



### 1ª Questão – RESOLUÇÃO

Adota-se, como valores de base, no barramento infinito 1:  $V_b = 220 \text{ kV}$  e  $S_b = 100 \text{ MVA}$ . Os valores nominais do banco de transformadores são:

Tensão primária: 220 kV; Tensão secundária: 88 kV; Potência nominal: 60 MVA; Reatância percentual: 9%.

Os valores de base no barramento 4 são:  $V_b' = 88 \text{ kV}$  e  $S_b' = 100 \text{ MVA}$ .

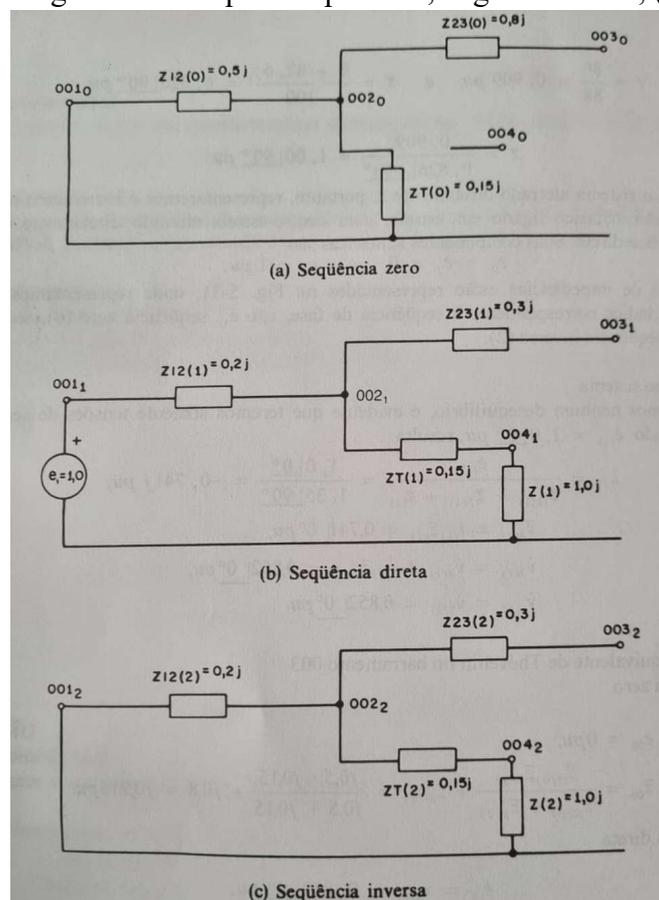
As impedâncias das linhas já estão referidas às bases adotadas, portanto, não se alteram. A impedância do transformador nas bases adotadas será:

$$z_T = 0,09j \frac{220^2}{60} \frac{100}{220^2} = 0,15j \text{ pu.}$$

A impedância de fase da carga equivalente ligada em estrela com centro-estrela isolado é  $z = \frac{v^2}{s^*}$ , mas sendo  $v = \frac{80}{88} = 0,909 \text{ pu}$  e  $s = \frac{0+82,6j}{100} = 0,826 \angle 90^\circ \text{ pu}$ , logo  $z = 1 \angle 90^\circ \text{ pu}$ .

Admite-se o sistema aterrado diretamente, sendo, portanto, representado por um gerador trifásico ligado em estrela, com centro-estrela aterrado diretamente e com sequência de fase direta. Suas componentes simétricas são:  $e_0 = e_2 = 0$  e  $e_1 = 1 \text{ pu}$ .

a) Determinar os diagramas de sequência positiva, negativa e zero; (0,5 pt)





b) A tensão em todas as barras do sistema; (1,0 pt)

Como não há desequilíbrios, tem-se somente tensões de sequência direta. Adotando-se  $e_1 = 1\angle 0^\circ pu$ , resulta:  $i_1 = \frac{e_1}{z_{12(1)} + z_{T(1)} + z_1} = -0,741j pu$ .

