

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190065

可控移相器对系统不对称短路电流的影响研究

曹路¹, 付俊波², 唐陇军¹, 常宝立², 黄志光¹, 庄侃沁¹, 陈浩¹, 丁浩寅¹

(1. 国家电网华东电力调控中心, 上海 200120; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 以可控移相器在电力系统中得到广泛应用为研究背景, 以研究可控移相器接入系统后对不对称短路电流的影响为目标, 提出了基于可控移相器的不对称短路电流实用计算方法。首先根据可控移相器的结构与原理建立其正序、负序以及零序模型。然后基于对称分量法建立含可控移相器系统的各序分量网络方程, 进而提出含可控移相器系统的各类型不对称短路电流实用计算方法, 并分析影响短路电流的因素。最后基于三机九节点系统, 运用上述实用计算方法进行不对称短路电流计算, 算例仿真结果表明该方法具备有效性。通过对比分析可知移相器的移相角和短路点位置是影响短路电流的因素, 而影响情况需通过具体计算得出。

关键词: 可控移相器; 不对称短路电流; 对称分量法; 等效模型

Study on the influence of TCPST on asymmetric short circuit current

CAO Lu¹, FU Junbo², TANG Longjun¹, CHANG Baoli², HUANG Zhiguang¹,
ZHUANG Kanqin¹, CHEN Hao¹, DING Haoyin¹

(1. State Grid East China Electric Power Control Center, Shanghai 200120, China;

2. Nanjing Nari-relays Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Taking the controllable phase shifter widely used in the power system as the research background, aiming at the influence of the controllable phase shifter on the asymmetric short-circuit current, a practical calculation method for asymmetric short-circuit current based on controllable phase shifter is proposed. First, the positive sequence, negative sequence and zero sequence models are established based on the structure and principle of the controllable phase shifter. Second, based on the symmetrical component method, the network equations of each sequence component with controllable phase shifter system are established, and then the controllable phase shift is proposed. The practical calculation method of various types of asymmetric short-circuit currents of the system is analyzed. Furthermore, the factors affecting the short-circuit current are analyzed. Finally, based on the 3-machine 9-node system, the above-mentioned practical calculation method is used to calculate the asymmetric short-circuit current. The simulation results show that the method is effective. Through comparative analysis, it can be seen that the phase shift angle and the short-circuit point position of the phase shifter are factors affecting the short-circuit current, and the influence situation needs to be calculated through specific calculation.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307123) and Science and Technology Project of State Grid Corporation East China Branch (No. SGHD0000DKJS1800150).

Key words: TCPST; asymmetric short circuit current; symmetrical component method; equivalent model

0 引言

由于潮流的自然分布、电网间电磁环网等客观因素, 电网长期存在潮流不均、线路利用效率不足、

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51307123); 国家电网公司华东分部科技项目资助(SGHD0000DKJS1800150)

关键断面输送能力受限等问题^[1-2]。晶闸管控制移相器(Thyristor controlled phase shift transformer, TCPST)的出现为解决这些问题提供了有效途径。TCPST 的原理是通过向线路注入补偿横向或者纵向的电压, 来改变电压幅值或相位, 从而实现线路电压或潮流控制^[3-6]。TCPST 优势显著, 可实现快速控制、无级调节^[7], 因此其潜力巨大, 拥有较

好的发展前景。

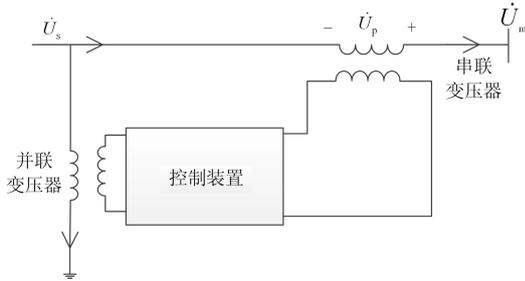
现阶段,国内外学者在TCPST改善系统潮流、提高系统稳定性等方面展开了大量的研究^[8-11]。比如文献[12]以华东电网为研究对象,根据潮流需求分析TCPST能够达到优化系统潮流分布的作用;文献[13]采用非线性变结构控制原理对移相器进行控制设计,以此提高系统的暂态稳定性。但是对于TCPST安装后的系统短路电流的问题研究不多^[14],尤其是关于短路电流的实用计算方法。短路电流的大小是评估系统安全性能的重要参数,短路电流计算是电气设备选择校验、继电保护整定的重要依据^[15-17],因此有必要展开相关研究。

