
1 APRESENTAÇÃO

A área de transitórios eletromagnéticos envolve uma ampla gama de fenômenos, provocados por variações súbitas de tensão ou corrente nos sistemas elétricos, inicialmente em estado de regime permanente na grande maioria dos casos. Essas variações súbitas de tensão e corrente são provocadas por descargas atmosféricas, faltas no sistema ou operação de disjuntores. Um estudo de transitórios tanto pode levar à especificação dos dispositivos de proteção dos equipamentos de um sistema elétrico quanto permitir a determinação dos motivos que provocaram uma perturbação no sistema.

Assim esta apostila é o primeiro passo para que os alunos da graduação do Departamento de Engenharia Elétrica e Sistemas de Potência da UFPE tenham contato com os fenômenos que envolvem os transitórios eletromagnéticos estudando suas causas e procurando soluções que minimizem seus efeitos nos sistemas elétricos.

Cada aula prática procura dar enfoque a um assunto específico tratado na disciplina de Equipamentos Elétricos não pretendendo-se portanto ensinar, mas apenas sedimentar os conhecimentos dos tópicos abordados.

A primeira prática tem como objetivo apenas apresentar o ATPDRAW e fornecer os subsídios necessários para que o aluno possa desenvolver as demais práticas. A partir da segunda prática a apostila apresenta uma estrutura definida de forma a fornecer um resumo teórico do assunto abordado, a modelagem do circuito para simulação no ATPDRAW e um questionário onde o aluno será indagado sobre os resultados obtidos durante as simulações.

A maioria dos modelos utilizados na apostila é resultado de uma colaboração da Divisão de Estudos de Alta Tensão - DEAT da Companhia Hidroelétrica do São Francisco - CHESF, fazendo assim com que os casos estudados estejam o mais próximo possível da realidade.

Apresentada a apostila, espera-se que ela seja utilizada da melhor forma possível e que seja incentivo para trabalhos posteriores no mesmo sentido.

2 SUMÁRIO

PRÁTICA 01 - INTRODUÇÃO AO ATPDRAW - CASO INICIAL _____	03
PRÁTICA 02 - MANOBRAS DE BANCOS CAPACITORES - ENERGIZAÇÃO E ABERTURA _____	15
PRÁTICA 03 - ENERGIZAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO _____	22
PRÁTICA 04 - TENSÃO TRANSITÓRIA DE RESTABELECIMENTO _____	27
PRÁTICA 05 - REJEIÇÃO DE CARGA _____	33
PRÁTICA 06 - ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADORES _____	40
PRÁTICA 07 - INJEÇÃO DE SURTOS EM SUBESTAÇÕES - DESCARGAS ATMOSFÉRICAS _____	45
PRÁTICA 08 - SOBRETENSÕES PROVOCADAS POR CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO _____	50
PRÁTICA 09 - MÉTODOS DE CONTROLE DAS SOBRETENSÕES - USO DO RESISTOR DE PRÉ-INSERÇÃO _____	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____	65

PRÁTICA 01

INTRODUÇÃO AO ATPDRAW - CASO INICIAL

1 OBJETIVO

Apresentar o ATPDRAW fornecendo os subsídios necessários para que possamos desenvolver as demais práticas.

2 O ATPDRAW

O ATPDRAW é um preprocessador para o ATP (Alternative Transients Program). É resultado da cooperação entre Bonneville Power Administration e Norwegian Electric Power Research Institute.

O ATPDRAW foi desenvolvido motivado pelas facilidades operacionais encontradas no ambiente Windows. No ATPDRAW o usuário constrói o seu circuito na tela, selecionando os componentes de seu circuito nos menus oferecidos, fazendo as devidas conexões e fornecendo os parâmetros necessários, que são solicitados ao usuário pelo ATPDRAW. Como resultado o ATPDRAW cria um arquivo de extensão "ATP" que servirá de entrada para o ATP.

3 USANDO O ATPDRAW

A tela principal do ATPDRAW esta mostrada na Figura 1. Nesta tela serão desenvolvidas todas as etapas necessárias para a montagem dos circuitos no ATPDRAW. Através dos menus presentes na tela principal iremos gerar um arquivo de saída para o ATP.

Os meus encontrados na tela principal são:

- ◆ **File:** Carrega e salva os circuitos, imprime e finaliza o programa;
- ◆ **Edit:** Seleciona objetos ou grupo de objetos, copia, rotaciona, apaga;
- ◆ **View :** Habilita e desabilita a Toolbar , controla o zoom, renova o desenho e controla as opções de visualização dos componentes;
- ◆ **ATP:** cria as entradas para o arquivo do ATP (cartão miscellaneous);
- ◆ **Objects:** Edita e cria objetos modelados pelo usuário;
- ◆ **Tools:** Chama os editores auxiliares e configura as opções do programa;
- ◆ **Window:** configura as janelas de montagem de circuito e habilita a janela de mapa;
- ◆ **Help:** Ajuda sobre menus e componentes do ATPDRAW.

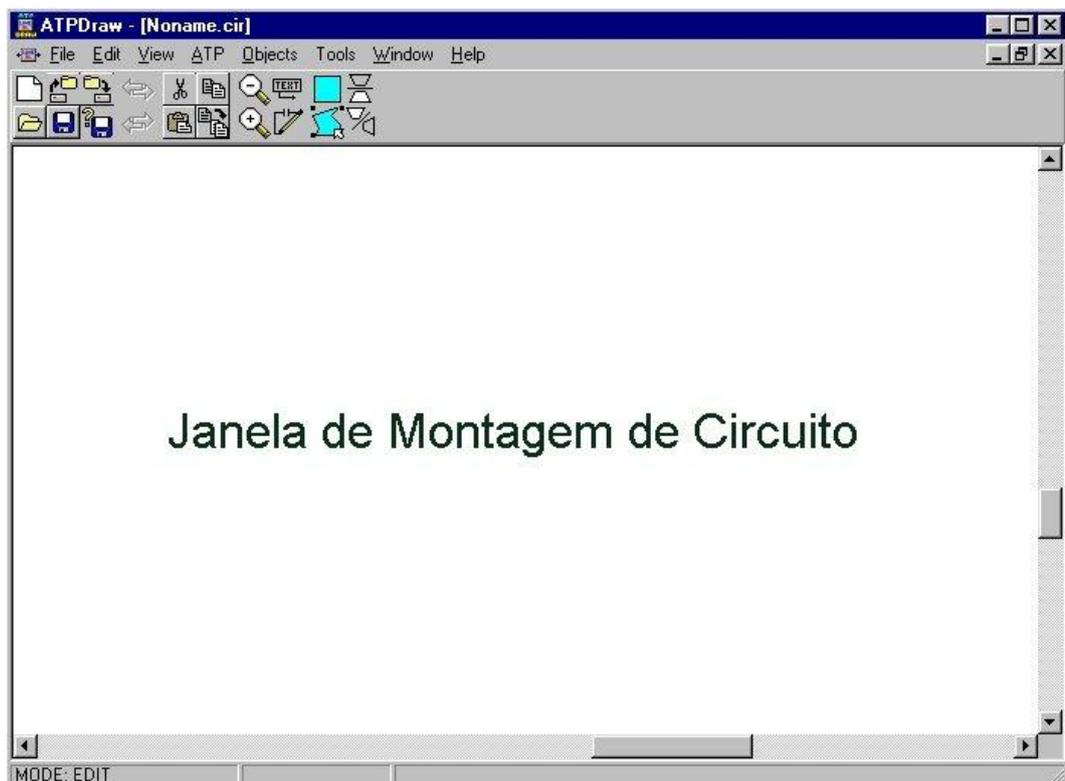


FIGURA 1 - TELA PRINCIPAL DO ATPDRAW

Um outro menu importante do ATPDRAW é o Menu de seleção. Neste menu o usuário pode escolher quais componentes vai utilizar para modelar seu circuito.

Para termos acesso ao menu de seleção basta clicarmos com o botão direito do mouse na janela de montagem de circuito e assim o menu será aberto. O menu está mostrado na Figura 2.

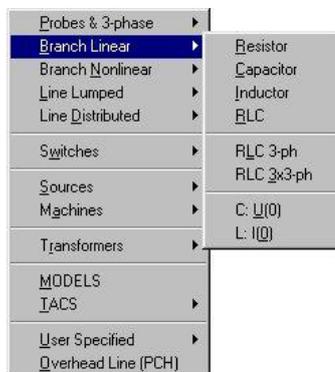


FIGURA 2 - MENU DE SELEÇÃO

No menu de seleção estão disponíveis todos os componentes de circuito do ATPDRAW. Ao selecionarmos um componente no menu de seleção basta clicarmos sobre a janela de montagem de circuito para que o componente seja inserido no circuito. Após a colocação do elemento na janela de montagem de circuito podemos movimentá-lo livremente por toda a janela bastando apenas clicar com o botão esquerdo no mouse e arrastá-lo. Com a posição de colocação do componente definida devemos então configurar seus parâmetros, para isto devemos clicar no componente com o botão direito do mouse. Será aberta uma janela onde entraremos com os parâmetros do componente, isto pode ser visto na Figura 3.

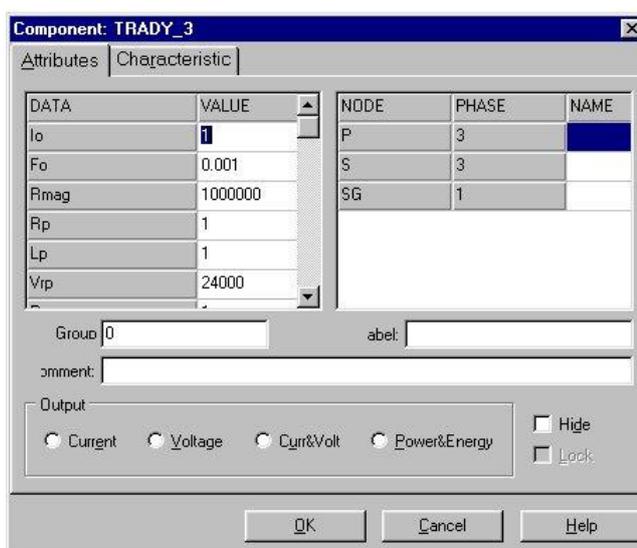


FIGURA 3 - JANELA DE CONFIGURAÇÃO DOS PARÂMETROS DO COMPONENTE

Na janela de configuração dos parâmetros dos componentes podemos também solicitar algumas saídas para este componente. Isto é feito através dos botões de seleção de Output onde podemos escolher como saídas : tensão, corrente, corrente & tensão e potência & energia.

A seguir mostraremos uma lista dos principais modelos de componentes do ATPDRAW que utilizaremos nas práticas seguintes com uma breve explanação sobre seus parâmetros de configuração.

Modelos de Componentes do ATPDRAW

Prob. Volt. - Voltímetro		Prob. Curr. - Amperímetro	
	Escolher o número de fases		Escolher o número de fases
Chave Monofásica		Chave Trifásica	
	T-cl = instante de fechamento da chave em segundos		T-cl = instante de fechamento da chave em segundos
	T-op = instante de abertura da chave em segundos		T-op = instante de abertura da chave em segundos
	Imar = corrente máxima que a chave pode abrir		Imar = corrente máxima de a chave pode abrir
Capacitor		Resistor	
	C= em [uF] se Copt.=0 C= em uMho se Copt = freqüência do sistema		R = em OHMS
Indutor		Resistor Não Linear Tipo 99	
	L= em mH se Xopt.=0 L= em Ohms se Xopt = Freq. do sistema		Vflash = Tensão de flashover em [V] do gap
			Tdelay = Tempo mínimo para a atuação
			Jump = Número de segmentos para o início do cálculo.
			VSEAL = Abre o gap se a tensão for abaixo deste valor
RLC Monofásico		RLC Trifásico	
	R = em OHMS		R = em OHMS
	L= em mH se Xopt.=0		L= em mH se Xopt.=0
	L= em Ohms se Xopt=60Hz		L= em Ohms se Xopt=60Hz
	C= em [uF] se Copt.=0 C= em [uMho] se Copt = Freq. do sistema		C= em [uF] se Copt.=0 C= em uMho se Copt = Freq. do sistema

Splitter	
	Transforma um nó trifásico em 3 monofásicos

Linha RL Acoplada	
	Ro = resistência de seqüência zero em Ω
	Lo = indutância de seqüência zero em mH ou Ω
	R+ = resistência de seqüência positiva em Ω
	L+ = indutância de seqüência positiva em mH ou Ω

Linha Transposta Monofásica	
	R/l = Resistência em Ω/m
	A ILINE = 0 Indutância em mH/m ou Ω/m de acordo com Xopt
	ILINE = 1 ou 2 - Módulo da impedância de surto em Ω
	B ILINE = 0 - Capacitância em uF/m ou uMho/m de acordo com Copt
	ILINE = 1 - Velocidade de propagação em m/s
	ILINE = 2 - tempo de propagação
	L = comprimento da linha em km
	ILINE = configura a natureza dos parâmetros

Linha Trifásica Transposta	
	R/l+ = Resistência de seqüência positiva em Ω/m
	R/l0 = Resistência de seqüência zero em Ω/m
	A ILINE = 0 Indutância em mH/m ou Ω/m de acordo com Xopt
	ILINE = 1 ou 2 - Módulo da impedância de surto em Ω
	+ = seqüência positiva
	0 = seqüência zero
	B ILINE = 0 - Capacitância em uF/m ou uMho/m de acordo com Copt
	ILINE = 1 - Velocidade de propagação em m/s
	ILINE = 2 - tempo de propagação
	+ = seqüência positiva
	0 = seqüência zero
	L = comprimento da linha em km
	ILINE = configura a natureza dos parâmetros
	IPUNCH = 0 - Não considera a condutância da linha
	IPUNCH = 1 - considera a condutância da linha

Fonte Monofásica DC - Tipo 11	
	U/l = 0 Fonte de tensão
	U/l = -1 Fonte de Corrente
	Amp. = Amplitude em [V] ou [A]
	Tsta = Instante a partir do qual a fonte está ligada
	Tsto = Instante a partir do qual a fonte está desligada

Fonte Monofásica AC - Tipo 14	
	U/l = 0 Fonte de tensão
	U/l = -1 Fonte de Corrente
	Amp. = Amplitude em [V] ou [A]
	f = freqüência em Hz
	Pha = fase em graus ou segundo
	A1 = 0 fase em graus
	A1 > 1 fase em segundos
	Tsta = Instante a partir do qual a fonte está ligada
	Tsto = Instante a partir do qual a fonte está desligada