Logo,  $v_{4(1)} = i_1 z_1 = 0,741\angle 0 pu$ ,

$v_{2(1)} = v_{4(1)} + i_1 z_{T(1)} = 0,852\angle 0 pu$

$v_{3(1)} = v_{2(1)} = 0,852\angle 0 pu$

c) O gerador equivalente de Thévenin, visto pela barra 003, para as três seqüências. (0,5pt)

Seq. Zero:  $e_{00} = 0 pu$ ;  $z_{00} = \frac{z_{12(0)} z_{T(0)}}{z_{12(0)} + z_{T(0)}} + z_{23(0)} = 0,915j pu$ .

Seq. Direta:  $e_{11} = v_{3(1)} = 0,852\angle 0^\circ pu$ ;  $z_{11} = \frac{z_{12(1)}(z_{T(1)} + z_1)}{z_{12(1)} + z_{T(1)} + z_1} + z_{23(1)} = 0,470j pu$ .

Seq. Inversa:  $e_{22} = 0 pu$ ;  $z_{22} = z_{11} = 0,470j pu$ .

## 2ª Questão – RESOLUÇÃO

a) Para aplicar o método de Newton-Raphson para um problema de fluxo de potência para uma k-ésima e uma n-ésima barras, considera-se inicialmente:

$V_k = V_k \angle \delta_k$ ,  $V_n = V_n \angle \delta_n$  e  $Y_{kn} = Y_{kn} \angle \theta_{kn}$ .

Pela fórmula de Euler:

$$P_k = \sum_{n=1}^N |V_k V_n Y_{kn}| \cos(\theta_{kn} + \delta_n - \delta_k)$$

$$Q_k = - \sum_{n=1}^N |V_k V_n Y_{kn}| \sin(\theta_{kn} + \delta_n - \delta_k)$$

Para este caso:

1. Para todas as barras de carga as potências  $P_k$  e  $Q_k$  são conhecidas e serão designadas por  $P_{ks}$  e  $Q_{ks}$ , sendo as potências líquidas injetadas nas barras, ( $P_{ks} = P_{kGerada} - P_{kCarga}$  e  $Q_{ks} = Q_{kGerada} - Q_{kCarga}$ );

2. Estima-se as grandezas desconhecidas, isto é, para todas as barras de carga estima-se  $|V|$  e  $\delta$ ;

3. Substitui-se esses valores estimados nas equações de  $P_k$  e  $Q_k$  para calcular as potências ativas e reativas. Essas potências calculadas serão designadas por  $P_{kc}^{(0)}$  e  $Q_{kc}^{(0)}$ ;

4. Calcula-se os valores de  $\Delta P_k$  e  $\Delta Q_k$ :

$$\Delta P_k^{(0)} = P_{ks} - P_{kc}^{(0)}$$

$$\Delta Q_k^{(0)} = Q_{ks} - Q_{kc}^{(0)}$$



Os subscritos *s* e *c* significam, respectivamente, valores especificados e calculados. Assim, considerando um sistema com 2 barras, no qual a barra 1 é a de referência e a 2 uma barra de carga, tem-se a seguinte equação matricial associada:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(0)} \\ \Delta Q_2^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(0)} \\ \Delta \delta_3^{(0)} \end{bmatrix}$$

A equação anterior é resolvida invertendo-se a matriz Jacobiana. Os valores obtidos para  $\Delta \delta_2$  e  $\Delta \delta_3$  são adicionados às estimativas prévias de  $V_k$  e  $\delta_k$  para se obter novos valores, os quais serão as estimativas para a próxima iteração do processo. O procedimento é então repetido até que os termos das variações  $\Delta P_2$  e  $\Delta Q_2$ , fiquem tão pequenos quanto a precisão desejada, ou até um número máximo de iterações previamente estabelecido.

b) As submatrizes da matriz jacobiana representam as sensibilidades entre as potências ativas e reativas e as tensões (módulo e ângulo) nos barramentos. As sensibilidades  $\frac{\partial P}{\partial \theta}$  e  $\frac{\partial Q}{\partial V}$  são maiores que  $\frac{\partial P}{\partial V}$  e  $\frac{\partial Q}{\partial \theta}$ . Nos métodos desacoplados, o modelo de rede mantém-se o mesmo, realizando-se simplificações na matriz jacobiana de sensibilidades, sendo o resultado praticamente o mesmo que com o uso do Newton Raphson. Devido à simplificação, as submatrizes de sensibilidade  $\frac{\partial P}{\partial V}$  e  $\frac{\partial Q}{\partial \theta}$  são ignoradas, causando o desacoplamento, podendo substituí-los por zero na matriz jacobiana.

