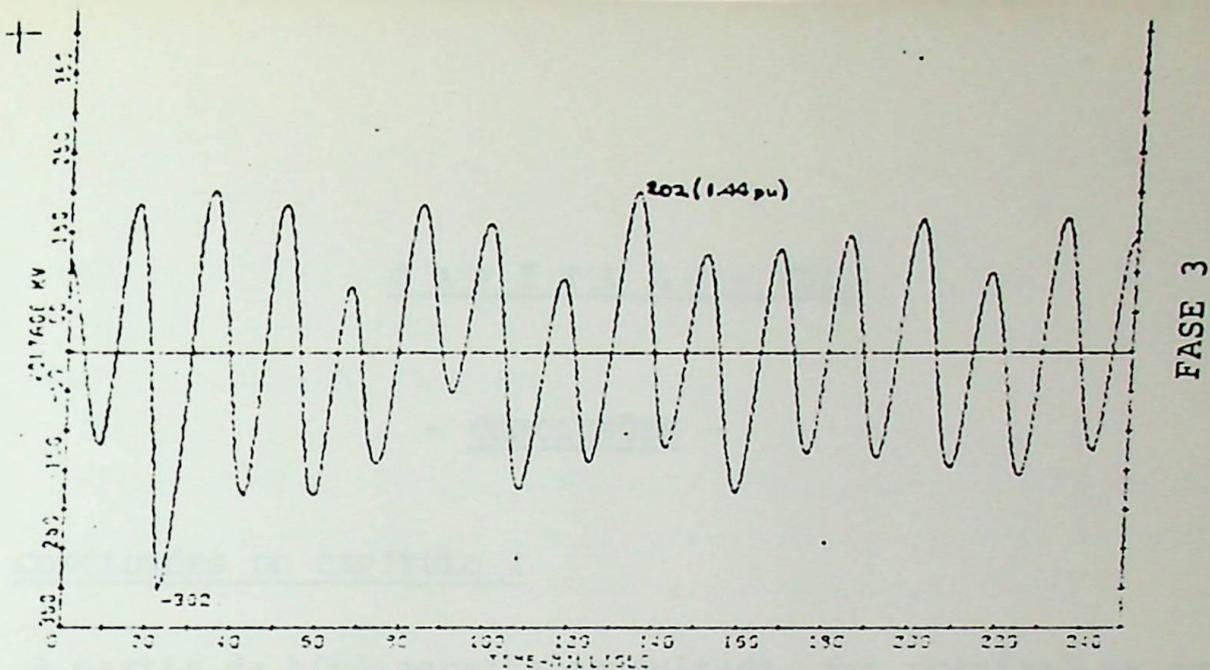
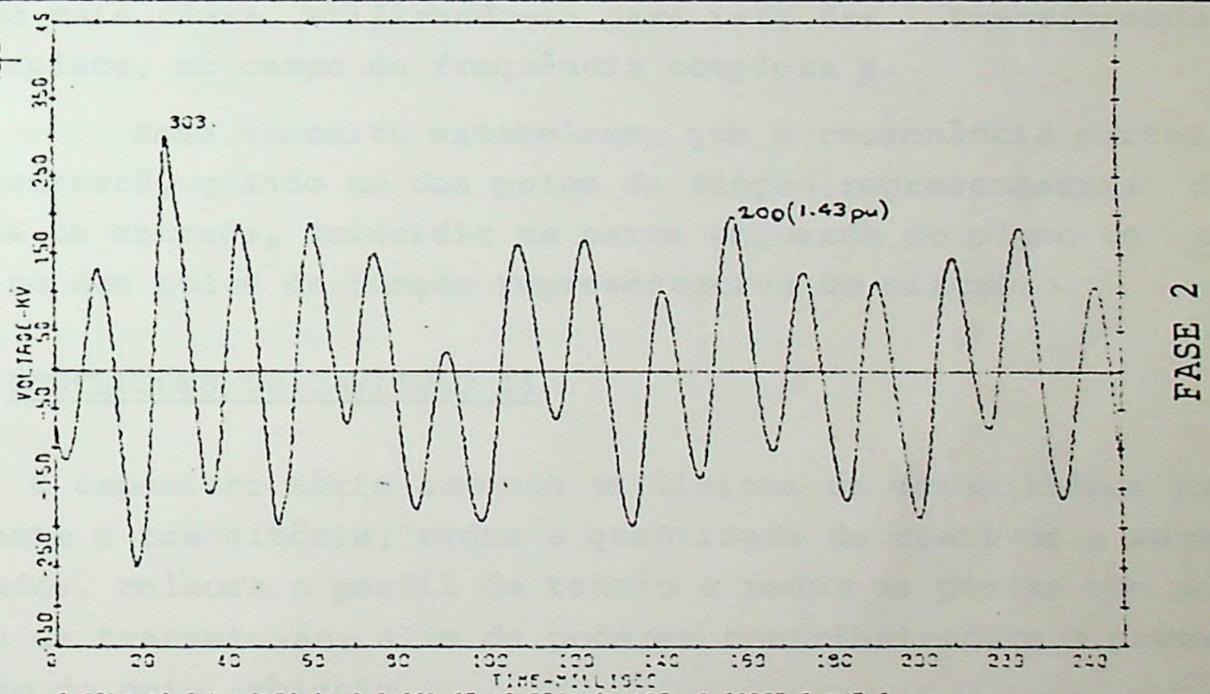