Fonte Trifásica - Tipo 14	
	U/I = 0 Fonte de tensão
	U/I = -1 Fonte de Corrente
	Amp. = Amplitude em [V] ou [A]
	f = freqüência em Hz
	Pha = fase em graus ou segundo
	A1 = 0 fase em graus
	A1 > 1 fase em segundos
	Tsta = Instante a partir do qual a fonte está ligada
	Tsto = Instante a partir do qual a fonte está desligada

Fonte 2-Slope Ramp. - Tipo 13	
	U/I = 0 Fonte de tensão
	U/I = -1 Fonte de Corrente
	Amp. = Amplitude em [V] ou [A]
	T0 = Tempo de subida em [s]
	A1 = Valor da função em T1
	T1 = Tempo para atingir 0.5 do valor máximo na descida
	Tsta = Instante a partir do qual a fonte está ligada
	Tsto = Instante a partir do qual a fonte está desligada

Transformador Δ/Y Saturável	
	Io = Corrente [A] de magnetização em regime permanente
	Fo = fluxo [Wb-turn] em regime permanente
	Rmag = resistência de magnetização em Ohms
	Rp = resistência do enrolamento primário
	Lp = indutância do enrolamento primário em mH se Xopt.=0
	Lp = indutância do enrolamento primário em Ohms se Xopt=60Hz
	Vrp = tensão em kV do enrolamento primário
	Rs = resistência do enrolamento secundário
	Lp = indutância do enrolamento secundário em mH se Xopt.=0
	Lp = indutância do enrolamento secundário em Ohms se Xopt=60Hz
	Vrs = tensão em kV do enrolamento secundário
	Lag = defasagem entre os enrolamentos (30 ou -30)
	RMS = 0 característica de saturação corrente/Fluxo
	RMS = 1 característica de saturação corrente/tensão

Transformador Y/Y/Δ Saturável	
	Io = Corrente [A] de magnetização em regime permanente
	Fo = fluxo [Wb-turn] em regime permanente
	Rmag = resistência de magnetização em Ohms
	Rp = resistência do enrolamento primário
	Lp = indutância do enrolamento primário em mH se Xopt.=0
	Lp = indutância do enrolamento primário em Ohms se Xopt=60Hz
	Vrp = tensão em kV do enrolamento primário
	Rs = resistência do enrolamento secundário
	Lp = indutância do enrolamento secundário em mH se Xopt.=0
	Lp = indutância do enrolamento secundário em Ohms se Xopt=60Hz
	Vrs = tensão em kV do enrolamento secundário
	Rt = resistência do enrolamento terciário
	Lt = indutância do enrolamento terciário em mH se Xopt.=0
	Lt = indutância do enrolamento terciário em Ohms se Xopt=60Hz
	Vrt = tensão em kV do enrolamento terciário
	Lag = defasagem entre os enrolamentos (30 ou -30)
RMS = 0 característica de saturação corrente/Fluxo	
RMS = 1 característica de saturação corrente/tensão	

Com os principais componentes mostrados iremos agora passa a discutir os parâmetros de configuração do ATPDRAW. Estes parâmetros estão baseados nos cartões de miscellaneuous do ATP. Os parâmetros são configurados através do menu ATP mostrado na Figura 4.



FIGURA 4 - MENU ATP

Onde:

- ◆ **Make Names** : verifica a consistência das informações sobre os nós do circuito;
- ◆ **Make File** : Gera o arquivo para ser rodado no ATP;
- ◆ **Edit File**: Edita o arquivo gerado por Make File;
- ◆ **Settings**: Abre a janela de configuração dos cartões de miscellaneuous.

Dos itens do menu ATP o que merece um maior detalhamento é a opção Settings pois é através desta opção que informaremos ao ATP os parâmetros de configuração. Na Figura 5 mostramos a janela de configuração dos parâmetros de simulação (1º cartão de miscellaneuous).

Onde:

- ◆ **DELTAT** : Passo de integração;
- ◆ **TMAX** : Período de simulação;
- ◆ **FREQ**: Freqüência do sistema;
- ◆ **XOPT** : Parâmetro de controle de indutâncias (se igual a 0 \Rightarrow L em mH, se igual a freqüência do sistema $\Rightarrow X_L = 2\pi fL$ em Ω);
- ◆ **COPT**: Parâmetro de controle de capacitâncias (se igual a 0 \Rightarrow C em μF , se igual a freqüência do sistema $\Rightarrow X_L = 2\pi fC$ em μMHO).

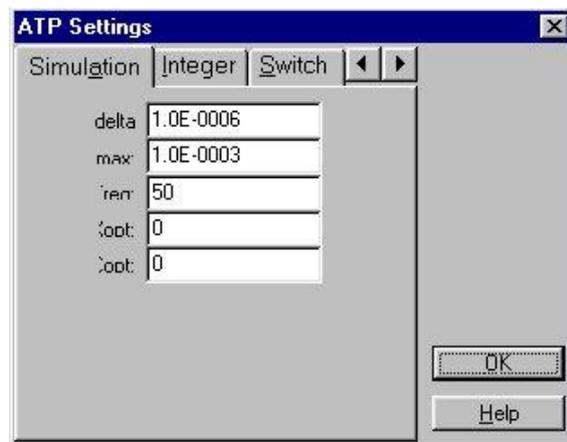


FIGURA 5 - JANELA DE CONFIGURAÇÃO DOS PARÂMETROS SIMULATION

Na Figura 6 mostramos a janela de configuração dos parâmetros Integer (2º cartão de miscellaneous). Onde :

- ◆ **IOUT:** Frequência para impressão dos resultados;
- ◆ **IPLLOT:** Frequência para plotagem dos resultados;
- ◆ **IDOUBL:** Impressão da tabela de conectividade (=1);
- ◆ **KSSOUT:** Impressão do regime permanente (=1);
- ◆ **MAXOUT:** Impressão dos valores máximos e mínimos (=1);
- ◆ **IPUN:** Mudança de frequência de impressão IOUT (= -1);
- ◆ **MENSAV:** descarregamento da memória em disco para reiniciar(=1);
- ◆ **ICAT:** Armazenamento permanente em disco dos dados para plotagem;
- ◆ **NENERG:** Processamento estatístico (= 0 determinístico).

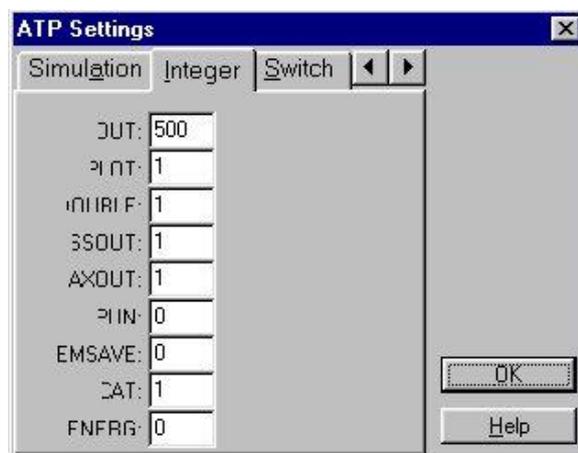


FIGURA 6 - JANELA DE CONFIGURAÇÃO DOS PARÂMETROS INTEGER

Os parâmetros dos cartões de miscellaneous deverão ser ajustado de acordo com as necessidades e objetivos das simulações a serem realizadas no ATP.

4 MODELAGEM NO ATPDRAW

Para nosso primeiro contato com o ATPDRAW iremos montar o circuito mostrado na Figura 7.

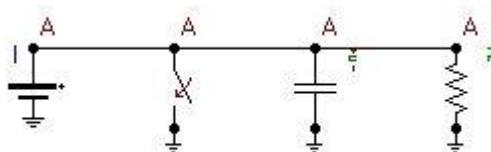


FIGURA 7 - CIRCUITO PARA SIMULAÇÃO

Como é nosso primeiro contato mostraremos passo a passo a montagem do circuito da Figura 7 :

Primeiramente vamos mostra os parâmetros dos componentes:

Fonte Monofásica DC - Tipo 11	
	U/l = -1
	Amp. = 0.2
	Tsta = -1
	Tsto = 1

Chave Monofásica	
	T-cl = 1
	T-op = -1
	Imar = 0

Capacitor	
	C= 1

Resistor	
	R = 1000

Informações sobre os cartões Miscellaneous :

Cartão Miscellaneous (Simulation)				
DELTAT	TMAX	FREQ	XOPT	COPT
10×10^{-6}	1×10^{-2}	60	0	0

Cartão Miscellaneous (Integer)								
IOUT	IPLT	IDOUBL	KSSOUT	MAXOUT	IPUN	MENSAV	ICAT	NENERG
1000	1	1	1	1	0	0	2	0

Agora clique com o botão direito do mouse da janela de montagem de circuito e através do menu de seleção coloque os componentes do circuito como mostra a Figura 8. Para girar o componente, selecione-o com o botão esquerdo do mouse e então clique com o botão direito, cada clique faz com que o componente gire 90° .

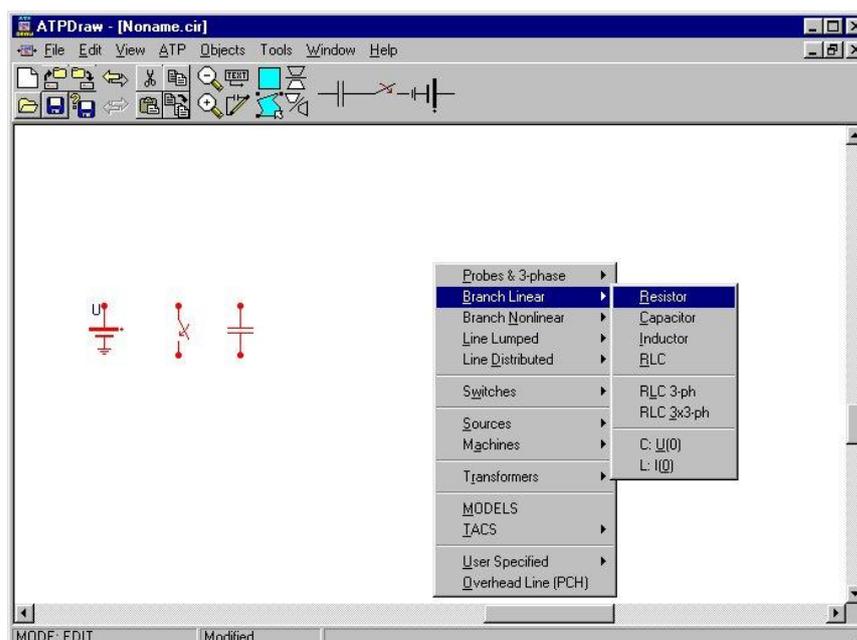


FIGURA 8 - MONTAGEM DO CIRCUITO, INSERINDO COMPONENTES

Com os componentes do circuito inseridos, clique com o botão direito do mouse ou dê um clique duplo com o botão esquerdo para inserir os parâmetros dos componentes e para nomear os nós do circuito. Para cada componente o procedimento é o mesmo. Além dos parâmetros de configuração, nesta janela, podemos também definir as saídas que desejamos para cada componente Isto é feito através dos botões de seleção de Output (ver Figura 9).

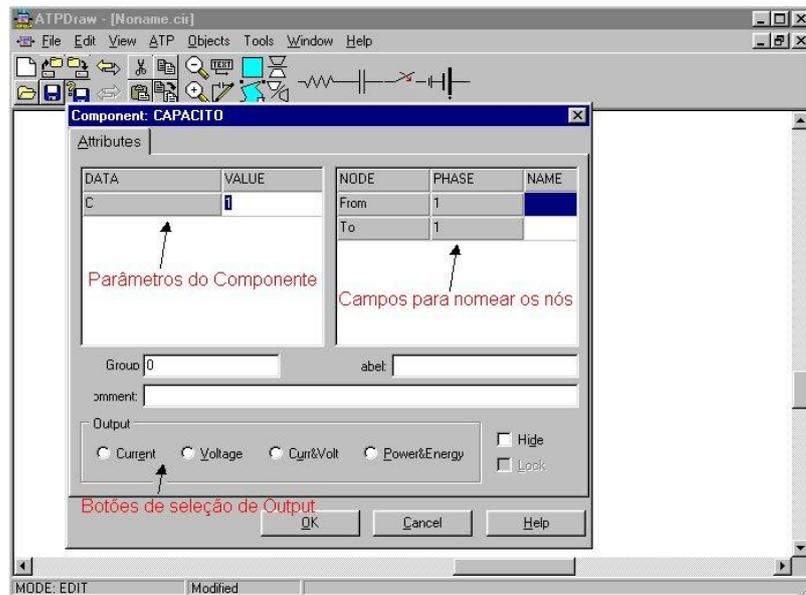


FIGURA 9 - MONTAGEM DO CIRCUITO, CONFIGURAÇÃO DOS PARÂMETROS

Com os parâmetros configurados vamos agora ligar os componentes. Isto é feito clicando-se com o botão esquerdo no nó de um componente e arastando-o até o nó do outro como podemos ver na Figura 10.

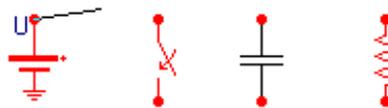


FIGURA 10 - MONTAGEM DO CIRCUITO, LIGANDO OS COMPONENTES

Com todo o circuito da Figura 7 montado vamos agora configurar os parâmetros dos cartões de miscellaneous. Isto é feito através das janelas da Figura 5 e Figura 6. Com os cartões de miscellaneous configurados geraremos, através do menu ATP(ver Figura 4), o arquivo de entrada para o ATP.

5 TÓPICOS PARA REFLEXÃO

1. Determinar a forma de onda da tensão no capacitor em função do tempo.
2. Determinar a forma de onda da potência no capacitor em função do tempo.
3. Determinar a forma de onda da potência dissipada pelo resistor em função do tempo e da energia armazenada no capacitor.

-
4. Altere o valor da resistência para um valor elevado e também para um valor pequeno e responda novamente os itens anteriores.
 5. Altere o valor da capacitância para um valor elevado e também para um valor pequeno e responda novamente os itens 1,2 e 3.
 6. Compare os valores obtidos nos itens 4 e 5 com os valores anteriormente obtidos nos itens 1,2 e 3.