c) No método desacoplado rápido, divide-se cada resíduo pela tensão no próprio barramento analisado, de forma a acelerar o processo de convergência. Algumas hipóteses devem ser levadas em consideração para o cálculo das sensibilidades remanescentes:

1. Sistemas pouco carregados  $\rightarrow \cos(\theta_{km}) \cong 1$ ;
2. Em linhas de EAT e UAT a relação  $B_{km}/G_{km}$  é alta, de 5 a 20, aproximadamente. Logo,  $B_{km} \gg G_{km} \sin(\theta_{km})$ , desprezando-se assim o termo  $G_{km} \sin(\theta_{km})$ ;
3. As reatâncias transversais nas barras (reatores, capacitores, cargas) são muito superiores às reatâncias série, logo:  $B_{kk} \times V_k^2 \gg Q_k$ ;
4. As tensões nos barramentos estão sempre próximas à 1 p.u.

Deste modo, com as equações das submatrizes da matriz jacobiana agora simplificadas e independentes de  $\theta_{km}$ , não há necessidade de atualização das sensibilidades a cada iteração, acelerando o processo de cálculo.

### 3ª Questão – RESOLUÇÃO

a)  $S_N = \sqrt{3} V_{LL} I_N \rightarrow I_N = \frac{60 M}{\sqrt{3} 69k} \cong 500 A.$



b)  $1,5 \times I_N \leq I_{ajuste51} \leq I_{curtomínimo}$ . Considerando a relação de transformação do TC e a maior sensibilidade possível,  $I_{ajuste51} > \frac{1,5 \times 500}{600/5} \sim 7 A$ .

c) O ajuste do instantâneo é realizado a partir de:  $I_{ajuste50} = I_{CC85\%LT}$ . Para realizar o cálculo do curto-circuito à 85% da LT, procede-se da seguinte forma:

1. Cálculo da impedância equivalente da subestação A:  $X_{SE} = \frac{69k}{\sqrt{3} 10k} = 3,98 \text{ ohm}$ ;
2. Para determinar a impedância da linha de transmissão  $X_{LT}$ :  $X_{SE} + X_{LT} = \frac{69}{\sqrt{3} 7k} = > X_{LT} = 1,70 \text{ ohm}$ ;
3. Cálculo da corrente à 85% da LT:  $I_{CC85\%LT} = \frac{69k}{\sqrt{3} (X_{SE} + 0,85X_{LT})} \cong 7329 A$ .

Levando-se em consideração a RTC e o tap do relé 51 determinado anteriormente:

$$I_{ajuste50} = \frac{7329}{\frac{600}{5} \times 7} \cong 8,72.$$

d)  $I_{ajus \text{ neutro}} = 0,3 \times I_N = \frac{0,3 \times 500}{600/5} = 1,25$ . O tap aproximado pode ser 1,3.

#### 4ª Questão – RESOLUÇÃO

a) **Padrão de resposta:** a estabilidade de sistemas elétricos de potência está associada na capacidade do sistema em manter os valores de tensão e frequência dentro de uma faixa aceitável de valores, mesmo após uma perturbação. Em sistema de potência “tradicionais”, a geração é baseada em termoelétricas ou hidrelétricas que utilizam máquinas elétricas para gerar a energia. Essas máquinas rotativas possuem, de certa forma, uma energia armazenada em forma de energia cinética. E, quando há um distúrbio em que há um déficit de energia, essa energia armazenada é utilizada para garantir o balanço entre carga e geração. Essa resposta instantânea após o distúrbio é chamada de resposta inercial do sistema. Dependendo da inércia do sistema, a variação de frequência é maior ou menor.

