Cálculos Expeditos em Redes de Distribuição

Virgílio Cortesão Abelaira
Eng. Electrotécnico (IST)
Director do Museu de Electricidade (EDP)

1. Introdução

Para caracterizar o poder de corte da aparelhagem, emprega-se hoje preferencialmente a corrente de curtocircuito.

Também para calcular correntes, quedas de tensão e perdas, e desde que o computador tenha recebido todos os parâmetros necessários, com os meios e os programas informáticos de que hoje se dispõe, a diferença em tempo não será grande entre fazer um cálculo mais rigoroso e uma estimativa grosseira, mesmo para toda uma rede, a partir de valores tão exactos quanto possível dos elementos da rede e considerando todos os níveis de tensão em jogo.

Talvez por isso tenha caído um pouco em desuso falar de potência de curtocircuito e fazer o seu cálculo, mesmo numa forma aproximada.

No entanto, há muitos casos em que a estimativa seria perfeitamente suficiente e em que não se justifica o esforço de lançar o programa informático completo (até, às vezes, por falta de alguns dados). Por outro lado, um cálculo aproximado permite obter ordens de grandeza e testar o programa que se está a utilizar.

Por isso, expõe-se aqui um método relativamente pouco conhecido, por não ser ensinado nas escolas.

Trata-se do método de redução de todos os parâmetros da rede à tensão de 10 kV e à potência de 1 MVA. Habitualmente usa-se o método de redução à unidade (p.u.) ou à tensão a cujo nível se querem conhecer as correntes, quedas de tensão e perdas.

Tentar-se-á mostrar que, para redes de média tensão, a redução a 10 kV e a 1 MVA é a que conduz às expressões mais simples e fáceis de utilizar, até em cálculo mental.

Com o método que se apresenta, o cálculo da potência de curtocircuito (em MVA), das quedas de tensão (em %) e das perdas (em kW) é feito com o recurso a expressões extremamente simples de fixar e manejar, sendo independente do nível de tensão. Só para o conhecimento das correntes (de carga e de curtocircuito) é necessário fazer a respectiva conversão ao nível de tensão em que circulam, e também para estas se dão expressões de cálculo aproximadas, mas simples.

Como se disse já, o método baseia-se na conversão à base 10 kV e 1 MVA de todos os parâmetros envolvidos: impedância equivalente da rede a montante, impedâncias dos transformadores e impedâncias das linhas. A conversão das impedâncias da rede a montante e dos transformadores é independente dos níveis de tensão em que são declarados, e só as impedâncias das linhas fazem intervir a sua tensão de funcionamento.

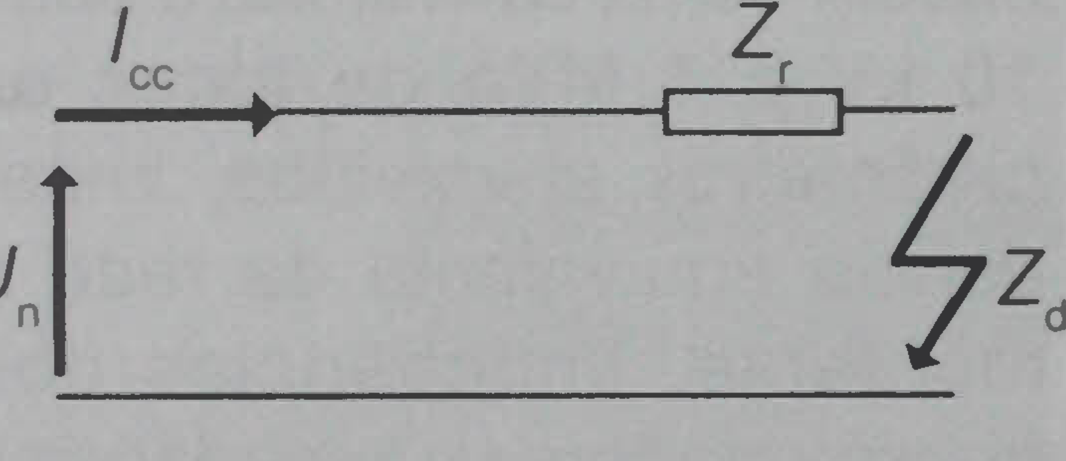
Para simplificar, e dado que se trata de um método expedito, não se discutirá aqui se as relações de transformação dos transformadores que ligam os vários níveis de tensão são exactamente a relação entre tensões nominais (ignorando-se a influência da variação dessa relação com as tomadas dos transformadores), nem se discutirá qual era o valor da tensão antes do defeito ou da ligação da carga, tomando-se para este o valor da tensão nominal.

Aplica-se o teorema de Thévenin, pelo qual a corrente que atravessa uma impedância que se ligue num ponto de uma rede é calculada pelo quociente entre a tensão pré-existente nesse ponto (ou seja, antes da ligação em causa) e a soma dessa impedância com a da rede vista do ponto de ligação.