PRÁTICA 02

MANOBRAS DE BANCOS CAPACITORES - ENERGIZAÇÃO E ABERTURA

1 OBJETIVO

Estudar os fenômenos que envolvem as manobras de correntes capacitivas que ocorrem durante as energizações e aberturas de bancos capacitores.

2 RESUMO TEÓRICO

As correntes capacitivas ocorrem sempre que se manobra bancos de capacitores, linhas e cabos em vazio. A característica predominante destas manobras, em termos de solicitação do disjuntor e dos demais equipamentos no sistema, incluindo-se o próprio banco ou bancos sendo manobrados, é de natureza predominantemente dielétrica.

Com correntes típicas de algumas dezenas ou centenas e, em alguns casos, poucos milhares de amperes, a solicitação térmica no disjuntor pode, via de regra, ser desprezada, a não ser é claro, quando se necessita de uma modelagem do arco. Importantes neste tipo de manobra são, além das características do meio extintor, as características geométricas da câmara do disjuntor, que interagem com os campos elétricos resultantes da atuação da TRT (Tensão de Restabelecimento Transitória) já próxima aos seus valores de pico, como por exemplo, o desenho dos contatos e bocais, eventuais blindagens e evidentemente as distâncias entre estes elementos.

As correntes capacitivas, em outras palavras, não apresentam, devido à sua baixa intensidade, nenhuma dificuldade para serem interrompidas, sendo o problema aquele que, em certas condições, se apresenta ao disjuntor, o de mantê-las neste estado.

a) Abertura de Banco de Capacitores

O caso mais simples de manobra em correntes capacitivas, e que portanto mais se presta para se compreender os fundamentos do fenômeno, é aquele referente à abertura de um único banco de capacitores. O circuito monofásico equivalente é aquele da Figura 11, onde L_f , C_f e R_f são os parâmetros da fonte com tensão U_f e C a capacitância do banco sendo manobrado e i_c a corrente.

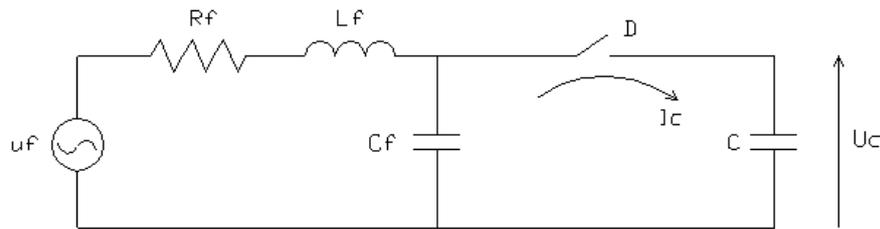


FIGURA 11 - ABERTURA DE UM BANCO CAPACITOR. CIRCUITO MONOFÁSICO EQUIVALENTE

Estando ainda o disjuntor fechado e desprezando-se inicialmente a resistência da fonte, tem-se:

$$\mathbf{u}_c = \frac{\mathbf{Z}_{C_{eq}} \times \mathbf{u}_f}{\mathbf{Z}_f + \mathbf{Z}_{C_{eq}}} \quad \text{Equação 1}$$

com:

$$\mathbf{Z}_f = j\omega L_f \quad \text{Equação 2}$$

$$\mathbf{Z}_{C_{eq}} = \frac{-j}{\omega(C_f + C)} \quad \text{Equação 3}$$

Sendo $Z_{C_{eq}}$, a impedância equivalente relativa às duas capacitâncias em paralelo.

Substituindo-se a Equação 2 e Equação 3 na Equação 1 e rearranjando temos:

$$\mathbf{u}_c = \frac{-\mathbf{u}_f}{\omega C_{eq} \left(\omega L_f - \frac{1}{\omega C_{eq}} \right)} = \frac{\mathbf{u}_f}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2} \quad \text{Equação 4}$$

Com

$$\omega_n^2 = \frac{1}{L_f(C_f + C)} \quad \text{Equação 5}$$

Como se pode ver, ω_n é a frequência natural do circuito equivalente, estando o disjuntor ainda fechado e retirando-se a fonte. É evidente que $\omega_n > \omega$ que é a frequência industrial, o que leva a $u_c > u_f$ significando que a tensão do capacitor, quando este está conectado ao circuito, é maior do que aquela da fonte que o está alimentando.

Portanto quando o disjuntor interrompe a corrente do capacitor no seu zero natural, isolando-o do resto do circuito, este, juntamente com o terminal linha do disjuntor, irá permanecer com a tensão U_c no seu patamar máximo, pois neste instante $u_f = u_{fm}$, uma vez que o circuito é capacitivo. O terminal fonte do disjuntor, todavia, irá agora oscilar com a tensão da fonte, partindo é claro de u_{fm} , ocorrendo assim uma queda repentina de tensão $u_c - u_{fm} = \Delta u_m$ máxima, no instante imediatamente posterior à interrupção. Este salto de tensão, conhecido como "voltage jump", provoca um transitório de frequência angular $\omega_0 = 1/\sqrt{L_f C_f}$ na passagem de u_c para u_{fm} . O degrau de tensão pode ser determinado aplicando-se Kirchoff no circuito da Fig. 3.41. Tem-se então, em valores eficazes, e ainda desprezando-se a resistência no circuito:

$$\Delta u_m = i_{cm} \times Z_f = i_{cm} \times \omega L_f \quad \text{Equação 6}$$

Do que foi exposto, vê-se que o transitório do degrau de tensão é semelhante àquele da TRT do curto terminal onde o lado da fonte oscila livremente na sua frequência natural ω_0 , com a diferença agora de que a tensão impressa não é u_{fm} , mas sim Δu_m .

b) Energização de um banco de capacitores

A energização de um banco de capacitores, embora sendo uma manobra corriqueira, apresenta a ocorrência de sobretensões e sobrecorrentes que devem

ser analisadas, dado o seu efeito no sistema. Considere-se ainda o circuito da Figura 11, no qual o disjuntor está agora fechando o banco C. Para simplificar, desprezamos aqui a capacitância C_f da fonte, uma vez que $C \gg C_f$. Chamando-se de i_d a corrente que passa pelo circuito após o fechamento do disjuntor, tem-se:

$$\mathbf{R}_f i_d + L_f \frac{di_d}{dt} + \frac{1}{C} \int i_d dt = u_0 \quad \text{Equação 7}$$

u_0 é a tensão do sistema no instante aleatório do fechamento ($t = 0$), que na realidade é o instante da formação do pré-arco determinado pela ruptura do dielétrico entre os contatos que se fecham, com a conseqüente passagem da corrente de fechamento, antes do contato galvanico dos mesmos. Poder-se-ia usar a expressão senoidal para a tensão da fonte com a introdução de um ângulo de fase θ aleatório, porém, a análise ficaria um pouco mais trabalhosa e a essência do fenômeno não tão clara. Resolvendo a Equação 7 chegamos a seguinte expressão para i_d :

$$i_d(t) = (u_0 - u_{c0}) \frac{e^{-t/\tau}}{\sqrt{\frac{L_f}{C} - \frac{R_f^2}{4}}} \text{sen}(\omega_n t) \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{1}{L_f C} - \left(\frac{R_f}{2L_f}\right)^2}$$

$$\tau = \frac{2L_f}{R_f}$$

$$u_{c0} = \frac{1}{C} \int i_d dt \Big|_{t=0}$$

Esta é a expressão para a corrente de energização de um banco de capacitores também chamada de corrente "inrush" e que, como se vê pela equação acima, é transitória, amortecida e função da diferença das tensões da fonte e do banco no instante do fechamento e da frequência natural do sistema. Na aproximação feita, não se considerou a frequência da fonte porém é evidente que i_d , após o amortecimento, irá se acomodar sobre a corrente do banco i_c e portanto a sua equação deveria também conter um termo em ω . Todavia os parâmetros importantes de uma energização de um banco de capacitores no que diz respeito à corrente "inrush", são o primeiro pico e a sua frequência, valores esses que serão os responsáveis pelas solicitações sobre o disjuntor, o que valida a aproximação que leva à Equação 8. Analisando-se a expressão de $i_d(t)$, vê-se que a corrente de "inrush" é na sua natureza igual à corrente de descarga num reacendimento, podendo-se considerar este último como sendo uma energização involuntária onde o dielétrico se rompeu; daí a mesma designação para ambas.

3 MODELAGEM NO ATPDRAW

O estudo da abertura de bancos capacitores será realizado através do circuito mostrado na Figura 12.

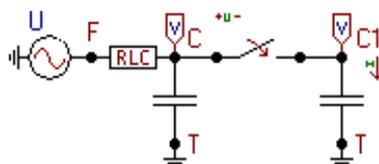


FIGURA 12 - CIRCUITO PARA SIMULAÇÃO DE ABERTURA DE BANCO CAPACITOR

Os elementos do circuito serão:

Fonte Monofásica AC - Tipo 14	
	U/I = 0
	Amp. = 187.794
	f = 60
	Pha = -90
	A1 = 0
	Tsta = -1
Tsto = 1	

RLC Monofásico	
	R = 0
	L = 52.9
	C = 0

Chave Monofásica	
	T-cl = -1
	T-op = 0.01
	Imar = 0

Capacitor	
	C = 3.79

Valor para ambos os capacitores do circuito

Informações sobre os cartões Miscellaneous :

Cartão Miscellaneous (Simulation)				
DELTAT	TMAX	FREQ	XOPT	COPT
1×10^{-5}	5×10^{-2}	60	0	0

Cartão Miscellaneous (Integer)								
IOUT	IPLOT	IDOUBL	KSSOUT	MAXOUT	IPUN	MENSAV	ICAT	NENERG
500	1	1	1	1	0	0	2	0

O estudo da energização de bancos capacitores será realizado através do circuito mostrado na Figura 12.

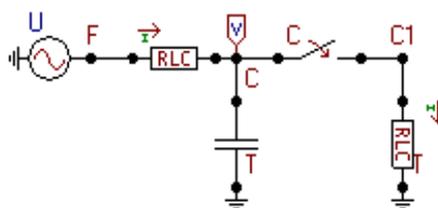


FIGURA 13 - CIRCUITO PARA SIMULAÇÃO DE ENERGIZAÇÃO DE BANCO CAPACITOR

Os elementos do circuito serão:

Fonte Monofásica AC - Tipo 14	
	U/I = 0
	Amp. = 56.3
	f = 60
	Pha = -90
	A1 = 0
	Tsta = -1
	Tsto = 1

RLC Monofásico	
	R = 0.1
	L = 10
	C = 0

Chave Monofásica	
	T-cl = 0.00415
	T-op = 1
	Imar = 0

Capacitor	
	C = 10

RLC Monofásico	
	R = 0.025
	L = 0.2
	C = 10

Representação do banco capacitor a ser energizado levando em conta a indutância e a resistência intrínseca do banco.

Informações sobre os cartões Miscellaneous :

Cartão Miscellaneous (Simulation)				
DELTAT	TMAX	FREQ	XOPT	COPT
1×10^{-4}	1×10^{-1}	60	0	0

Cartão Miscellaneous (Integer)								
IOUT	IPLOT	IDOUBL	KSSOUT	MAXOUT	IPUN	MENSAV	ICAT	NENERG
500	1	1	1	1	0	0	1	0

4 TÓPICOS PARA REFLEXÃO

1. No circuito da Figura 12 obtenha o gráfico da tensão através da chave, no nó C e nó C1
2. No circuito da Figura 12 obtenha o gráfico da corrente através do capacitor do nó C1.
3. No circuito da Figura 13 obtenha o gráfico da tensão no nó C e nó C1.
4. No circuito da Figura 13 obtenha o gráfico da corrente de "inrush" e da corrente da fonte.
5. Modifique o instante de fechamento das chaves, responda novamente os itens anteriores e compare os resultados obtidos.

PRÁTICA 03

ENERGIZAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

1 OBJETIVO

Estudar os fenômenos que envolvem as manobras de energização de linhas de transmissão.

2 RESUMO TEÓRICO

Energização e religamento de linhas de transmissão são manobras típicas que ocorrem em um sistema e cuja análise pode ser feita considerando-se três períodos distintos:

- a) o período transitório no qual prevalecem os efeitos das ondas trafegantes associadas a estes fenômenos e cuja duração é da ordem de alguns milissegundos, dependendo do comprimento da linha manobrada. As sobretensões resultantes podem ser caracterizadas por um valor de pico e uma taxa de crescimento, assumindo uma forma exponencial;
- b) período dinâmico, que representa uma transição entre os períodos transitórios e o regime permanente, sendo de natureza repetitiva, caracterizado por pequenas variações na forma de onda que é aproximadamente periódica e composta pela tensão à frequência fundamental e harmônicos de baixa ordem, predominantemente segundo e terceiro, os quais poderão distorcer bastante a forma de onda, podendo ter uma duração de até um segundo.

-
- c) regime permanente, no qual a tensão é periódica, porém podendo ser bastante distorcida. Geralmente, para uma linha de transmissão, as sobretensões neste período ocorrem quando o terminal receptor está aberto, como no caso de energizações e religamentos, podendo persistir por vários minutos.

Uma linha de transmissão aberta em uma das suas extremidades age como uma capacitância à frequência fundamental causando elevação da tensão ao longo do sistema. Esta capacitância pode ser compensada por meio de reatores em derivação, porém esta compensação quase nunca é total, o que faz com que uma linha, mesmo compensada, atue como um capacitor. Se o lado emissor estiver eletricamente próximo a geradores, o efeito dos reguladores das máquinas nas tensões durante o regime permanente deve ser levado em consideração. Os períodos transitório e dinâmico não são afetados pela atuação dos reguladores, uma vez que sua operação é lenta.

As sobretensões resultantes de manobras de energização e religamento dependem de diversas condições do sistema, sendo as mais importantes relacionadas a seguir:

- a) Potência de curto-circuito do sistema alimentador;
- b) Ponto na onda de tensão em que o disjuntor é fechado;
- c) Grau de compensação da linha de transmissão;
- d) Comprimento da linha de transmissão;
- e) Perdas no condutor;
- f) Presença de equipamentos de proteção;
- g) Grau de aterramento do sistema;
- h) Tensão pré-manobra;
- i) Valor do resistor de pré-inserção;
- j) Dispersão entre os contatos do disjuntor;
- k) Valor da carga residual na linha para o caso do religamento propriamente dito, uma vez que a energização pode ser encarada como um caso particular de religamento, onde a carga armazenada é igual a zero.