基于上述分析,本文以TCPST接入后对不对称短路电流的影响为目标展开研究。首先根据TCPST的结构与原理建立其三序模型;然后给出各不对称短路情况下的短路电流实用计算方法,并分析影响短路电流的因素;最后在三机九节点系统中验证所述实用计算方法的有效性,并明确影响因素及影响情况。

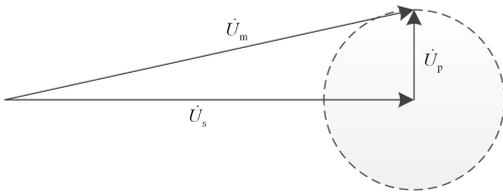
1 可控移相器移相原理及数学模型

1.1 移相原理

可控移相器主要由三大部分组成,如图1(a)所示,包括串联、并联变压器以及电力电子控制装置^[7,16]。



(a) 结构示意图



(b) 相位关系图

图1 可控移相器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of TCPST

图中, \dot{U}_s 为可控移相器的首端电压; \dot{U}_p 为注入电压; \dot{U}_m 为末端电压。三者之间的关系如图1(b)所示。

TCPST 的工作原理是首先利用并联变压器取得移相器所在支路首端电压,然后根据系统需求利用电力电子控制装置控制得到指定相角与幅值的电压,最后利用串联变压器将此电压注入到线路中,实现调节电压的作用。

1.2 可控移相器三序数学模型

1.2.1 正序模型

根据文献[6]可知,可控移相器可以等效为理想变压器与等值导纳串联的模型,如图2所示。

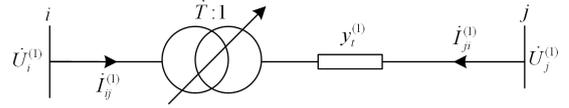


图2 可控移相器正序模型

Fig. 2 Positive sequence model of TCPST

图中,变量的上标“(1)”表示该量是正序,下同。 $\dot{T} = e^{-j\varphi}$ 为理想移相器的复变比; φ 为移相角; $\dot{U}_i^{(1)}$ 、 $\dot{U}_j^{(1)}$ 分别为节点 i 、 j 的正序电压; $\dot{I}_{ij}^{(1)}$ 、 $\dot{I}_{ji}^{(1)}$ 分别为节点 i 流向节点 j 和节点 j 流向节点 i 的正序电流; $y_t^{(1)}$ 即为输电线路的阻抗与移相器的阻抗串联的等效综合正序导纳,其值可由式(1)表示。

$$y_t^{(1)} = g_t^{(1)} + jb_t^{(1)} = \frac{1}{r_{ij}^{(1)} + jx_{ij}^{(1)} + jx_{eq}^{(1)}} = \frac{r_{ij}^{(1)} - j(x_{ij}^{(1)} + x_{eq}^{(1)})}{r_{ij}^{(1)2} + (x_{ij}^{(1)} + x_{eq}^{(1)})^2} \quad (1)$$

式中: $g_t^{(1)}$ 、 $b_t^{(1)}$ 为等效综合正序电导值和电纳值; $r_{ij}^{(1)}$ 、 $x_{ij}^{(1)}$ 为输电线路的正序电阻值和电抗值; $x_{eq}^{(1)}$ 为可控移相器的正序等效电抗,根据参考文献[4],其值通过推算可用式(2)表示。

$$x_{eq}^{(1)} = 2X_{B1} + 4\sin^2 \frac{\varphi}{2} X_{E1} + \left[\frac{97200X_0}{\pi^2 n_B^2} \varphi^2 + \frac{4X_{B3}}{n_B^2} \right] \cos^2 \frac{\varphi}{2} \quad (2)$$

式中: X_{B1} 、 X_{B3} 为串联变压器原边绕组的 B_1 段和副边绕组 B_3 的电抗值; X_{E1} 为并联变压器的原边绕组 E_1 电抗值; n_B 为 B_T 的绕组 B_3 与绕组 B_1 的匝数比; X_0 为并联变压器副边绕组的等效漏抗。

从式(2)可以看出,移相器的阻抗是随移相角的不同而变化的,所以 $y_t^{(1)}$ 亦是 φ 的函数。

根据图2,移相器支路 $i-j$ 两个端口处输入的正序电流与节点的正序电压之间的关系如式(3)所示。

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{ij}^{(1)} \\ \dot{I}_{ji}^{(1)} \end{bmatrix} = y_t^{(1)} \begin{bmatrix} 1 & -e^{j\varphi} \\ -e^{-j\varphi} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_i^{(1)} \\ \dot{U}_j^{(1)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