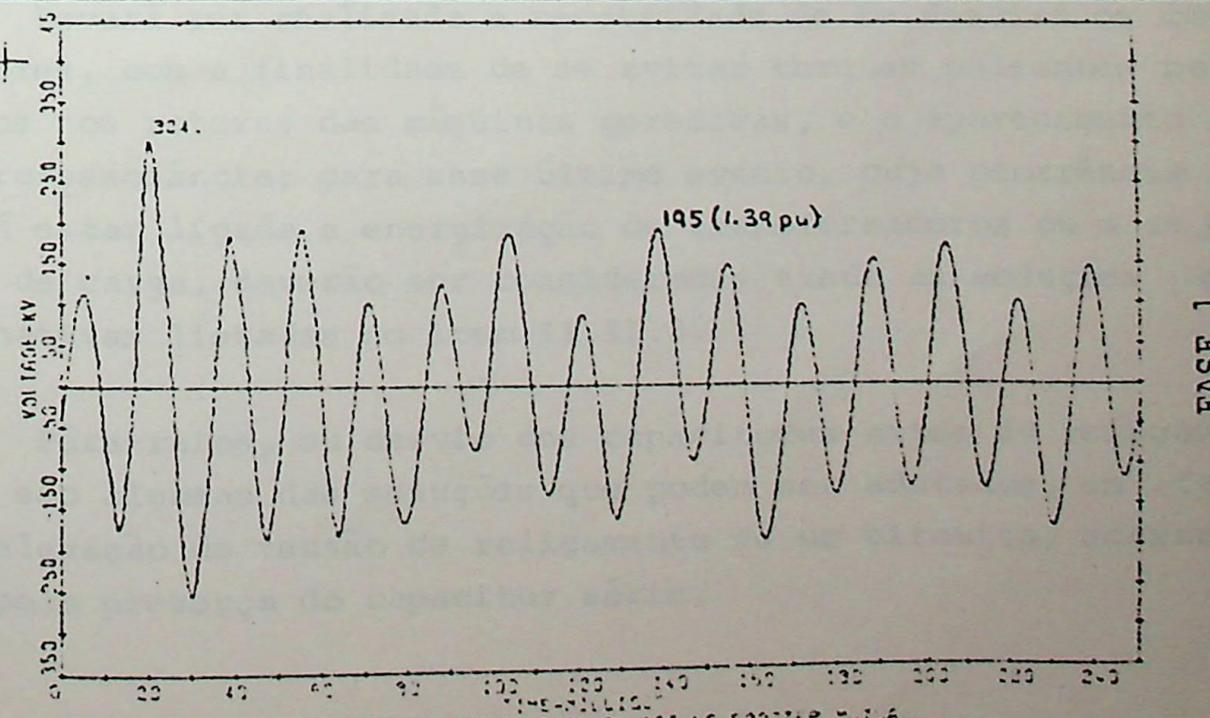
FIG. 33-R



SYSTEM 15, ALL LINES IN 3 PHASE AT 15. REIN. ON 1ST 15. BOOSTER, MUTUAL
 15-05-24 RUN 0770-5 NODE 20,22 TO 24,23 PHASE 3
 CASE 1 1.1 1.5 5 0.9-3 C177=4 C20=4



SYSTEM 15, ALL LINES IN 3 PHASE AT 15. REIN. ON 1ST 15. BOOSTER, MUTUAL
 15-05-24 RUN 0770-5 NODE 20,22 TO 24,23 PHASE 2
 CASE 1 1.1 1.5 5 0.9-3 C177=4 C20=4



SYSTEM 15, ALL LINES IN 3 PHASE AT 15. REIN. ON 1ST 15. BOOSTER, MUTUAL
 15-05-24 RUN 0770-5 NODE 20,22 TO 24,23 PHASE 1
 CASE 1 1.1 1.5 5 0.9-3 C177=4 C20=4

FIG. 33-C

C A P Í T U L O - V I I

- CONCLUSÕES -

1. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO I

1.1 A partir da bibliografia consultada, foi possível se emitir um conceito matemático para ressonância elétrica, de uma forma mais clara, utilizando-se para isto das transformadas de Laplace, no campo da frequência complexa s .

Esse conceito estabelece, que a ressonância perfeita ocorrerá, quando um dos polos da função representativa da fonte de entrada, coincidir na parte esquerda do plano de s , com um dos polos da função representativa do circuito.

2. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO II

2.1 O capacitor série aumenta os limites de estabilidade permanente e transitória, reduz a quantidade de reativos a serem gerados, melhora o perfil de tensão e reduz as perdas num sistema de transmissão, além de poderem contribuir para a preservação do meio ambiente.