3 MODELAGEM NO ATPDRAW

O estudo de energização de linhas de transmissão será realizado através dos 5 circuitos mostrados na Figura 14. Cada circuito simula uma das seguintes situações:

- Caso ideal, com fonte constante sem perdas e linha de transmissão sem perdas;
- Idem caso a, incluindo-se as perdas da linha de transmissão;
- Idem caso b, porém com fonte senoidal;
- Idem caso c, porém acrescentando-se uma indutância em serie com a fonte;
- Idem caso d, porém sendo a linha de transmissão trifásica.

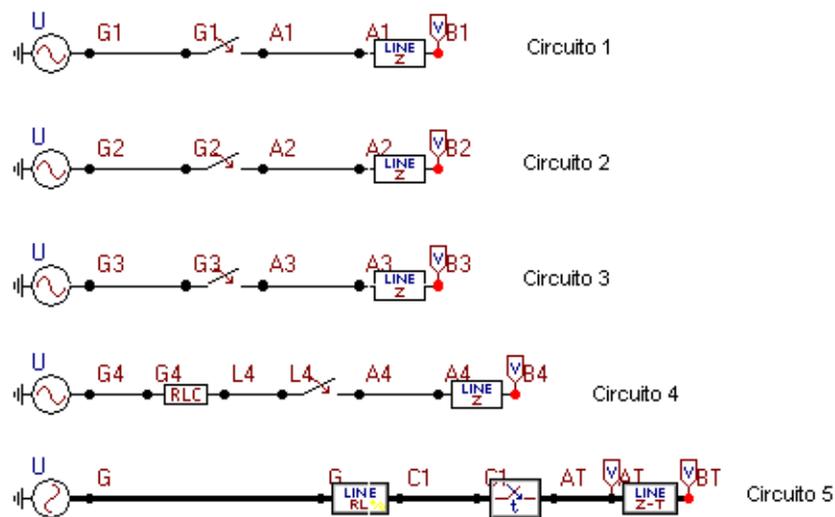


FIGURA 14 - CIRCUITOS PARA SIMULAÇÃO DA ENERGIZAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Os elementos do circuito serão:

Fonte Monofásica AC - Tipo 14	
	U/I = 0
	Amp. = 180000
	f = 0.0001
	Pha = 0
	A1 = 0
	Tsta = -1
Tsto = 1	

Fonte para os circuitos 1 e 2

Fonte Monofásica AC - Tipo 14	
	U/I = 0
	Amp. = 180000
	f = 60
	Pha = 0
	A1 = 0
	Tsta = -1
	Tsto = 1

Fonte para os circuitos 3 e 4

Fonte Trifásica - Tipo 14	
	U/I = 0
	Amp. = 12826
	f = 60
	Pha = 69.95
	A1 = 0
	Tsta = -1
	Tsto = 1

Fonte para o circuito 5

Chave Monofásica	
	T-cl = 0
	T-op = 1
	Imar = 0

Chave para os circuitos 1,2,3 e 4

Chave Trifásica	
	T-cl = 0
	T-op = 1
	Imar = 0

Chave para o circuito 5

Linha Transposta Monofásica	
	R/I = 0
	A = 4.353
	B = 0.0063
	L = 150
	ILINE = 0

Linha para o circuito 1

Linha Transposta Monofásica	
	R/I = 0.422
	A = 4.353
	B = 0.0063
	L = 150
	ILINE = 0

Linha para os circuitos 2,3 e 4

Linha Trifásica Transposta	
	R/I+ = 0.066
	R/I0 = 0.422
	A+= 1.358
	A0= 4.353
	B+= 0.0086
	B0= 0.063
	L = 150
	ILINE = 0
	IPUNCH = 0

Linha para o circuito 5

Linha RL Acoplada	
	Ro = 0
	Lo = 140.3
	R+ = 0
	L+ = 141.3

Reatância equivalente da fonte do circuito
5

RLC Monofásico	
	R = 0
	L = 141.3
	C = 0

Reatância equivalente da fonte do circuito
4

Informações sobre os cartões Miscellaneous :

Cartão Miscellaneous (Simulation)				
DELTAT	TMAX	FREQ	XOPT	COPT
1×10^{-5}	5×10^{-2}	60	0	0

Cartão Miscellaneous (Integer)								
IOUT	IPLOT	IDOUBL	KSSOUT	MAXOUT	IPUN	MENSAV	ICAT	NENERG
200	1	1	1	1	0	0	1	0

4 TÓPICOS PARA REFLEXÃO

1. Obtenha o gráfico da tensão no final das linhas de transmissão dos circuitos 1,2,3,4 e 5.
2. Diminua o comprimento das linhas de transmissão para 75 km e obtenha gráfico da tensão no final das linhas de transmissão dos circuitos 1,2,3,4 e 5.
3. Escolha outro instante para a energização das linhas de transmissão e obtenha gráfico da tensão no final das linhas de transmissão dos circuitos 1,2,3,4 e 5.
4. Compare as tensões obtidas nos itens anteriores.
5. Explique as diferenças entre as formas de onda das tensões de cada circuito.

PRÁTICA 04

TENSÃO TRANSITÓRIA DE RESTABELECIMENTO

1 OBJETIVO

Estudar o fenômeno da tensão transitória de restabelecimento que ocorre nos contatos dos disjuntores quando manobrados sob curto-circuito.

2 RESUMO TEÓRICO

A manobra de eliminação de falta num sistema elétrico de potência acarreta o aparecimento de sobretensões entre fase e terra e através dos contatos dos pólos do disjuntor manobrado. O conhecimento das sobretensões entre fase e terra é importante para a especificação dos pára-raios que irão limitá-las a níveis compatíveis com a suportabilidade dos equipamentos por eles protegidos, drenando uma energia que esteja dentro do limite de sua capacidade de absorção. No que se refere às sobretensões através dos contatos dos pólos do disjuntor manobrado, estas devem ser conhecidas para a correta especificação das suportabilidades dos disjuntores a este tipo de solicitação, também conhecida como Tensão de Restabelecimento Transitória. Quando ocorre uma falta num sistema de potência, os disjuntores mais próximos devem isolar o trecho defeituoso o mais rápido possível, de forma a minimizar os efeitos da falta sobre o restante do sistema.

A tensão de restabelecimento transitória (TRT) é aquela que aparece através dos contatos de um mesmo polo do disjuntor após a extinção do arco elétrico no interior de sua câmara. Para que a interrupção da corrente de falta seja garantida, as suportabilidades térmica e dielétrica do disjuntor devem ser sempre superiores à TRT, caso contrário a falta será restabelecida.

A magnitude total da TRT compreende um surto inicial, provocado pela abertura do disjuntor, que se propaga através das linhas de transmissão e se reflete em pontos de descontinuidade, acrescido destas reflexões ao chegarem ao ponto onde o surto teve início. O surto inicial por sua vez, possui uma componente de frequência industrial, definida pelas fontes conectadas à rede, e cuja magnitude é função do tipo de falta (trifásicas e bifásicas aterradas ou não, e monofásicas) e do grau de aterramento da rede (relação x_0/x_1) e possui uma ou mais componentes de frequência natural, definidas pelos parâmetros da rede (indutâncias e capacitâncias), e cujo número é função do ponto de aplicação da falta.

No processo de interrupção da falta, após a extinção do arco, enquanto os contatos do disjuntor ainda estão próximos um do outro, é necessário que o resfriamento do interior da câmara do disjuntor seja mais rápido que o crescimento da TRT enquanto que, quando os contatos do disjuntor já estão mais afastados um do outro, a suportabilidade dielétrica do meio de extinção deve ser superior aos valores instantâneos atingidos pela TRT. Portanto, a taxa de crescimento e o pico são os parâmetros que caracterizam a severidade da TRT.

Para o cálculo da TRT, os seguintes fatores devem ser convenientemente selecionados e combinados de forma a cobrir a diversa gama de possibilidade de condições de operação de um sistema real :

- ◆ Tipo de falta;
- ◆ Local de aplicação da falta;
- ◆ Extensão da rede a ser representada;
- ◆ Cálculo e localização dos equivalentes da rede não representada;
- ◆ Modelagem dos elementos da rede;
- ◆ Tempo de observação do fenômeno.

Devido à complexidade das redes elétricas existentes, no que se refere ao número elevado de elementos que a compõem, o cálculo da TRT deve ser realizado através de computadores digitais, com a utilização de programas específicos para o cálculo de transitórios eletromagnéticos, onde podem ser representados os diversos

elementos componentes da rede estudada. Todavia, para uma boa compreensão dos fatores que influenciam nos resultados do fenômeno, costuma-se analisar a TRT sob os seguintes pontos de vista:

- ◆ *Componente de frequência industrial*, para se verificar a dependência da magnitude dessa componente com o tipo de falta (trifásica e bifásica, aterradas ou não e monofásicas) e com o grau de aterramento da rede (relação x_0/x_1).
- ◆ *Componente (s) de frequência natural*, para se indentificar a dependência do número dessas componentes com o ponto de aplicação da falta (falta terminal, falta quilométrica, falta alimentada por transformador, etc).
- ◆ *Ondas trafegantes*, para se analisar a dependência da forma final dessa onda com os coeficientes de reflexão e refração, sendo que o primeiro é influenciado pelo tipo de terminação das linhas de transmissão (em vazio, por indutância e por capacitância) e o segundo, pela inclusão ou não da indutância efetiva da fonte no seu cálculo.

3 MODELAGEM NO ATPDRAW

O estudo do fenômeno da tensão transitória será realizado através do circuito mostrado na Figura 15

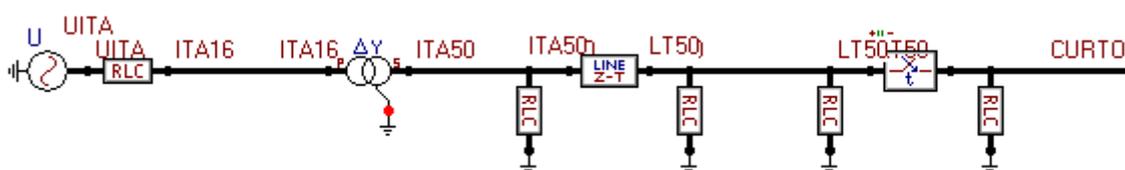


FIGURA 15 - CIRCUITO PARA SIMULAÇÃO DA TRT

Os elementos do circuito serão:

Fonte Trifásica - Tipo 14	
	U/l = 0
	Amp. = 12826
	f = 60
	Pha = 69.95
	A1 = 0
	Tsta = -1
	Tsto = 1

Fonte que representa o equivalente da tensão do gerador

RLC Trifásico	
	R = 0
	L = 0.0607
	C = 0

Componente que representa a impedância equivalente do gerador

Transformador Δ/Y Saturável	
	Io = 1
	Fo = 0.001
	Rmag = 1000000
	Rp = 0.001
	Lp = 0.0512
	Vrp = 16
	Rs = 0.004
	Lp = 0.1833
	Vrs = 295.98
	Lag = -30
	RMS = 0

Linha Trifásica Transposta	
	R/l+ = 0.026
	R/l0 = 0.364
	A+= 0.328
	A0= 1.376
	B+= 5.096
	B0= 3.42
	L = 215
	ILINE = 0
	IPUNCH = 0

RLC Trifásico	
	R = 8.33
	L = 2500
	C = 0

Compensação Shunt da Linha de Transmissão. Colocado em ITA50 e LT50

RLC Trifásico	
	R = 0
	L = 0
	C = 19.74

Representa as capacitâncias parasitas dos equipamentos

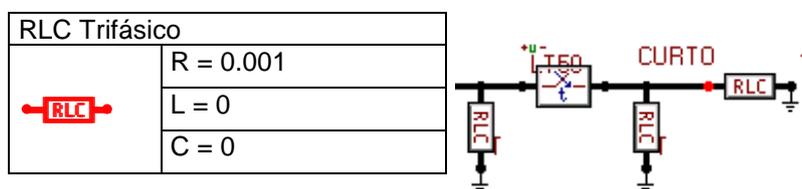
Informações sobre os cartões Miscellaneous :

Cartão Miscellaneous (Simulation)				
DELTAT	TMAX	FREQ	XOPT	COPT
1×10^{-4}	2×10^{-1}	60	60	60

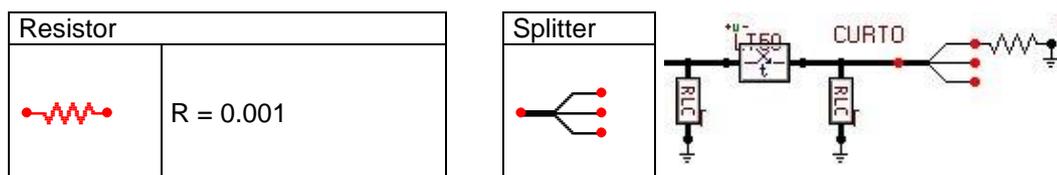
Cartão Miscellaneous (Integer)								
IOUT	I PLOT	IDOUBL	KSSOUT	MAXOUT	IPUN	MENSAV	ICAT	NENERG
500	1	1	1	1	0	0	1	0

4 TÓPICOS PARA REFLEXÃO

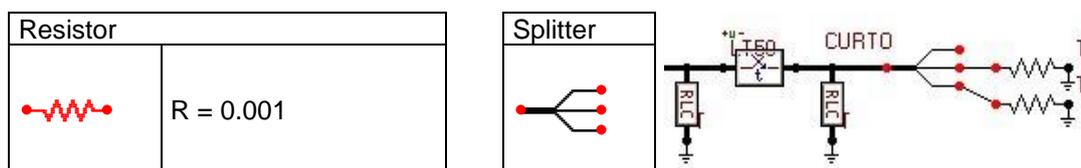
1. Coloque um elemento RLC trifásico nos terminais do circuito (nó CURTO), com uma resistência de 0.001Ω , aterrando-o na outra extremidade. Calcule a TRT na chave para o curto trifásico.



2. Usando um Splitter coloque um resistor de 0.001Ω na fase "a" dos terminais do circuito (nó CURTO), aterrando-o na outra extremidade. Calcule a TRT na chave para o curto monofásico.



-
3. Usando um Splitter coloque um resistor de 0.001Ω na fase "b" e outro na fase "c" dos terminais do circuito (nó CURTO), aterrando-os na outra extremidade. Calcule a TRT na chave para o curto bifásico com terra.



4. Compare os resultados obtidos nos itens anteriores e explique as diferenças
5. Repita os itens anteriores alterando o valor da resistência de curto-circuito para 100Ω . Compare os resultados e explique as diferenças.