从式(3)可以看出, 移相器支路对系统计算短路电流时的导纳矩阵的贡献为: 节点 i 、 j 的自导纳加上 $y_i^{(1)}$, 节点 i 与节点 j 的互导纳减去 $e^{j\varphi} y_i^{(1)}$, 而节点 j 与节点 i 的互导纳减去 $e^{-j\varphi} y_i^{(1)}$, 将原正序导纳矩阵变为不对称矩阵。

1.2.2 负序模型

负序模型与正序模型的推导过程完全一样, 只需注意abc三相相序与正序相反。移相器的负序模型为理想复变比变压器和负序漏抗串联, 如图3所示。

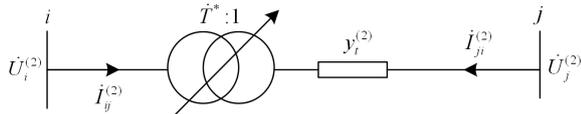


图3 可控移相器负序模型

Fig. 3 Negative sequence model of TCPST

图3负序模型中, 理想复变比变压器的复变比为 T^* 的共轭 T^* 。由于输电线、移相器的正负序等值电抗是相等的, 因而图中 $y_i^{(2)} = y_i^{(1)}$ 。变量的上标“(2)”表示该量是负序, 下同。同样可参照正序模型, 得到移相器支路 i - j 两个端口处输入的负序电流与节点的负序电压之间关系如式(4)所示。

$$\begin{bmatrix} i_{ij}^{(2)} \\ i_{ji}^{(2)} \end{bmatrix} = y_i^{(2)} \begin{bmatrix} 1 & -e^{-j\varphi} \\ -e^{j\varphi} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_i^{(2)} \\ U_j^{(2)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

从式(4)可以看出, 移相器支路对系统计算短路电流时的负序导纳矩阵的贡献为: 节点 i 、 j 的自导纳加上 $y_i^{(2)}$, 节点 i 与 j 的互导纳减去 $e^{-j\varphi} y_i^{(2)}$, 节点 j 与 i 的互导纳减去 $e^{j\varphi} y_i^{(2)}$, 将原负序导纳矩阵变为不对称矩阵。

1.2.3 零序模型

零序模型与正序模型的推导过程主要不同在于零序三相的相位是相同的, 因此零序电压与零序电流通过移相器时相位并不发生变化, 移相器的零序电路可以用一个零序阻抗表示, 如图4所示。

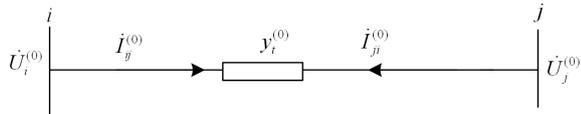


图4 可控移相器零序模型

Fig. 4 Zero sequence model of TCPST

图中, $y_i^{(0)} = \frac{1}{Z_{eq}^{(0)}}$ 为移相器零序等效导纳, 零

序阻抗的值与组态为0时的正序阻抗 $Z_{eq}^{(1)}|_{T=0}$ 相等, 为一恒定值。变量的上标“(0)”表示该量是零序, 下同。

根据图4, 得到移相器支路 i - j 两个端口处输入的零序电流与节点零序电压之间的关系如式(5)所示。

$$\begin{bmatrix} i_{ij}^{(0)} \\ i_{ji}^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_i^{(0)} & -y_i^{(0)} \\ -y_i^{(0)} & y_i^{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_i^{(0)} \\ U_j^{(0)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

因此, 移相器对零序导纳矩阵的贡献与普通阻抗一样, 即节点 i 、 j 的自导纳加上 $y_i^{(0)}$, 互导纳减去 $y_i^{(0)}$, 仍为对称阵。

2 计及可控移相器的不对称短路电流计算方法

2.1 对称分量法

对称分量法是求解不对称短路电流的有效方法, 其原理是将系统分解成正、负、零序三个网络, 在系统发生不对称故障时, 先分别求三个对称网络的电流、电压值, 再将三组值叠加得到最终结果^[18-19]。正常情况 a 相的正、负、零序分量作为基准相, 则 a、b、c 三相相量关系如式(6)所示。

$$\begin{cases} \dot{F}_a = \dot{F}_a^{(1)} + \dot{F}_a^{(2)} + \dot{F}_a^{(0)} \\ \dot{F}_b = \alpha^2 \dot{F}_a^{(1)} + \alpha \dot{F}_a^{(2)} + \dot{F}_a^{(0)} \\ \dot{F}_c = \alpha \dot{F}_a^{(1)} + \alpha^2 \dot{F}_a^{(2)} + \dot{F}_a^{(0)} \end{cases} \quad (6)$$