Os conversores de fontes renováveis de energia são normalmente controlados para injetar uma corrente de forma a maximizar a geração, ou seja, de extrair a máxima potência do recurso natural, buscando o ponto de máxima potência (do inglês, MPP – Maximum Power Point). E, caso haja uma variação de tensão, a corrente será ajustada para manter a máxima potência. Por isso, esses conversores são chamados de seguidores de rede (do inglês, GFL – Grid-Following). Com essa característica, pode-se dizer que esses conversores não injetam mais ou menos energia quando há um distúrbio.

Assim, com o aumento da penetração de fontes baseadas em conversores, há uma tendência da geração tradicional, baseada em máquinas rotativas com inércia, por inversores controlados para injetar a máxima potência, não contribuindo para a reposta inercial do sistema. Por esse motivo, há uma preocupação com nível de penetração de fontes baseadas em inversores em que o sistema ainda se mantém estável após um distúrbio.

b) **Padrão de resposta:** Os inversores de fontes alternativas podem ser controlados para responder a um distúrbio injetando um adicional de energia, conforme acontece nas



máquinas de sistemas tradicionais. Essa resposta é chamada, do inglês, de FFR – Fast Frequency Response – que, em tradução livre, significa resposta rápida de frequência. Essa resposta rápida pode ser uma ação de controle, isto é, na detecção de variação de frequência, injeta-se mais energia ou pode ser natural, em que a resposta natural do conversor é injetar um adicionado de energia quando a frequência cair, por exemplo. No primeiro caso, trate-se de uma funcionalidade adicionada aos conversores seguidores de redes. No segundo caso, o conversor é controlado para impor uma certa inércia na tensão interna do conversor, como acontece em máquinas elétricas, isto é, a tensão interna do conversor não varia instantaneamente com a tensão terminal, criando um fluxo de potência natural quando há uma diferença de frequência. Esse último grupo de conversores são chamados de formadores de rede (do inglês, GLF – Grid Forming).

c) **Padrão de resposta:** Conforme explicado anteriormente, o conversor seguidor de rede pode ser controlado para apresentar uma resposta inercial ou pode possuir um controle cuja resposta seja natural, operando como um formador de rede. No primeiro caso, uma malha de estimação de variação de frequência é utilizada para definir um delta de potência na referência de potência fazendo que um adicionado de potência seja adicionado quando houver uma redução de frequência, por exemplo. Essa funcionalidade, muitas vezes, é chamada de inércia sintética. E, por exigir um adicionado de energia, muitas vezes requer que a fonte seja associada com algum tipo de sistema de armazenamento de energia.

No segundo caso, o conversor pode ser controlado como formador de redes que significa que a tensão interna do conversor não irá variar instantaneamente com a da rede. Existem alguns tipos de controle de formadores de redes, os mais citados na literatura são:

- 1) os baseados em controle de droop, cuja frequência ou a fase variam com a potência considerando uma função linear;
- 2) os baseados em modelo de máquina síncrona, em que a tensão interna do conversor é controlada baseada nas equações de máquina síncrona e de swing, destacando-se, o controle de máquina síncrona virtual e o synchronverter. E,
- 3) os baseados em oscilador virtual não linear, cuja tensão interna do conversor é definida a partir de uma função de dinâmica de um oscilador não linear.

#### 5ª Questão – **RESOLUÇÃO**

Podem ser considerados os seguintes métodos de aterramento de neutro utilizados em sistemas elétricos de potência genéricos:

- a. Neutro isolado;
- b. Neutro solidamente aterrado;
- c. Neutro aterrado por meio de resistência;
- e. Neutro aterrado por meio de reatância (não sintonizada);
- f. Neutro aterrado por meio de reatância sintonizada (bobina de Petersen), ou neutralizadores de faltas à terra ou neutro ressonante;
- g. Transformador de aterramento.