PRÁTICA 05

REJEIÇÃO DE CARGA

1 OBJETIVO

Estudar os fenômenos de rejeição de carga determinando as sobretensões resultantes nas várias situações de ocorrência da rejeição de carga.

2 RESUMO TEÓRICO

A rejeição de uma carga causada, por exemplo, por uma operação indevida de um disjuntor, irá produzir uma elevação da tensão ao longo de todo o sistema, pois, com a conseqüente redução do fluxo de corrente o efeito capacitivo das linhas se acentuará e a queda de tensão através das impedâncias se reduzirá. Além disso, há o fato dos geradores, por alimentarem em regra geral cargas indutivas, estarem operando superexcitados, o que faz com que sua tensão seja superior à das cargas.

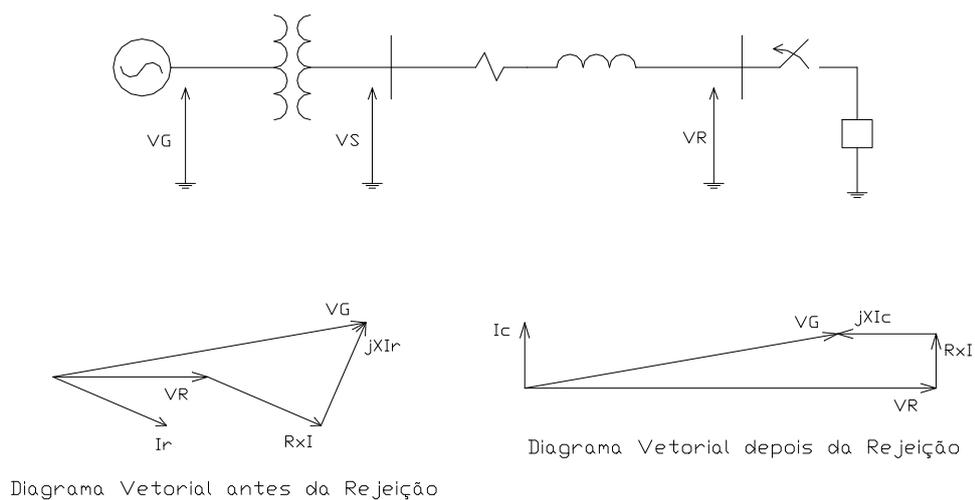


FIGURA 16 - REJEIÇÃO DE CARGA EM UM SISTEMA RADIAL

Este fenômeno pode ser melhor visualizado através da Figura 16, onde se apresenta um sistema radial em que ocorreu uma perda súbita de carga com os respectivos diagramas vetoriais representativos das condições pré e pós-manobra.

As sobretensões devido à rejeição de carga são estudadas sob dois pontos de vista, ou seja, sobretensões transitórias nos primeiros ciclos subsequentes à rejeição e sobretensões sustentadas que permanecem no sistema, normalmente com distorções harmônicas provocadas pela saturação dos elementos não-lineares do sistema (transformadores e reatores). As sobretensões dependem das condições de rejeição, isto é, se a rejeição é parcial ou total da carga do sistema. As sobretensões com rejeição total de carga são mais elevadas, e conseqüentemente solicitam os equipamentos da subestação terminal (onde se processa a rejeição) com mais severidade, mas podem também solicitar outros pontos da rede.

Os pára-raios conectados na rede por ocasião de uma rejeição de carga normalmente são severamente solicitados, apresentando elevados níveis de absorção de energia com descargas sucessivas. A análise da adequação dos pára-raios, face a sobretensões devido a uma rejeição de carga, deve ser feita considerando o transitório inicial e a sobretensão sustentada.

O transitório inicial, que ocorre no instante da abertura do disjuntor, é da ordem de 1 a 2 ciclos e tem a forma de um surto de manobra. O valor deste surto geralmente não é superior aos obtidos em transitórios decorrentes de energização e religamento. No entanto, em certos sistemas, devido à utilização de resistores de pré-inserção e com a conseqüente redução dos níveis de sobretensões relativos àquelas manobras, por vezes é necessária a verificação do desempenho dos pára-raios para este surto inicial da rejeição de carga.

As sobretensões sustentadas subsequentes à rejeição de carga de maneira geral são mais altas que a maioria das sobretensões sustentadas de outras operações. Se durante este período os pára-raios vierem a operar, eles deverão ser capazes de reduzir estas sobretensões nos ciclos seguintes de forma a não causar danos no equipamento devido à excessiva absorção de energia.

Num estudo de transitórios, a integridade do pára-raios, nesta situação, pode ser feita de maneira simplificada, sem necessidade de simular os pára-raios e sem determinar a energia absorvida. Este critério consiste em observar a máxima tensão

sustentada e verificar se este valor está abaixo da tensão nominal (reseat) dos pára-raios. Quando a rejeição de carga é seguida de curto-circuito, normalmente as sobretensões nas fases sãs aumentam significativamente.

Considerando que, devido à ocorrência do curto-circuito, o outro extremo da linha será aberto rapidamente pela atuação da proteção, deve-se verificar se os pára-raios expostos possuem a capacidade de "reseat" transitório. Esta é uma característica especial dos pára-raios modernos providos de Ágape que possuem tensão de "reseat" superior à nominal durante os instantes iniciais do surto. Se for o caso, esta característica poderá ser utilizada como critério preliminar para verificação da adequação dos pára-raios em análise. Nos casos em que a aplicação dos critérios mencionados acima resultar em compensação reativa exagerada, seja por razões elétricas e/ou econômicas, é conveniente uma avaliação da energia a ser dissipada pelos pára-raios quando descarregando durante uma rejeição de carga. Conservativamente deve-se considerar como tensão para descarga o nível mínimo, bem como o efeito da poluição.

Com relação à influência nos equipamentos, além do que já foi focado em relação aos pára-raios, as sobretensões devido à rejeição de carga acarretam outros efeitos danosos. Assim, por causa destas sobretensões elevadas, todo o isolamento deve ser analisado frente a estas solicitações.

Enquanto os transformadores são freqüentemente bem protegidos por pára-raios para as sobretensões transitórias, uma vez que estão localizados diretamente em seus terminais, as sobretensões à freqüência industrial causam outras solicitações (de efeito térmico) que devem ser consideradas, por exemplo aquelas cansadas por harmônicos gerados por sua característica não-linear as quais o transformador deve ser capaz de suportar. Assim, é de se esperar que de um modo geral transformadores em EAT devam ter uma capacidade de sobreviver a afeitos térmicos resultantes de uma sobre-excitação devido à rejeição de carga no sistema. Nesta análise é importante ressaltar que a sobre-velocidade reduz o fluxo no transformador para uma dada sobretensão, enquanto sobretensões devido à rejeição de carga causam sobre-excitação, conseqüentemente de certa forma um efeito compensa o outro.

É importante notar que os valores da escala tensão de excitação devem ser considerados como tensão nominal por hertz (tensão de excitação nominal em p.u. dividido pela frequência em p.u. de 60 Hz) aplicada ao enrolamento primário para qualquer carregamento. A operação abaixo da curva não causará perda significativa da vida do isolamento do transformador. Por exemplo, o transformador pode operar a 120% de excitação (1,2 vezes a tensão nominal por hertz) por um minuto sem dano mensurável. Se, por outro lado, a operação for de 120% por dois minutos, o transformador poderá sofrer dano permanente.

Os disjuntores podem também ser substancialmente influenciados por sobretensões devido à rejeição de carga. O primeiro disjuntor a ser manobrado, ou seja, aquele que provocará a rejeição de carga, interromperá a corrente de curto-circuito ou a corrente de carga. Esta é uma condição de operação normal para o disjuntor e não requer maiores cuidados; supondo-se que a tensão de restabelecimento transitória foi corretamente especificada. Por outro lado, o disjuntor da outra extremidade da linha interromperá uma corrente capacitiva em níveis elevados de tensão e frequência. Este tipo de interrupção é mais severo do que uma abertura da linha à tensão nominal e portanto deve ser cuidadosamente observado na preparação da especificação do disjuntor para atendimento desta solicitação. É prática usual especificar que o disjuntor deverá ser capaz de interromper com 1,5 p.u. de tensão uma corrente capacitiva correspondente a 400 km de linha em vazio à frequência de 66 Hz. Para que seja garantido que os disjuntores não sejam chamados a operar com tensões superiores a 1,5 p.u., são instalados sistemas de proteção de sobretensão normalmente ajustados em torno de 1,25-1,30 p.u. Esperasse assim que o tempo decorrido desde a atuação dos relés até a separação física dos contatos dos disjuntores seja adequado para evitar a abertura do disjuntor numa tensão superior a 1,5 p.u. Este tempo em conjunto com a evolução da sobretensão deve ser determinado em estudos de sistema com a utilização de programa de estabilidade.

3 MODELAGEM NO ATPDRAW

O estudo de rejeição de cargas em sistemas elétricos será realizado através do circuito mostrado na Figura 17.

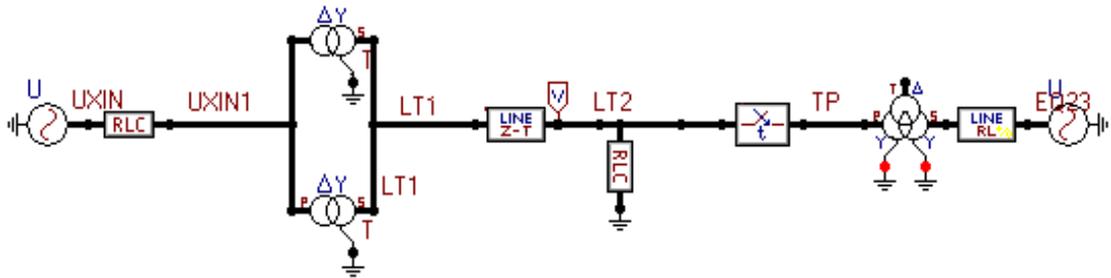


FIGURA 17 - CIRCUITO PARA SIMULAÇÃO DA REJEIÇÃO DE CARGA

Os elementos do circuito serão:

Fonte Trifásica - Tipo 14	
	U/I = 0
	Amp. = 17518.8
	f = 60
	Pha = 69.95
	A1 = 0
	Tsta = -1
	Tsto = 1

Fonte que representa o equivalente da tensão dos geradores de Xingo.

RLC Trifásico	
	R = 0
	L = 0.0607
	C = 0

Componente que representa a impedância equivalente dos geradores de Xingo.

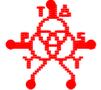
2 Transformadores Δ/Y Saturável			
	Io = 9.6512	Curva de saturação (I x Fluxo)	
	Fo = 62.797	9.6512	62.797
	Rmag = 1000000	140.6662	67.5237
	Rp = 0.0025	245.5322	71.5751
	Lp = 0.1243	470.8973	76.977
	Vrp = 18	887.8373	84.4047
	Rs = 0.774	1413.7647	88.4561
	Lp = 38.6982	1927.0929	91.157
	Vrs = 317.54	5261.0845	94.5332
	Lag = -30		
	RMS = 0		

Linha Trifásica Transposta	
	R/l+ = 0.023
	R/l0 = 0.364
	A+= 0.322
	A0= 1.37
	B+= 0.0136
	B0= 0.008938
	L = 200
	ILINE = 0
IPUNCH = 0	

RLC Trifásico	
	R = 20.167
	L= 3025
	C= 0

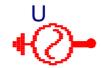
Componente que representa a
Compensação shunt da linha

Chave Trifásica	
	T-cl = -1
	T-op = 0.03
	Imar = 0

Transformador Y/Y/Δ Saturável	
	Io = 1
	Fo = 0.001
	Rmag = 1000000
	Rp = 0.3721
	Lp = 18.6037
	Vrp = 317.54
	Rs = 0.0566
	Lp = 2.8301
	Vrs = 132.79
	Rt = 0.0121
	Lt= 0.6065
	Vrt = 13.8
	Lag = 30
RMS = 0	

Elemento RL Acoplado - Linha Monofásica	
	Ro = 18.51
	Lo = 51.84
	R+ = 3.17
	L+ = 36.5

Impedância equivalente da carga

Fonte Trifásica - Tipo 14	
	U/l = 0
	Amp. = 181446.8
	f = 60
	Pha = -58.2
	A1 = 0
	Tsta = -1
Tsto = 1	

Fonte que representa o
equivalente da tensão da carga

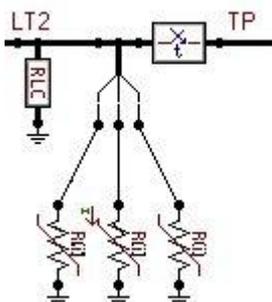
Informações sobre os cartões Miscellaneous :

Cartão Miscellaneous (Simulation)				
DELTAT	TMAX	FREQ	XOPT	COPT
1×10^{-4}	1×10^{-1}	60	60	0

Cartão Miscellaneous (Integer)								
IOUT	IPLT	IDOUBL	KSSOUT	MAXOUT	IPUN	MENSAV	ICAT	NENERG
500	1	1	1	1	0	0	1	0

4 TÓPICOS PARA REFLEXÃO

1. Obtenha o gráfico da tensão nos nós LT1 ,LT2 e TP.
2. Determine o valor e em que fase ocorre a maior sobretensão durante a simulação.
3. Aumente o comprimento das linhas de transmissão para 400 km e obtenha os dados do item 1 e 2 e compare-os.
4. Retire do circuito o elemento RLC trifásico que representa a compensação shunt da linha (para um comprimento de 200 km) e obtenha os dados do item 1 e 2 e compare-os.
5. Para o circuito original, coloque um pára-raios no nó LT2 e obtenha os dados do item 1 e 2 e compare-os.

Resistor Não Linear Tipo 99																				
	Vflash = 0	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Característica não-linear</th> </tr> <tr> <th>Corrente(A)</th> <th>Tensão (V)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>100</td> <td>811000</td> </tr> <tr> <td>200</td> <td>822000</td> </tr> <tr> <td>300</td> <td>830000</td> </tr> <tr> <td>500</td> <td>841000</td> </tr> <tr> <td>1000</td> <td>860000</td> </tr> <tr> <td>2000</td> <td>888000</td> </tr> <tr> <td>3000</td> <td>910000</td> </tr> </tbody> </table>	Característica não-linear		Corrente(A)	Tensão (V)	100	811000	200	822000	300	830000	500	841000	1000	860000	2000	888000	3000	910000
	Característica não-linear																			
	Corrente(A)		Tensão (V)																	
	100		811000																	
200	822000																			
300	830000																			
500	841000																			
1000	860000																			
2000	888000																			
3000	910000																			
Tdelay = 1																				
Jump = 1																				
VSEAL = 0																				
																				

6. A partir das comparações dos itens 3,4 e 5 ,a que conclusões podemos chegar.

PRÁTICA 06

ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADORES

1 OBJETIVO

Estudar os fenômenos que ocorrem durante as manobras de energização de transformadores devido as suas características não-lineares.