2. Cálculo das impedâncias

2.1. Impedância da rede

Considere-se a figura



Na situação de curtocircuito puro a impedância de defeito é nula, $Z_d = 0$, donde

$$I_{cc} = \frac{U_n}{Z_r}$$

Multiplicando por $3U_n$ obtém-se

$$3U_n\, I_{cc} = \frac{3U_n^2}{Z_r}$$

Como U_n é a tensão simples e portanto $3U_n^2 = U_c^2$, se se designar a tensão composta (escolhida para tensão nominal) por U_c, vem

$$S_{cc} = \frac{U_c^2}{Z_r}$$

Trabalhando com U_c em kV, virá I_{cc} em kA e S_{cc} em MVA; fazendo U_c = 10 kV resulta uma expressão muito simples para relacionar a impedância da rede Z_r em ohms (a 10 kV e 1 MVA, mas omitir-se-á esta condição daqui em diante para não sobrecarregar o texto) e a potência de curtocircuito S_{cc} em MVA será

$$S_{cc} = \frac{100}{Z_r}$$

ou seja

$$Z_r = \frac{100}{S_{cc}}$$

Exemplo: se S_{cc}= 250 MVA então Z_r= 0,4 Ω.

2.2. Impedância de um transformador

A impedância de um transformador Z_t é a sua impedância de curtocircuito. É habitual expressá-la em percentagem p da impedância nominal da carga Z_k correspondente à sua potência nominal S_t:

$$Z_t = \frac{p}{100} Z_k$$

Como $S_t = 3U_n I_k = 3U_n^2 / Z_k = U_c^2 / Z_k$ deduz-se

$$Z_t = \frac{p}{100} \cdot \frac{U_c^2}{S_t}$$

Tomando U_c = 10 kV, I_k em kA e S_t em MVA calcula-se

$$Z_t = \frac{p}{S_t}$$

Exemplo: se S_t = 20 MVA e p = 15 %, vem Z_t = 0,75Ω.

2.3. Impedância de linhas

A conversão de impedâncias de um nível de tensão para outro é feita multiplicando a impedância verdadeira pelo quadrado da relação entre as duas tensões, usando a expressão

$$Z_{L,U1} = \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 Z_{L,U2}$$

Assim, se for U_1= 10 kV bastará multiplicar a impedância verdadeira da linha de tensão nominal U_c pela consequente relação 100 / U_c^2, isto é,

$$Z_{L,10\,kV} = \frac{100}{U_c^2} Z_L$$

que reduz a impedância à tensão U_c para a tensão de referência de 10 kV.

Exemplos:

Para U_c= 15 kV será 100 / 225 = 1 / 2,25.
Para U_c= 30 kV será 100 / 900 = 1 / 9.
Para U_c= 60 kV será 100 / 3600 = 1 / 36.

Deste modo, as impedâncias das linhas convertidas a 10 kV serão menores 2,25 vezes que a 15 kV, menores 9 vezes que a 30 kV e menores 36 vezes que a 60 kV.

Todas as impedâncias referidas foram trabalhadas pelo valor do seu módulo, mas podem evidentemente ser desdobradas em parte real e parte imaginária. Habitualmente, para a impedância da rede Z_r e dos transformadores Z_t só se considera a parte imaginária, porque a parte real tem uma contribuição desprezável para o módulo. Nas linhas já pode ter significado calcular as resistências e as reactâncias. Para os cálculos finais compõem-se as impedâncias conjugando as suas partes reais e imaginárias segundo as regras de associação de impedâncias e toma-se o valor do módulo da impedância resultante.

Para cálculos de quedas de tensão, perdas e correntes de curtocircuito, não se consideram, evidentemente, as impedâncias transversais: os seus valores são em geral elevados e as correntes que por elas se obtêm são por isso desprezáveis para o efeito desses cálculos.

Convirá não esquecer que se está a tratar do cálculo expedito em redes de distribuição.

3. Cálculo das potências de curtocircuito

Compõem-se as impedâncias, envolvidas no circuito em causa, pela sua associação em série e em paralelo (e, eventualmente, por conversão estrela / triângulo e vice-versa) e calcula-se a impedância final Z_t.

A potência de curtocircuito será

$$S_{ccf} = \frac{100}{|\dot{Z}_r + \dot{Z}_t|}$$

onde $|\dot{Z}_r + \dot{Z}_t|$ indica o módulo da soma vectorial $\dot{Z}_r + \dot{Z}_t$.