**Neutro isolado:** Nesse caso, o sistema será conectado à terra por meio das capacitâncias fase-terra relativas ao sistema. A corrente de falta fase à terra estaria dependente da resistência de falta e da capacitância de sequência zero. As correntes fase à terra em linhas aéreas, poderão ser extinguir em caso de magnitudes de valores reduzidos. No caso de



magnitudes mais elevadas, a auto extinção das correntes de falta durante a passagem por zero poderá ser mais difícil, visto que a influência da tensão de restabelecimento transitória (TRT) pode inviabilizar a auto-extinção dessa corrente. Uma falta com acesso à terra, irá resultar em um deslocamento das duas outras fases. Assim, os valores das tensões entre fase e terra assumirá valores de tensões de linha, pois as capacitâncias próprias das fases são carregadas como se fossem um capacitor em cada fase. Nesse caso, os esquemas de proteção comumente utilizados para detecção de faltas à terra não são adequados para essa topologia de aterramento devido ao valor reduzido da corrente de falta.

**Neutro solidamente aterrado:** Método mais simples, e será definido assim quando  $R_0 \leq X_1$  e  $X_0 \leq 3X_1$  ( $R_0$  e  $X_0$ , resistência e reatância de sequência zero, respectivamente, e,  $X_1$  é a reatância de sequência positiva do sistema).

Faltas com acesso à terra nesse caso irão resultar em correntes de amplitudes elevadas e acarretarão a abertura de todo o circuito. Assim, poderão ser verificados elevados valores de tensões de passo e/ou toque que são transferidas para pessoas, danos para equipamentos, interferência em sistemas de telecomunicações etc. Por outro lado, este sistema propicia na redução das sobretensões temporárias e transitórias durante ocorrências de faltas à terra. O religamento automático adotado nesse tipo de sistema, considera um número de tentativas previamente estabelecida, poderão representar um problema para cargas sensíveis de consumidores devido aos afundamentos de tensão. Verificamos dois tipos destes sistemas:

- os uniaterrados: um ponto único de aterramento, resultando que a corrente de falta retorna somente pelo ponto único de aterramento;
- os multiaterrados: o sistema é aterrado tanto na subestação, como ainda em cada transformador existente ao longo do circuito. Assim, a corrente de falta é dividida entre o condutor de neutro e a terra.

**Neutro aterrado por meio de resistência:** A utilização resistência entre neutro do sistema e à terra propicia a limitação da magnitude de corrente de falta à terra, reduzindo esforços térmicos de dispositivos, controlar sobretensões transitórias e limitar corrente de fuga.

- Aterramento através de resistência de alto valor: O sistema é aterrado através de um resistor de alto valor. O valor da resistência para este caso é igual ou menor do que o valor da reatância capacitiva total do sistema. Este método apresenta comportamento semelhante ao método com neutro não aterrado, com a diferença de fluir uma corrente de falta através do resistor.

Para que não ocorram sobretensões elevadas ou arcos intermitentes, um dos seguintes critérios devem ser respeitados:

1. A resistência de aterramento deve ser igual ou menor que a capacitância total do sistema:  $R_{aterr} \leq X_C$
2. A corrente que flui através do resistor deve ser maior ou igual à magnitude da componente capacitiva da corrente de falta:  $I_R \geq I_{Xc}$

Sendo:

- $R_{aterr}$  é a resistência de aterramento;
- $X_c$  é a reatância para terra capacitiva total do sistema;



- IR é a corrente de falta à terra através do resistor de aterramento;
- IXc é a corrente da componente capacitiva da corrente de falta.

No aterramento por alta resistência, assim como nos sistemas com neutro isolado, a tensão nas fases são multiplicadas por um fator de  $\sqrt{3}$  durante as faltas e a detecção é possível utilizando elementos direcionais de sequência zero sensíveis.

- Aterramento do neutro através de resistência de baixo valor: Se comparado ao esquema de neutro aterrado solidamente, uma resistência de valor reduzido, propiciará uma redução da magnitude da corrente de falta. Assim, os esforços térmicos nos dispositivos do sistema serão reduzidos. Nesse caso, ainda assim, a proteção terá condições de forma seletiva isolar o sistema em caso de falta, visto que corrente de falta ainda é suficiente elevada para fins de sensibilizar a atuação da proteção.