2 RESUMO TEÓRICO

A energização de um transformador de potência geralmente provoca sobretensões com forte conteúdo de harmônicos e baixo amortecimento, devido às características de saturação do seu núcleo de ferro. A Figura 18 mostra uma característica $\psi \times I$ típica para um transformador de potência.

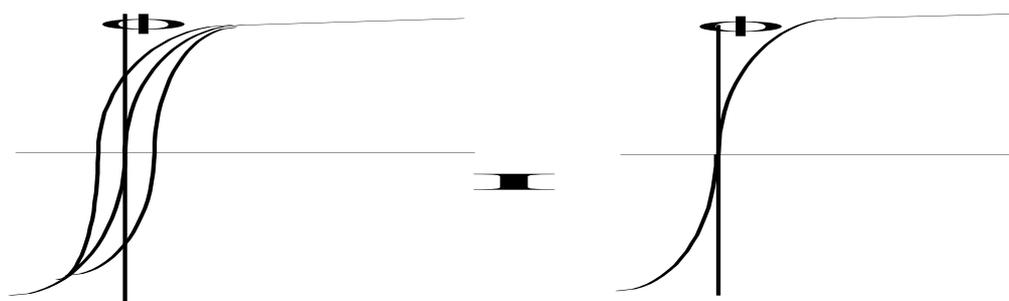


FIGURA 18 - CURVA DE MAGNETIZAÇÃO DE UM TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

Em regime permanente, a corrente de magnetização de um transformador em vazio é normalmente na faixa de 0,5 a 2 % de sua corrente nominal. As perdas por histerese costumam ser muito pequenas e a região saturada da característica de magnetização geralmente se inicia em torno de 1,2 pu de tensão.

Quando um transformador é desligado do sistema elétrico há um fluxo residual que permanece no núcleo magnético, o qual depende da característica de magnetização e das oscilações entre as capacitâncias e as indutâncias do transformador. No instante que o transformador é novamente energizado, dependendo das características da rede elétrica, é possível que sobretensões transitórias significativas provoquem forte saturação do núcleo magnético do transformador, a qual pode ser agravada pelo fluxo residual existente. Neste caso a corrente de "inrush" é significativa e a tensão resultante bastante distorcida, com alto teor de harmônicos. A tensão resultante depende de uma série de fatores, tais como: instantes de fechamento dos contatos do disjuntor, fluxo residual, tensão antes do fechamento do disjuntor, potência do transformador e configuração da rede elétrica.

As sobretensões provocadas pela energização de um transformador tem uma característica marcante, uma vez que são fortemente influenciadas pela característica do núcleo magnético. Geralmente a saturação do transformador atua como se fosse um limitador de sobretensões, reduzindo a magnitude e distorcendo a forma de onda, devido à forte injeção de harmônicos na rede. Entretanto, caso a impedância harmônica seja muito elevada é possível que as magnitudes das sobretensões sejam elevadas. No geral o amortecimento é baixo porque a corrente de "inrush" permanece por muito tempo (as perdas no ferro costumam ser muito pequenas). Este tipo de sobretensão pode ser provocado por outras manobras na rede elétrica, tais como rejeição de carga e eliminação de defeitos.

As sobretensões acima descritas tem a sua importância acentuada na medida em que a potência do transformador aumenta e grandes bancos de capacitores são utilizados no sistema. Os bancos de capacitores tem o efeito de reduzir a ordem dos picos de ressonância da impedância harmônica do sistema. Devido às suas características bem peculiares (forte conteúdo de harmônicos e baixo amortecimento), geralmente as sobretensões nas subestações vizinhas também apresentam formas de onda similares, porém com magnitudes inferiores às magnitudes da barra onde o transformador é energizado. A importância das sobretensões em questão está relacionada com as solicitações transitórias nos equipamentos principais das subestações, com as energias absorvidas pelos pára-

raios de ZnO e com a possibilidade de sensibilização das proteções de neutro e diferencial de barramento.

3 MODELAGEM NO ATPDRAW

O estudo da energização do transformador será realizado através do circuito mostrado na Figura 19.

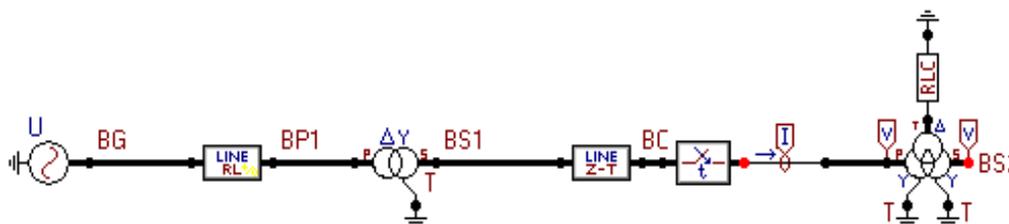


FIGURA 19 - CIRCUITO PARA SIMULAÇÃO DA ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR

Os elementos do circuito serão:

Fonte Trifásica - Tipo 14	
	U/I = 0
	Amp. = 10038
	f = 60
	Pha = -90
	A1 = 0
	Tsta = -1
	Tsto = 1

Fonte que representa o equivalente da tensão do gerador

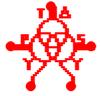
Elemento RL Acoplado - Linha Monofásica	
	Ro = 0.0061
	Lo = 0.244
	R+ = 0.0058
	L+ = 0.2329

Componente que representa a impedância equivalente do gerador

Transformador Δ/Y Saturável			
	Io = 2.683	Curva de saturação (I x Fluxo)	
	Fo = 498.13	2.683	498.13
	Rmag = 1000000	18.976	547.95
	Rp = 0.0094	52.688	572.85
	Lp = 0.3085	136.818	597.76
	Vrp = 13.8		
	Rs = 0.87292		
	Lp = 28.566		
	Vrs = 132.79		
	Lag = -30		
	RMS = 0		

Linha Trifásica Transposta	
	R/l+ = 0.588
	R/l0 = 0.3234
	A+= 0.5206
	A0= 1.6815
	B+= 3.479
	B0= 2.3435
	L = 248.4
	ILINE = 0
IPUNCH = 0	

Chave Trifásica	
	T-cl = 0.029576
	T-op = 1
	Imar = 0

Transformador Y/Y/ Δ Saturável - Transformador a ser energizado			
	Io = 1.073	Curva de saturação (I x Fluxo)	
	Fo = 498.13	1.073	498.13
	Rmag = 1000000	7.59	547.95
	Rp = 2.226	21.075	572.85
	Lp = 93.95	54.727	597.76
	Vrp = 127.01		
	Rs = 0.1217		
	Lp = 0.271		
	Vrs = 34.64		
	Rt = 0.3561		
	Lt = 0.5836		
	Vrt = 10		
	Lag = 30		
	RMS = 0		

RLC Trifásico	
	R = 0
	L = 0
	C = 1.131

Componente utilizado para representar as capacitâncias utilizadas para referenciar os terminais do enrolamento em delta à terra, uma vez que não é aconselhável deixar o delta flutuante

Informações sobre os cartões Miscellaneous :

Cartão Miscellaneous (Simulation)				
DELTAT	TMAX	FREQ	XOPT	COPT
5×10^{-4}	2×10^{-1}	60	60	60

Cartão Miscellaneous (Integer)								
IOUT	IPL0T	IDOUBL	KSSOUT	MAXOUT	IPUN	MENSAV	ICAT	NENERG
500	1	1	1	1	0	0	1	0

4 TÓPICOS PARA REFLEXÃO

1. Obtenha o gráfico da tensão no primário e no secundário do transformador.
2. Determine o valor máximo de tensão e em que fase ela ocorre.
3. Obtenha o gráfico da corrente de "inrush" .
4. Determine o valor máximo da corrente de "inrush" e em que fase ela ocorre.
5. Na simulação anterior fizemos com que o transformador fosse energizado no instante que a tensão na fase "a" estava no zero. Agora ajuste o T-op da chave para um instante onde a tensão na fase "a" seja diferente de zero e responda as mesmas questões anteriores.
6. Compare as respostas obtidas no dois casos e explique as diferenças.

PRÁTICA 07

INJEÇÃO DE SURTOS EM SUBESTAÇÕES - DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

1 OBJETIVO

Estudar as sobretensões provocadas por descargas atmosféricas nos equipamentos que compõem uma subestação.

2 RESUMO TEÓRICO

Os equipamentos de uma subestação estão sujeitos, entre outras solicitações do sistema, à incidência de sobretensões transitórias provocadas pela queda de descargas atmosféricas nas linhas de transmissão. Considerando que a atenuação e a distorção dos surtos atmosféricos ocorrem muito rapidamente, somente os surtos originados nas proximidades das subestações podem alcançar os equipamentos com valores importantes. Os surtos atmosféricos podem ser provocados por incidência de descargas atmosféricas diretamente nos cabos das fases, usualmente denominada de falha de blindagem, ou por incidência nas torres e/ou cabos pára-raios, usualmente denominados de "backflashover".

As solicitações transitórias causadas por surtos atmosféricos são fortemente influenciadas pelas características das descargas atmosféricas, as quais são geralmente definidas por distribuições estatísticas de intensidades de corrente e tempos de frente de onda. A Figura 20 apresenta uma forma de onda típica de uma descarga atmosférica.

A literatura existente apresenta farto material sobre as características das descargas atmosféricas. As primeiras informações consideravam distribuições independentes para intensidades de corrente e tempos de frente de onda.

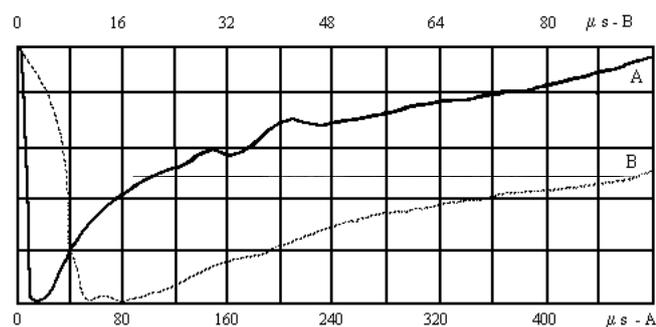


FIGURA 20 - FORMA DE ONDA TÍPICA DE UMA DESCARGA ATMOSFÉRICA

Posteriormente foi introduzido a taxa de crescimento como parâmetro estatístico no lugar da frente de onda e mais recentemente se consideram distribuições estatísticas das formas de onda com as intensidades. Para efeito deste item o surto será considerado com a forma de onda típica apresentada na Figura 20 e intensidade de corrente apropriada. A incidência de um surto de corrente diretamente num dos cabos das fases provoca um surto de tensão que se propaga a partir do ponto de incidência nas duas direções possíveis, com igual intensidade e de magnitude igual ao produto da intensidade de corrente dividida por duas vezes a impedância de surto do cabo condutor, tal como indicado na Figura 21.

FIGURA 21 - INCIDÊNCIA DIRETA NO CABO FASE

Desprezando-se a atenuação e a distorção face ao efeito corona e joule, verifica-se que, caso o surto de tensão seja inferior ao isolamento das cadeias de isoladores, o mesmo se propagará indefinidamente pela linha de transmissão até alcançar as subestações nas duas extremidades. Na prática, a atenuação e a dispersão são significativas e são importantes apenas para os surtos originados nas proximidades das subestações. Os surtos induzidos nos cabos pára-raios também

são ignorados. As considerações acima tem sido tradicionalmente utilizadas para os estudos de coordenação de isolamento de subestações, onde se considera que o surto injetado é sempre limitado pelo isolamento da linha de transmissão.

Quando as descargas atmosféricas atingem os cabos pára-raios ou as torres das linhas de transmissão ocorre um processo de propagação bem mais complexo do que o acima apresentado, uma vez que há diversos caminhos para os surtos. A Figura 22 mostra a incidência de uma descarga atmosférica no cabo pára-raios, em uma torre. A propagação, devido à incidência de uma descarga atmosférica no cabo pára-raios, inicia-se da mesma forma já anteriormente descrita. Devido aos diversos pontos de descontinuidade existentes, e considerando a importância da tensão induzida, há um complexo processo da propagação de ondas, que poderá provocar uma elevação da tensão da cadeia de isoladores, provocando um "flashover" e injetando um surto de tensão de amplitude significativa no cabo fase. Este surto é que, então, poderá alcançar os equipamentos da subestação. Neste caso é necessário uma representação mais elaborada para a modelagem do surto injetado, envolvendo os componentes indicados na Figura 22.

FIGURA 22 - INCIDÊNCIA DE UMA DESCARGA ATMOSFÉRICA NO CABO PÁRA-RAIOS

Uma análise aprofundada de todos os componentes envolvidos na modelagem dos surtos originados por descargas atmosféricas foge ao escopo deste capítulo e, por este motivo, apenas alguns aspectos referentes a modelagem dos componentes são abordados. Em se tratando de um fenômeno de alta frequência, uma vez que descargas atmosféricas tem frente de onda na faixa de poucos microssegundos, os cabos pára-raios e os cabos das fases das linhas de transmissão são representados por sua impedância de surto e tempo de

propagação. O sistema de aterramento pode ser representado por uma impedância equivalente.

3 MODELAGEM NO ATPDRAW

O estudo das descargas atmosféricas em subestações será realizado através do circuito mostrado na Figura 23.