2.2 Deverá ser analisada a necessidade de se desviar os capacitores, com a finalidade de se evitar torques pulsantes perigosos nos rotores das máquinas geradoras, e o aparecimento da ferroressonância; para esse último evento, cuja ocorrência poderá estar ligada a energização de transformadores ou a rejeição de carga, deverão ser consideradas ainda as soluções alternativas listadas no item II.11.3.

2.3 Pára-raios, ou desvio dos capacitores antes do religamento, são algumas das soluções que podem ser adotadas, em face da elevação da tensão de religamento de um circuito, acarretada pela presença do capacitor série.

2.4 Devido às oscilações subsíncronas ou subharmônicas, deverá ser dada ênfase à especificação do tempo de extinção do arco, nos disjuntores o ar comprimido.

2.5 O capacitor série acarreta ainda para os disjuntores, uma maior tensão de restabelecimento transitória, quando da eliminação de defeitos, o que entretanto é facilmente contornável, pela utilização de resistores de pré-inserção.

2.6 Em caso de desvio dos capacitores devido a ocorrência de defeitos em linhas adjacentes, haverá geração de tensões oscilantes nos sistemas de desvio desses capacitores, que, ao se propagarem pelo sistema, podem ocasionar a elevação da sua tensão a 60 Hz; é necessário que os elementos L e R, que compõe o circuito de amortecimento do sistema de desvio, sejam bem dimensionados, a fim de que não haja risco de ocorrerem sobretensões no instante inicial da ocorrência do defeito, que possam comprometer os níveis de isolamento adotados para o sistema.

3. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO III

3.1 A localização do capacitor deverá ser escolhida, em função da obtenção de um menor nível de perdas, de uma menor quantidade de reativos a serem gerados ou absorvidos nas condições de carga consideradas, de um maior fator de potência na estação receptora, etc.

3.2 É importante se considerar na escolha do item 3.1 acima, os fatores; segurança contra vandalismo, manutenção e controle; além disto, se faz necessária uma avaliação dos níveis de curto-circuito, a fim de que a escolha da localização seja realística, tendo em vista a capacidade dos equipamentos de desvio disponíveis.

3.3 Em circuitos que possuam reatores em derivação, é importante a localização relativa dos elementos capacitor e indu-

tor, a fim de que seja eliminada a possibilidade de ocorrência, de valores acentuados da corrente de arco secundária, e do aumento do valor da sobretensão de religamento. *bem como*

Uma vez que
3.4 Como o valor percentual da compensação série, é dependente de uma série de fatores, tais como, regulação, perdas, previsão de crescimento de carga, ferroressonância, ressonância subsíncrona, etc, não é possível estabelecer-se uma regra geral para essa escolha exigindo cada caso, a sua própria determinação.

4. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO IV

4.1 O impacto no sistema causado pela ocorrência de um curto-circuito, origina componentes subharmônicas, que, adicionadas à componente de frequência fundamental, ocasionam sobretensões perigosas para os bancos de capacitores.

4.2 No instante da reinserção dos capacitores, estes ficarão expostos a sobretensões, compostas de componentes da mesma forma que as do ítem 4.1 acima, porém, caso o banco seja dividido em módulos, sempre existirá a possibilidade da não simultaneidade de suas reinserções, e, a sobretensão resultante no último módulo a ser reinserido, se somarão as cargas armazenadas nos outros módulos já reinseridos.

4.3 A introdução de resistores em paralelo com os capacitores, no momento da ocorrência da reinserção, é um eficiente método para limitação das sobretensões resultantes; em consequência, menores ajustes de disparo para os gaps dos capacitores poderão ser obtidos, com a conseqüente diminuição do custo dos bancos.

4.4 A necessidade de rápida reinserção dos capacitores, se desviados devido a ocorrência de defeitos em linhas adjacentes a sua localização, ocorre em sistemas, *nos quais* onde sua ausência possa ser danosa à estabilidade transitória; se não for o ca-

so, poderá se admitir alto tempo de reinserção, porém, deverá ser levada em conta, a possibilidade de ocorrência da reinserção próximo ou no pico da corrente oscilante a 60Hz, que ocorre no sistema após a eliminação do defeito.

4.5 A escolha do sistema de desvio dos capacitores, deve ser criteriosa no que se relaciona ao tempo de reinserção, capacidade de seus equipamentos de desvio, dimensionamento de seus elementos de amortecimento, do resistor de reinserção e do reator de descarga.

4.6 É importante, que se represente os tipos disponíveis de sistemas de desvio, por ocasião das simulações para a determinação do ajuste do gap, a fim de que possam ser obtidos resultados, os mais próximos possíveis da realidade.

5. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO V

5.1 A determinação do ajuste do gap, deverá se basear em critérios, que ocasionem aos capacitores, as maiores sobreensões de reinserção, após a operação dos sistemas de desvio.

5.2 Devido aos numerosos testes, que devem ser executados nas aplicações de faltas e nas simulações de reinserção, é importante que se faça um estudo econômico para a escolha do aparelho simulador, já que o Analisador de Transitórios em Circuitos e o Computador Digital, se equivalem tecnicamente para essa finalidade.

5.3 Com o conhecimento da tensão de restabelecimento do gap, após o seu disparo, deverá ser estabelecida uma margem segura entre ela, e a máxima tensão de reinserção retirada dos testes executados; será possível, então, a determinação da mínima tensão de disparo do gap, que, adicionada à margem de precisão de sua atuação, resultará na escolha da máxima tensão de disparo, que é o fator determinante para o custo do banco de capacitores.

6. CONCLUSÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

6.1 Da análise dos problemas a serem considerados, ao se adotar compensação série em um sistema de transmissão, pode-se concluir, que, apesar do capacitor contribuir positivamente em termos de melhoria da capacidade de transmissão, estabilidade, etc, vários são os efeitos negativos ocasionados pela sua presença, que se não solucionados convenientemente, poderão ser danosos ao sistema.

6.1.1 Foi visto por exemplo, que a introdução do capacitor série, poderá ser a causa, do aparecimento do fenômeno da ferroressonância e dos esforços torsionais nos eixos das máquinas geradoras, do aumento da sobretensão de religamento, do aumento da tensão de recuperação transitória dos disjuntores etc. A título de sugestão, o autor deste trabalho recomenda, em adição aos tópicos abordados, que se estude os efeitos do desligamento de uma linha, com capacitores série e reatores shunt (figura 3-A, Capítulo II), quando houver abertura de apenas um dos polos do último disjuntor a abrir.

6.2 Embora sejam de ordem complexa, uma parte dos problemas advindos da utilização dos bancos de capacitores série, podem ser solucionados, escolhendo-se adequadamente os ajustes de seus gaps e elementos associados aos sistemas de desvio dos capacitores; é, portanto, de fundamental importância, que sejam desenvolvidos os estudos para essas determinações, no que se relaciona (ainda e) principalmente, à estabilidade do sistema de potência.

6.2.1 Do exposto neste trabalho, sobre o estudo relativo à escolha do ajuste do gap do capacitor, pode-se concluir que a escolha do aparelho simulador para o seu processamento, seguindo-se o roteiro sugerido no Capítulo V, é importante sob o aspecto econômico, e que o Analisador de Transitórios em Circuitos pode ser recomendado, desde que sejam providos meios para a realização de testes trifásicos, e que seja admissível a re

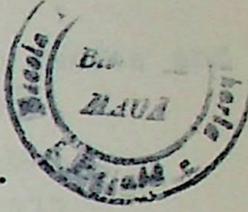
apresentação de um maior número de linhas do que os aparelhos atuais.

6.2.2 Pode-se verificar ainda, que os números casos de aplicação de falta e da sequência de reinserção, sugerem a execução de um estudo probabilístico de disparo do gap, que, apesar de não ter o seu roteiro estabelecido neste trabalho, poderá ser um tema para desenvolvimentos futuros.

6.3 Portanto, tendo em vista o aperfeiçoamento da técnica construtiva dos bancos de capacitores, e de seus sistemas de desvio, (nos últimos anos), deverá ser sempre analisada a utilização desses elementos em série nas linhas de transmissão, quando se estiver cogitando da utilização de métodos alternativos, para a obtenção de melhoria nos sistemas de potência; como argumentação básica, estão o custo, seus efeitos positivos no sistema e as sempre possíveis soluções para seus efeitos negativos.

6.3.1 Finalizando, o autor espera que este trabalho tenha servido como uma contribuição teórica e prática para a aplicação dos capacitores série nos sistemas de potência; teórica, porque com o conceito matemático (emitido para a ressonância, e a análise da ferroressonância, alguns efeitos dos capacitores, tornam-se mais ^{evidentes} facilmente visualizados; prática, porque oferece como sugestão, um roteiro para se escolher o ajuste do gap, além de indicar os principais problemas a serem considerados, quando do uso do capacitor série.