4. Cálculo das quedas de tensão

Supondo que se serve uma carga $S_k = 3U_nI_k$ (com S_k em MVA, U_n em kV e I_k em kA) tendo um determinado factor de potência $\cos\varphi$, alimentada através de uma impedância global $\dot{Z}_g = R_g + jX_g$, a queda de tensão δU (em kV) será dada por

$$\delta U = R_g I_k \cos\varphi + X_g I_k \sin\varphi$$

Em percentagem de U_n, teremos

$$\Delta U = 100 \frac{\delta U}{U_n}$$

donde

$$\Delta U = 100 \frac{R_g I_k \cos\varphi + X_g I_k \sin\varphi}{U_n}$$

Multiplicando o lado direito desta igualdade por $3U_n / 3U_n = 1$ vem

$$\Delta U = 300 \frac{U_n I_k (R_g \cos\varphi + X_g \sin\varphi)}{3U_n^2}$$

Portanto, se as impedâncias estiverem referidas a 10 kV e considerando que é $3U_n^2 = 100$, resulta

$$\Delta U = S_k (R_g \cos\varphi + X_g \sin\varphi)$$

Escrevendo $P_k = S_k \cos\varphi$ e $Q_k = S_k \sin\varphi$ conclui-se

$$\Delta U = R_g P_k + X_g Q_k$$

Esta expressão muito simples dá directamente a queda de tensão em percentagem a partir do valor da potência activa P_k em MW e da potência reactiva Q_k em Mvar, se os valores de R_g e X_g estiverem calculados na base 10 kV e 1 MVA.

Exemplo: Para uma resistência equivalente R_g de 0,3 Ω e uma reactância equivalente X_g de 0,6 Ω o trânsito de uma potência de 10 MVA com $\cos\varphi = 0{,}8$ (e $\sin\varphi = 0{,}6$), ou seja, com $P_k = 8$ MW e $Q_k = 6$ Mvar, será

$$\Delta U = 0{,}3 \times 8 + 0{,}6 \times 6 = = 2{,}4 + 3{,}6 = 6\ \%$$

5. Cálculo das perdas

O cálculo das perdas é dado por

$$\Delta P = R\, I_k^2$$

Tomando R como a resistência convertida a 10 kV (R_g no exemplo anterior), dado que $I_k = S_k / 3U_n$ (com I_k em kA para S_k em MVA) obtém-se

$$\Delta P = \frac{3\, R_g\, S_n^2}{(3U_k)^2}$$

Como, na base de 10 kV resulta $(3U_n)^2 = 3U_c^2 = 300$, vem

$$\Delta P = \frac{R_g S_k^2}{100}$$

com ΔP em MW para S_k em MVA.

Se, para simplificar, se calcular as perdas ΔP em kW é

$$\Delta P = 10\, R_g S_k^2$$

com ΔP em kW para S_k em MVA.

6. Método auxiliar para o cálculo expedito das correntes verdadeiras

Conhecidas as potências, sejam elas a potência de carga ou a potência de curtocircuito calculada pelo método exposto, as correntes são dadas pela expressão

$$I = \frac{S}{3U_n}$$

Para as redes de 1,5 kV, de 30 kV e de 60 kV (tensão composta nominal) o valor de $3U_n$ é muito próximo de 25, 50 e 100, respectivamente (na realidade comete-se um erro de cerca de 4%, mas trata-se de obter rapidamente valores aproximados da ordem de grandeza; aliás, as tensões verdadeiras também não são as nominais).

Então pode-se calcular o valor, aproximado por excesso, da corrente I em kA, para S em MVA pelas expressões expeditas:

redes de 15 kV: $I = \frac{S}{25} = \frac{4S}{100}$

redes de 30 kV: $I = \frac{S}{50} = \frac{2S}{100}$

redes de 60 kV: $I = \frac{S}{100}$

ou, pretendendo I em A, mas sempre S em MVA:

redes de 15 kV: $I = 40S$

redes de 30 kV: $I = 20S$

redes de 60 kV: $I = 10S$

Pode-se usar, com um erro da mesma ordem de grandeza, embora de sinal oposto (valores aproximados por defeito):

redes de 10 kV: $I = 60S$

7. Conclusões

Pensa-se ter demonstrado que, com poucas fórmulas simples de reter e de usar, até em cálculo mental, na maioria dos casos, podem ser calculados rapidamente valores, suficientemente aproximados para a maioria das aplicações, das potências de curtocircuito, das quedas de tensão, das perdas e das correntes.

Um dos principais interesses do método é que, como todas as impedâncias estão reduzidas à mesma base, se podem calcular apenas uma vez todas as impedâncias elementares de uma rede, de modo a constituir uma base de dados, onde se vão buscar aquelas que a cada momento estejam envolvidas nos circuitos cujos cálculos se queiram fazer, conforme as situações, em qualquer nível de tensão. Havendo elementos novos numa rede, calculam-se as suas impedâncias na mesma base e acrescentam-se à base de dados. ∎