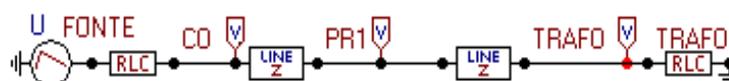
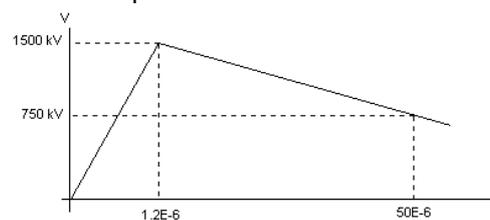


FIGURA 23 - CIRCUITO UTILIZADO PARA A SIMULAÇÃO DA DESCARGA ATMOSFÉRICA

Os elementos do circuito serão:

Fonte 2-Slope Ramp. - Tipo 13	
	U/I = 0
	Amp. = 1500×10^{-3}
	T0 = 1.2×10^{-6}
	A1 = 750×10^{-3}
	T1 = 50×10^{-6}
	Tsta = -1
Tsto = 1	

Fonte do tipo :



RLC Monofásico	
	R = 320
	L = 0
	C = 0

Representa a impedância da fonte

Linha RL Acoplada	
	R/I = 0
	A = 320
	B = 0.00000005
	L = 0
	ILINE = 2

Representa o barramento entre a fonte e o nó PR1

Linha RL Acoplada	
	R/I = 0
	A = 320
	B = 0.0000002
	L = 0
	ILINE = 2

Representa o barramento entre o nó PR1 e o nó TRAFO

RLC Monofásico	
	R = 0
	L = 0
	C = 0.003

Representa o Transformador pela sua capacitância para a terra

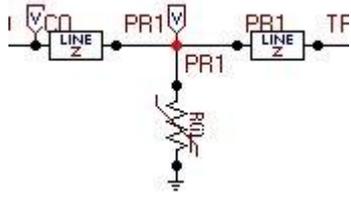
Informações sobre os cartões Miscellaneous :

Cartão Miscellaneous (Simulation)				
DELTAT	TMAX	FREQ	XOPT	COPT
1×10^{-8}	5×10^{-5}	0	0	0

Cartão Miscellaneous (Integer)								
IOUT	I PLOT	IDOUBL	KSSOUT	MAXOUT	IPUN	MENSAV	ICAT	NENERG
100	1	0	0	1	0	0	1	0

4 TÓPICOS PARA REFLEXÃO

1. Obtenha o gráfico da tensão nos nós CO, PR1 e TRAF0.
2. Determine os valores de pico das tensões obtidas no item 1.
3. Coloque um resistor não-linear, representando um pára-raios, no nó PR1 e obtenha os dados solicitados nos itens anteriores.

Resistor Não Linear Tipo 99				
	Vflash = 0	Característica não-linear		
	Tdelay = 1		Corrente(A)	Tensão (V)
	Jump = 1		1	457000
	VSEAL = 0		10	481000
		100	517000	
		500	554000	
		1000	573000	
		3000	610000	
		5000	631000	
		10000	673000	
		15000	708000	
		20000	743000	

4. Compare os valores dos picos de tensão antes e depois da colocação dos pára-raios.
5. Obtenha o gráfico da corrente e da energia no pára-raios.
6. Modele um surto de tensão de 2000 kV - 1.2/50 μ s e repita o item 4.

PRÁTICA 08

SOBRETENSÕES PROVOCADAS POR CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO

1 OBJETIVO

Estudar os fenômenos de sobretensões que acontecem durante a ocorrência de um curto-circuito monofásico em um sistema elétrico.

2 RESUMO TEÓRICO

A importância dos estudos de aplicação de falta se prende basicamente a dois fatos. O primeiro é de que as sobretensões transitórias e sustentadas geradas em um sistema quando da ocorrência de um curto-circuito são fatores decisivos na seleção dos pára-raios, uma vez que estes são escolhidos de modo a não atuarem dinamicamente para esta manobra pois, em caso contrário, a sua capacidade de absorção de energia seria excedida. Baseado nos níveis de proteção oferecidos pelos pára-raios, são aplicadas margens de segurança que levam à determinação dos níveis de isolamento a impulso atmosférico (BIL) e de manobra (BSL) dos equipamentos. O segundo fato é que este fenômeno tem a si associados dois riscos:

- a) Risco de um curto-circuito monofásico evoluir para uma falta polifásica;
- b) Risco de um curto-circuito monofásico causar um segundo defeito em uma outra linha do sistema devido ao aparecimento de sobretensões elevadas.

Os estudos de eliminação de falta são importantes no sentido de que os pára-raios devem limitar as sobretensões decorrentes desta operação a níveis compatíveis com a suportabilidade dos equipamentos por eles protegidos, drenando

uma energia que esteja dentro do limite de sua capacidade de absorção. Além disto, outro fator de importância é que os disjuntores devem suportar as tensões através de seus polos quando da abertura de uma linha visando a eliminação do defeito.

As sobretensões originadas de aplicações de falta podem ser entendidas como a composição de ondas trafegantes, devido à aplicação do curto propriamente dito, com as tensões impostas pelo sistema em regime. Com relação à primeira parcela, ou seja, a componente transitória, dois tipos se destacam:

- a) Nas fases sãs devido ao próprio transitório e ao deslocamento do neutro;
- b) Nas fases defeituosas devido ao próprio transitório de modificação do valor da tensão no ponto. Neste caso o curto pode ser analisado como a injeção de uma onda de módulo igual e polaridade oposta à tensão antes do defeito, de modo que o valor resultante da tensão no ponto da falta seja zero. Este fato é melhor visualizado pelas Figura 24 e Figura 25.

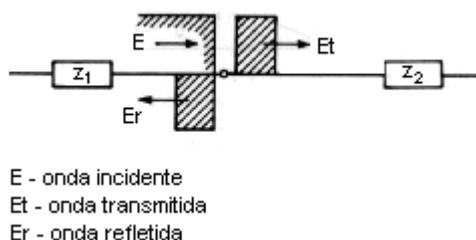


FIGURA 24 - TRANSMISSÃO E REFLEXÃO DE ONDA

As tensões transmitidas E_t e refletidas E_r são expressas em função da onda incidente E por:

$$E_t = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} E \quad \text{e} \quad E_r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} E$$

onde:

Z_1 - impedância característica por onde a onda chega;

Z_2 - associação de todas as impedâncias características conectadas a Z_1 .

No caso de um curto-circuito $Z_2 = 0$. Tem-se então $E_t = 0$ e $E_r = -E$, conforme é mostrado na Figura 25.

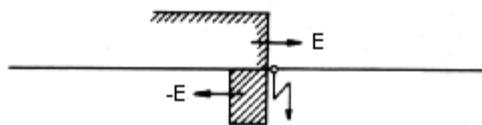


FIGURA 25 - APLICAÇÃO DO CURTO

A manobra de eliminação de falta, quando esta operação for feita sem que haja abertura de linha (por exemplo, curto no barramento) pode ser analisada considerando que no circuito da Figura 26 a chave fecha quando a tensão da fonte passar pelo máximo, sem tensão inicial através do capacitor. Isto é equivalente a uma eliminação do defeito (no zero de corrente) através do capacitor, havendo, com este chaveamento, uma redistribuição da tensão através de um circuito oscilatório.

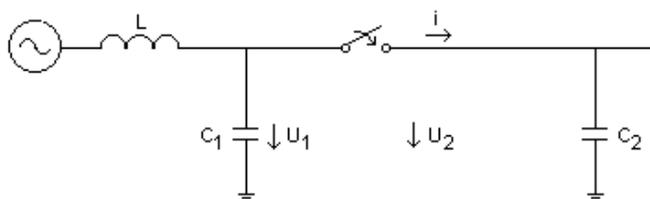


FIGURA 26 - ELIMINAÇÃO DE FALTA

No caso de um disjuntor operar no sentido de retirar a linha faltosa, esta análise pode ser feita de forma semelhante à abertura de circuitos capacitivos.

Com relação aos estudos de eliminação de falta, procura-se também verificar as sobretensões decorrentes da abertura de todos os defeitos e, assim como nos casos de aplicação de falta, monitora-se a tensão não somente -no local onde ocorreu o curto mas também ao longo do resto do sistema, já que o máximo valor de sobretensão não ocorre necessariamente no ponto defeituoso. Quando o disjuntor operar no sentido de eliminar a corrente de falta, as sobretensões que ocorrem podem exceder a 1,7 p.u. e se manifestar tanto nas fases sãs da linha defeituosa, como em linhas ou barras não defeituosas em outros pontos do sistema. Nestes casos específicos, procura-se verificar também as tensões através de cada pólo do disjuntor, bem como quanto tempo após a abertura ocorrerá o valor máximo e a taxa de crescimento destas tensões. Estes estudos são de extrema importância para a especificação de disjuntores.

Dependendo das características do circuito sob a análise, pode-se estudar aberturas monopolares (para religamento monopolar) e abertura tripolar (para religamento tripolar). Diversos fatores influenciam no valor das sobretensões resultantes da aplicação e eliminação de falta, sendo que, para ambos os fenômenos, os mais importantes são:

- a) Natureza da falta;
- b) Comprimento da linha de transmissão;
- c) Grau de compensação da linha de transmissão;
- d) Grau de aterramento do sistema;
- e) Local da falta.

No caso particular de aplicação de defeito, observa-se que para uma mesma configuração do sistema as sobretensões não são constantes, uma vez que dependem do ponto da onda de tensão em que o defeito ocorre. Desta forma, a pesquisa dos valores máximos é feita admitindo-se uma distribuição sistemática de modo a cobrir toda a onda de tensão.

Um outro fator de importância é a resistência de falta, sendo que a sua presença influencia no sentido de diminuir os valores das sobretensões. Na análise da eliminação de curtos-circuitos, é necessário também variar-se a seqüência de abertura dos polos dos disjuntores, procurando-se obter os casos mais críticos de sobretensões e as piores tensões atingidas entre os contatos dos disjuntores (TRT).

O defeito mais comumente estudado é o curto-circuito monofásico, uma vez que esta é a falta mais freqüente em um sistema de transmissão. Assumindo-se, para um sistema de neutro isolado, que o valor de pico da componente transitória ocorre simultaneamente com o pico da tensão à freqüência industrial, a sobretensão decorrente deste defeito poderá atingir, teoricamente, $\sqrt{3} + 1 = 2.73$ vezes o valor de pico da tensão fase-terra. Na prática, a componente transitória não é composta de somente uma única freqüência, mas é um fenômeno de multi-freqüências. Suas amplitudes máximas não ocorrem todas no mesmo instante que o pico da tensão fase-terra à freqüência industrial. Por esta razão, as sobretensões são geralmente bem abaixo de um fator 2.7, sendo elevadas somente em casos excepcionais de

sistemas radiais. O valor da elevação da tensão nas fases sãs é reduzido quando mais transformadores próximos ao local da falta são aterrados diretamente ou via reatância de baixo valor ôhmico, o que é equivalente a se ter um X_0/X_1 baixo.

Costuma-se, entretanto, verificar as sobretensões resultantes da aplicação dos demais defeitos polifásicos envolvendo ou não a terra. Normalmente, durante a ocorrência de curtos fase-terra, as maiores sobretensões se localizam nas fases sãs, enquanto que para as demais faltas ocorrem nas fases defeituosas com valores e formas de onda bastante semelhantes, caracterizadas por envolver principalmente seqüência positiva.

Como o isolamento deve em qualquer circunstância ser capaz de suportar a sobretensão devido à ocorrência da falta, seria desapropriado e desnecessariamente oneroso projetar ou utilizar um disjuntor com equipamentos especiais (sincronizador) que limitasse as sobretensões de manobra para valores menores que os produzidos por faltas.

3 MODELAGEM NO ATPDRAW

O estudo das sobretensões provocadas por curto-circuito monofásico será realizado através do circuito mostrados na Figura 27.

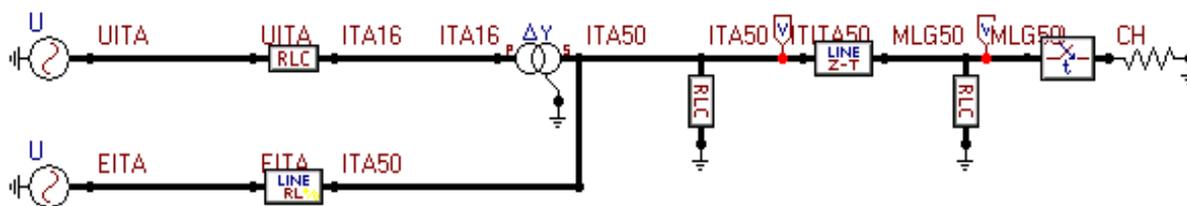


Figura 27 - Circuito para simulação

Os elementos do circuito serão:

Fonte Trifásica - Tipo 14	
	U/l = 0
	Amp. = 12826
	f = 60
	Pha = 69.95
	A1 = 0
	Tsta = -1
	Tsto = 1

Fonte que representa o equivalente da tensão do gerador de Itaparica (nó UITA)

RLC Trifásico	
	R = 0
	L = 0.0607
	C = 0

Componente que representa a impedância equivalente do gerador de Itaparica (nó UITA)

Fonte Trifásica - Tipo 14	
	U/l = 0
	Amp. = 509205
	f = 60
	Pha = 79.27
	A1 = 0
	Tsta = -1
	Tsto = 1

Fonte que representa o equivalente do sistema em Itaparica (nó ITA50)

Linha RL Acoplada	
	Ro = 0.5
	Lo = 14.25
	R+ = 0.75
	L+ = 50

Componente que representa a impedância equivalente do sistema em itaparica (nó ITA50)

Transformador Δ/Y Saturável	
	Io = 1
	Fo = 0.001
	Rmag = 1000000
	Rp = 0.001
	Lp = 0.0512
	Vrp = 16
	Rs = 0.004
	Lp = 0.1833
	Vrs = 295.98
	Lag = -30
	RMS = 0

RLC Trifásico	
	R = 8.33
	L = 2500
	C = 0

Componente que representa a compensação shunt da linha de transmissão (nó ITA50 e MLG50)

Linha Trifásica Transposta	
	R/l+ = 0.026
	R/l0 = 0.364
	A+= 0.328
	A0= 1.376
	B+= 5.096
	B0= 3.42
	L = 215
	ILINE = 0
IPUNCH = 0	

Chave Trifásica	
	T-cl = 0.03
	T-op = 0.09
	Imar = 0

Resistor	
	R = 0.001

Informações sobre os cartões Miscellaneous :

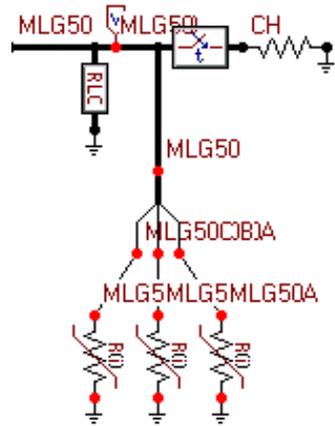
Cartão Miscellaneous (Simulation)				
DELTAT	TMAX	FREQ	XOPT	COPT
4×10^{-5}	2×10^{-1}	60	60	60

Cartão Miscellaneous (Integer)								
IOUT	IPLT	IDOUBL	KSSOUT	MAXOUT	IPUN	MENSAV	ICAT	NENERG
1000	1	1	1	1	0	0	1	0

4 TÓPICOS PARA REFLEXÃO

1. Obtenha o gráfico das tensões nas fases "a" , "b" e "c" com seus respectivos valores máximos, no nó MLG50.
2. Obtenha o gráfico das Corrente na fase "a" com seu respectivo valor máximo.
3. Aumentando o valor do resistor, que representa a resistência de curto-circuito (nó CH), para 50Ω , responda os itens anteriores.