- B I B L I O G R A F I A -

- 
- 1 - Linear Circuits - R. E. Scott - Volumes 1 e 2.
 - 2 - The Analysis of Linear Circuits - C. M. Close.
 - 3 - Electrical Transients in Power Systems - Allan Greenwood.
 - 4 - Series Capacitors for Transmission Circuits - E. C. Starr, R. Evans - AIEE 42-112, pp 963-973, 1942.
 - 5 - The Use of Series Capacitors on High Voltage Transmission Systems - S. Lalander, L. Norlin - Cigre, Report nº 330, 1958.
 - 6 - 380 kV Series Capacitors in Sweden - G. Jancke, K. S. Smedsfelt, P. Hjertberg - Cigre, Report nº 332, 1954.
 - 7 - Electric Power Transmission - J. Zaborszky, J. W. Rittenhouse.
 - 8 - Solutions to the Problems of Subsynchronous Resonance in Power System With Series Capacitors - Lee A. Kilgore, Edgard R. Taylor Jr., Donald G. Ramey, R. G. Farmer, Eli Katz, Arnold L. Schwalb - IEEE, Proc. Vol. 35, pp. 1120 - 1128, 1973.
 - 9 - Subsynchronous Resonance in Series Compensated Transmission Lines - John W. Ballance, Saul Goldberg T 73167/4 - IEEE PES Winter Meeting, N. Y., 1973.
 - 10 - Self Excited Oscillations in Compensated Transmission Systems - R. Sreedharan, R. B. Ghodgaonkar. C 73 166/4 - IEEE PES Winter Meeting, N. Y. 1973.
 - 11 - Series Compensated Lines - Voltages Across Circuit Breakers and Terminals Caused by Switching - D. D. Wilson - T 72 565-0 - IEEE PES Summer Meeting, São Francisco, 1972.

- 12 - Overvoltages on EHV Transmission Lines Due to Faults and Subsequent Bypassing of Series Capacitors - V. Madzarevic, F. K. Tseng, D. H. Woo, W. D. Niebuhr - F 77 237-1 - IEEE PES Winter Meeting N. Y., 1977.
- 13 - Física II - Eletricidade e Magnetismo - Francis Weston Sears.
- 14 - Transformer Engineering - L. F. Blume, A. Boyafion, G. Camilli, T. C. Lennox, S. Munneci, V. M. Montsinger.
- 15 - Transient in Power Systems - Harold A. Peterson.
- 16 - The J. & P. Transformer Book - Stigant, Lacey e Franklin.
- 16-A Energização de Transformadores de Grande Potência com Fontes Capacitivas e de Baixa Potência - Weide Sato. V Seminário Nacional de Produção e Transmissão de E. Elétrica - Recife - 1979.
- 17 - Fundamental Effects of Series Capacitors in High - Voltage Transmission Lines - A. A. Johnson, J. E. Barkle, D. J. Povejsil - AIEE, Volume 70, pp. 526-536, 1951.
- 18 - Transients Voltages and Currents in Series - Compensated E. H. V. Lines - F. Illoceto, E. Cinieri, M. Cazzani, G. Santagostino - IEE, Volume 123, pp. 811-817, 1976.
- 19 - A Study of Reinsertion Voltages and Currents for Series Capacitors on USBR GLEN CANYON, Flagstaff 345 KV Lines - IEEE, CP 664 - PWR - Summer Meeting, 1971, L. W. Lloyd, F. G. Berg, E. Taylor.
- 20 - Manual da ASEA s/Capacitores Série (tema do Simpósio apresentado em Outubro de 1974 - Rio de Janeiro).
- 21 - Manual da Westinghouse s/Capacitores Série (tema do Simpósio apresentado em Outubro de 1974 - Rio de Janeiro).
- 22 - Series Capacitor Reinsertion Overvoltages Study for Itaipu System - Volumes 1 a 6 - Furnas - Centrais Elétricas.

- 23 - Series Capacitors - A General Description - Pamphlet 40 - 102 E ASEA 1971.
- 24 - Series Capacitors for Substations - Information KT 400 - 102 E ASEA 1972.
- 25 - Progress in the Design and Manufacture of Series Capacitors - Cigre, Report n° 141 - 1966.