**Neutro aterrado por meio de reatância:** Este reator é usado para aterrar o neutro de sistemas trifásicos, a fim de limitar a corrente na eventual ocorrência de uma falta entre fase e terra. Em um sistema aterrado por reatância, a corrente de falta à terra disponível deve ser de pelo menos 25% e preferencialmente 60% da corrente de falta trifásica para evitar sobretensões transitórias graves ( $X_0 \leq 10 X_1$ , sendo que,  $X_0$  é a reatância de sequência zero e  $X_1$  é a reatância de sequência positiva do sistema). Nesse tipo de aterramento, a magnitude da corrente é mais elevada que o nível de corrente de falha desejável em um sistema aterrado por resistência. Portanto, o sistema resistência-terra não é uma alternativa ao sistema reatância-terra. A bobina não precisa dissipar uma alta carga de calor porque sua resistência é baixa.

**Neutro aterrado por meio de reatância sintonizada (bobina de Petersen ou neutro ressonante):** Método utilizado para fins de limitar a corrente de falta à terra e garantir um fornecimento de energia de qualidade, visto que possibilita a continuidade da operação do sistema de distribuição durante a ocorrência de uma falta à terra, reduzindo o número de interrupções no fornecimento de energia ao consumidor.

Este esquema, praticamente anula corrente de curto monofásico através da instalação de um reator sintonizado com as capacitâncias shunt da rede. “Sintonia entre a corrente de falta capacitiva e a indutiva relativa ao reator conectado ao neutro do transformador”. A reatância pode ser ajustada para a corrente de carga do sistema de modo que a corrente de falha fase-terra resultante é resistiva e de baixa magnitude, sendo que o ajuste visando que a corrente seja nula, de uma forma geral iria considerar que a sintonia fosse:

$$L_N = \frac{1}{3w^2C_0}$$

Sendo:  $C_0$ : capacitância de terra para fase,  $w$ : frequência de sintonia considerada como sendo a frequência da rede (60 Hz por exemplo),  $L_N$ : valor da indutância do reator de neutro ressonante.

Com o aterramento via reator sintonizado propicia que durante uma falta entre um dos condutores e a terra, a corrente que flui no reator de aterramento e a corrente que flui entre os condutores não faltosos são substancialmente iguais em magnitude e  $180^\circ$  defasados, na frequência do sistema.” Obtém-se, assim, um cancelamento mútuo entre estas correntes durante a falta, acarretando uma autoextinção do arco de tensão. Conforme os



valores comparativos desta reatâncias indutivas, o sistema poderá ser considerado totalmente compensado (sintonia em 100%), sobrecompensado ou subcompensado. Importante ressaltar que pode ser complicado estabelecer a condição de ajuste relativo à expressão anterior, visto que pode ser verificada um grau de incerteza na determinação da capacitância da rede. Assim, durante a duração da falta, uma corrente residual irá circular oferecendo perigo para pessoas e equipamentos.

**Transformador de aterramento:** É utilizado em um cenário em que o neutro não é acessível em um sistema de média tensão (enrolamento em configuração delta ou triângulo), é necessário estabelecer um neutro artificial. Assim, nesse caso o sistema é aterrado criando um neutro (referido como um transformador de aterramento). O neutro artificial poderá também usado quando há várias fontes paralelas. As conexões mais comuns de um transformador de aterramento que poderiam ser adotadas, são as seguintes:

- Transformador estrela-delta, sendo ponto neutro disponibilizado no lado primário, pois o lado delta é fechado sobre si mesmo e poderá ser utilizado para compensação de correntes de sequência zero. O neutro nesse caso poderá ser utilizado para aterramento direto à terra, ou por meio de um resistor de aterramento.
- Transformador estrela-delta cujo ponto de neutro no lado primário está diretamente aterrado, e um resistor limitador de corrente de falta é inserido no delta secundário em delta. Este sistema é economicamente preferível ao primeiro caso, uma vez que o resistor está no lado de baixa tensão e não no lado de alta tensão.
- Transformador na conexão zigzag (transformador trifásico com duas bobinas por fase, conectadas de forma cruzada e o resistor limitador é conectado entre o neutro ponto da bobina e terra. Esse resistor limitador poderia ser substituído por uma conexão solidamente aterrada em casos específicos, mas normalmente são utilizados.