4. Retirando a compensação shunt da linha de transmissão, responda novamente os itens 1 e 2.
5. Para o circuito original, coloque um pára-raios no nó MLG50 e responda os itens 1 e 2.

Resistor Não Linear Tipo 99				
	Vflash = 0		Característica não-linear	
	Tdelay = 1			
	Jump = 1		1	475000
	VSEAL = 0		10	481000
		100	517000	
		500	554000	
		1000	573000	
		3000	610000	
		5000	631000	
		10000	673000	
		15000	708000	
		20000	743000	

6. Compare os resultados obtidos nos itens anteriores.

PRÁTICA 09

MÉTODOS DE CONTROLE DAS SOBRETENSÕES - USO DO RESISTOR DE PRÉ-INSERÇÃO

1 OBJETIVO

Estudar, dentre os vários métodos de controle de sobretensão, o uso do resistor de pré-inserção.

2 RESUMO TEÓRICO

As sobretensões em um sistema de transmissão não podem ser evitadas, assim como a sua total supressão é extremamente difícil. Entretanto, suas magnitudes podem ser limitadas de modo a ficarem compatíveis com os níveis de isolamento dos equipamentos do sistema.

Existem diversas formas para controlar as sobretensões, sendo que os mecanismos especiais utilizados para este fim devem levar em consideração que cada tipo de sobretensão é dependente das características dos equipamentos usados, da configuração do sistema e dos seus critérios operativos.

Um dos meios mais efetivos na redução das sobretensões causadas por operações de chaveamentos é a inserção de resistores, como por exemplo, os arranjos mostrados na Figura 28.

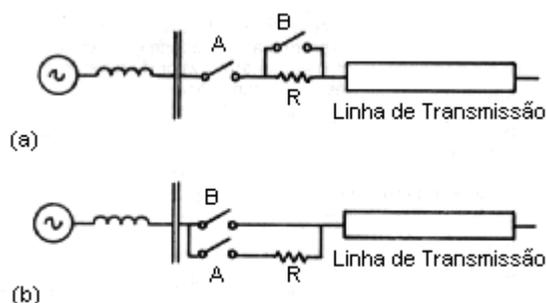


FIGURA 28 - ARRANJOS PARA CHAVEAMENTO DE UMA LINHA USANDO RESISTOR DE PRÉ-INSERÇÃO

No caso da energização da linha, inicialmente fecha-se a chave A colocando-se o resistor R em série, entre a fonte e a linha de transmissão. Após um breve período de tempo fecha-se a chave B curto-circuitando desta forma o resistor. Assim, na realidade, a linha é energizada em dois estágios, com cada um deles produzindo uma determinada sobretensão. A primeira delas é devida à energização através do resistor e a segunda é causada pelo "by-pass" do resistor. As magnitudes de ambas as sobretensões dependem do valor do resistor de pré-inserção usado, de acordo com as curvas mostradas na Figura 29.

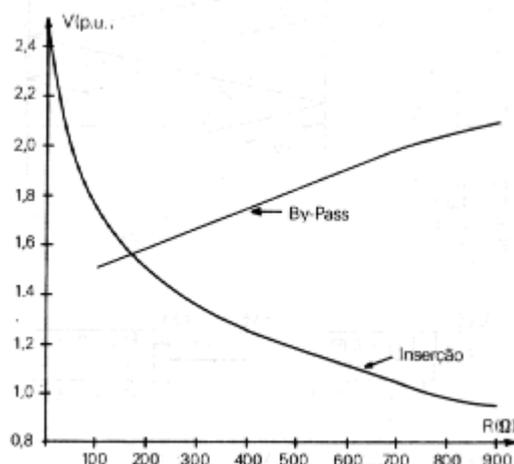


FIGURA 29 - TENSÕES RESULTANTES DA INSERÇÃO E DO BY-PASS DO RESISTOR DURANTE A MANOBRA DE ENERGIZAÇÃO

Estas duas curvas se cortam em um determinado ponto que corresponde ao valor ótimo do resistor, cuja magnitude depende basicamente dos seguintes fatores:

- Potência de curto-circuito da fonte;
- Comprimento da linha;
- Grau de compensação da linha.

Em regra geral, entretanto, este valor ótimo é da ordem da impedância de surto da linha.

Os tempos de inserção normalmente utilizados se encontram na faixa de 6 a 15 milissegundos, sendo que a condição a ser obedecida é que o resistor não deve ser curto-circuitado antes que a primeira reflexão na extremidade aberta da linha

retorne ao terminal da fonte, isto é, de modo a ser efetivo, o tempo de permanência deve ser maior que duas vezes o tempo de transito da linha.

Sendo T o tempo de trânsito da linha, verifica-se que se o resistor for curto-circuitado em um tempo inferior a $2T$, a tensão através do resistor será V_1 . Esta tensão trafegará até a extremidade aberta da linha onde seu valor será duplicado, elevando a tensão neste ponto a um nível igual àquele que ocorreria caso a linha tivesse sido energizada sem resistor de pré-insersão. Entretanto, se o resistor for curto-circuitado em um tempo superior a $2T$, a tensão através do mesmo será V_2 , sendo $V_2 < V_1$. Neste caso, a tensão na extremidade aberta da linha atingirá um valor inferior ao da situação anterior. Verifica-se que a partir de um certo valor, a sobretensão se torna insensível ao aumento do tempo de permanência.

Um outro fator que deve ser levado em conta no dimensionamento do resistor é a quantidade de energia por ele dissipada. Com o aumento no valor do resistor, a corrente que flui através dele diminui, levando-o a absorver menor energia. Por essa razão, deve-se selecionar um resistor igual ou maior que aquele correspondente ao valor ótimo que atenda às condições pré-determinadas de máxima sobretensão permitida.

O sistema se comporta de maneira análoga quando da ocorrência de um religamento cujas Sobretensões resultantes tendem a ser mais elevadas do que no caso da energização, devido a presença da carga armazenada na linha de transmissão. Com a utilização de resistores de pré-inserção, estas sobretensões são bastante atenuadas.

As sobretensões transitórias causadas pela abertura de disjuntores podem também ser reduzidas pela inserção de resistores, em geral de valor superior aqueles usados no fechamento.

3 MODELAGEM NO ATPDRAW

O estudo da utilização do resistor de pré-inserção será realizado através do circuito mostrados na Figura 30 , entretanto o mesmo não será montado de uma vez. Devemos acompanhar as questões e construir o circuito a medida que as questões solicitarem.

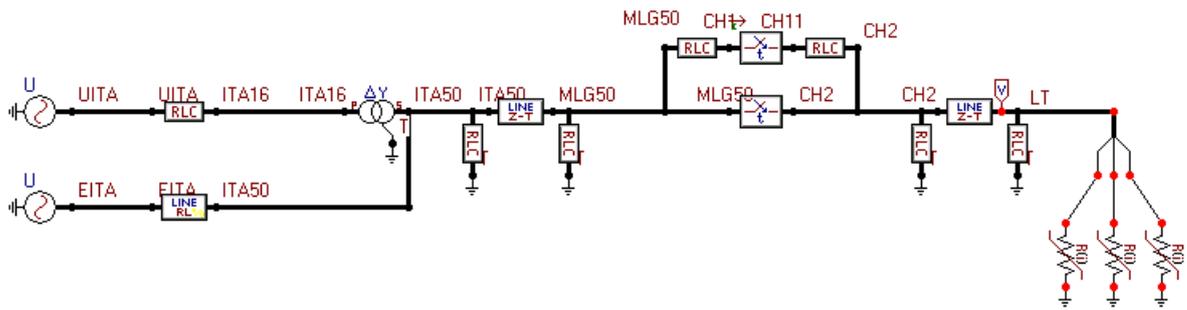


FIGURA 30 - CIRCUITO FINAL PARA SIMULAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DO RESISTOR DE PRÉ-INSERÇÃO

Os elementos do circuito serão:

Fonte Trifásica - Tipo 14	
	U/I = 0
	Amp. = 12826
	f = 60
	Pha = 69.95
	A1 = 0
	Tsta = -1
Tsto = 1	

Fonte que representa o equivalente da tensão do gerador de Itaparica (nó UITA)

RLC Trifásico	
	R = 0
	L = 0.0607
	C = 0

Componente que representa a impedância equivalente do gerador de Itaparica (nó UITA)

Fonte Trifásica - Tipo 14	
	U/I = 0
	Amp. = 509205
	f = 60
	Pha = 79.27
	A1 = 0
	Tsta = -1
Tsto = 1	

Fonte que representa o equivalente do sistema em Itaparica (nó ITA50)

Linha RL Acoplada	
	Ro = 0.5
	Lo = 14.25
	R+ = 0.75
	L+ = 50

Componente que representa a impedância equivalente do sistema em Itaparica (nó ITA50)

Transformador Δ/Y Saturável	
	$Io = 1$
	$Fo = 0.001$
	$Rmag = 1000000$
	$Rp = 0.001$
	$Lp = 0.0512$
	$Vrp = 16$
	$Rs = 0.004$
	$Lp = 0.1833$
	$Vrs = 295.98$
	$Lag = -30$
$RMS = 0$	

RLC Trifásico	
	$R = 8.33$
	$L = 2500$
	$C = 0$

Componente que representa a compensação shunt da linha de transmissão (nó ITA50 e MLG50)

Linha Trifásica Transposta	
	$R/I+ = 0.026$
	$R/I0 = 0.364$
	$A+ = 0.328$
	$A0 = 1.376$
	$B+ = 5.096$
	$B0 = 3.42$
	$L = 215$
	$ILINE = 0$
	$IPUNCH = 0$

Linha de transmissão entre os nós ITA50 E MLG50

Chave Trifásica	
	$T-cl = 0.02$
	$T-op = 1$
	$Imar = 0$

Chave para energização da linha (entre o nó MLG50 e CH2)

Chave Trifásica	
	$T-cl = 0.01$
	$T-op = 1$
	$Imar = 0$

Chave para inserção dos resistores de pré-inserção (entre o nó CH1 e CH11)

RLC Trifásico	
	$R = 200$
	$L = 0$
	$C = 0$

Resistores de pré-inserção instalados entre o nós MLG50 e CH1 e entre CH11 e CH2

Linha Trifásica Transposta	
	$R/I+ = 0.017$
	$R/I0 = 0.39$
	$A+ = 0.267$
	$A0 = 1.484$
	$B+ = 6.12$
	$B0 = 2.866$
	$L = 219$
	$ILINE = 0$
	$IPUNCH = 0$

Linha de transmissão a ser energizada com o resistor de pré-inserção (entre os nós CH2 e LT)

RLC Trifásico	
	R = 5.56
	L = 1666.7
	C = 0

Componente que representa a compensação shunt da linha de transmissão a ser energizada (nó CH2 e LT)

Resistor Não Linear Tipo 99			
	Vflash = 0	Característica não-linear	
	Tdelay = 1	Corrente(A)	Tensão (V)
	Jump = 1	1	475000
	VSEAL = 0	10	481000
		100	517000
		500	554000
		1000	573000
		3000	610000
		5000	631000
		10000	673000
		15000	708000
	20000	743000	

Resistor não-linear para o pára-raios colocado no nó LT

Informações sobre os cartões Miscellaneous :

Cartão Miscellaneous (Simulation)				
DELTAT	TMAX	FREQ	XOPT	COPT
4×10^{-5}	2×10^{-1}	60	60	60

Cartão Miscellaneous (Integer)								
IOUT	IPLT	IDOUBL	KSSOUT	MAXOUT	IPUN	MENSAV	ICAT	NENERG
1000	1	1	1	1	0	0	1	0

4 TÓPICOS PARA REFLEXÃO

1. Monte o circuito da Figura 30 sem a chave e os resistores de pré-inserção, sem a compensação shunt da linha de transmissão a ser energizada e sem os pára-raios. Determine a tensão no final da linha a ser energizada (nó LT).
2. Acrescente ao circuito do item 1 a compensação shunt da linha de transmissão a ser energizada e determine a tensão no final da linha a ser energizada (nó LT).
3. Acrescente ao circuito do item 2 a chave e os resistores de pré-inserção e determine a tensão no final da linha a ser energizada (nó LT).

-
4. Altere o T-cl da chave entre os nós MLG50 e CH2 para 0.012s e determine a tensão no final da linha a ser energizada (nó LT).
 5. Explique a diferença no valor de tensão que ocorreu entre os itens 3 e 4.
 6. Um outro método eficiente para redução das sobretensões é a utilização de pára-raios, como foi visto nas práticas anteriores, instale o pára-raios do nó LT e determine a tensão no final da linha a ser energizada (nó LT).
 7. Compare os valores de pico das sobretensões nos itens 1, 2 ,3 e 6 e explique o porque das diferenças.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1].Colombo, Roberto - Disjuntores em Sistemas de Potência - 1ª Edição - São Paulo :Siemens S.A., 1990;
- [2].D'Ajuz, Ary - Transitórios elétricos e Coordenação de Isolamento, Aplicação em sistemas de potência de alta tensão - Rio de Janeiro - FURNAS - Universidade Federal Fluminense / EDUFF, 1987;
- [3].Pereira, Marco Polo ; Filho, Jorge Amon - Curso Básico sobre a utilização do ATP, CLAUE Comitê Latino Americano de Usuários do EMPT/ATP - Novembro de 1996;
- [4].Curso sobre Aplicação do Programa ATP em Sistemas Elétricos de Potência - CHESF;
- [5].Prikler, László ; Hoidalen, Hans Kr. - APTDRAW for Windows 3.1x/95/NT, version 1.0, User's Manual - November 1998;
- [6].Comitê Latino Americano de Usuários do EMPT/ATP, CLAUE - <http://www.furnas.gov.br/atp/index.htm>.