式中: \dot{F} 表示三相不对称电压或电流相量; $\alpha = e^{j120^\circ}$; 下标 a、b、c 分别表示 a、b、c 三相。

2.2 含可控移相器的系统各序分量网络方程

利用对称分量法求解不对称短路电流的重要步骤在于建立系统的三序网络, 对于含有移相器的电力系统, 当建立了移相器的三序模型之后, 便可以 and 一般电力系统一样, 分别建立系统的三序节点电压方程。需要注意的是由于移相器的介入, 正、负序网络的节点导纳矩阵是非对称的。

以节点 n 发生金属性短路为例进行分析。正序网络方程如式(7)所示。

$$\begin{bmatrix} i_1^{(1)} \\ \vdots \\ i_i^{(1)} \\ \vdots \\ i_j^{(1)} \\ \vdots \\ i_n^{(1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ -i_f^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11}^{(1)} & \cdots & y_{1i}^{(1)} & \cdots & y_{1j}^{(1)} & \cdots & y_{1n}^{(1)} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ y_{i1}^{(1)} & \cdots & y_{ii}^{(1)} & \cdots & y_{ij}^{(1)} & \cdots & y_{in}^{(1)} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ y_{j1}^{(1)} & \cdots & y_{ji}^{(1)} & \cdots & y_{jj}^{(1)} & \cdots & y_{jn}^{(1)} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ y_{n1}^{(1)} & \cdots & y_{ni}^{(1)} & \cdots & y_{nj}^{(1)} & \cdots & y_{nn}^{(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1^{(1)} \\ \vdots \\ U_i^{(1)} \\ \vdots \\ U_j^{(1)} \\ \vdots \\ U_n^{(1)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $U_i^{(1)} (i=1,2,\dots,n)$ 是系统故障时节点电压 i 的正序分量; $i_i^{(1)} (i=1,2,\dots,n)$ 为系统的注入电流值, 负荷节点和联络节点的注入电流为零, 而发电机节

点的注入电流为 $-j/x_d''$ ； $\dot{I}_f^{(1)}$ 为故障点短路电流的正序分量； $y_{ij}^{(1)} (i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,n)$ 为节点 i 与 j 间的正序导纳，当 $i=j$ 时为节点 i 的正序自导纳，与移相器相关的节点正序互导纳不再对称且与移相角有关。

由于上边的方程是线性方程，可以采用叠加定理分别求解右端的两个列向量对节点电压的影响。则系统故障时节点电压的正序分量如式(8)所示。

$$\dot{U}_i^{(1)} = \dot{U}_{i-}^{(1)} - z_{in}^{(1)} \dot{I}_f^{(1)} \quad i=1,2,\dots,n \quad (8)$$

式中： $\dot{U}_{i-}^{(1)} (i=1,2,\dots,n)$ 是系统正常运行时的节点 i 的电压； $z_{in}^{(1)}$ 是节点 i 与短路节点 n 间的正序阻抗， $i=n$ 时为节点 n 的正序自导纳，可由节点正序导纳矩阵推导得出。

负序网络方程如式(9)所示。与移相器相关的节点正序互导纳不再对称且与移相角有关。

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ -\dot{I}_f^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11}^{(2)} & \cdots & y_{1i}^{(2)} & \cdots & y_{1j}^{(2)} & \cdots & y_{1n}^{(2)} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ y_{i1}^{(2)} & \cdots & y_{ii}^{(2)} & \cdots & y_{ij}^{(2)} & \cdots & y_{in}^{(2)} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ y_{j1}^{(2)} & \cdots & y_{ji}^{(2)} & \cdots & y_{jj}^{(2)} & \cdots & y_{jn}^{(2)} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ y_{n1}^{(2)} & \cdots & y_{ni}^{(2)} & \cdots & y_{nj}^{(2)} & \cdots & y_{nn}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1^{(2)} \\ \vdots \\ \dot{U}_i^{(2)} \\ \vdots \\ \dot{U}_j^{(2)} \\ \vdots \\ \dot{U}_n^{(2)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

根据式(9)系统故障时节点电压的负序分量如式(10)所示。

$$\dot{U}_i^{(2)} = -z_{in}^{(2)} \dot{I}_f^{(2)} \quad i=1,2,\dots,n \quad (10)$$

式中， $z_{in}^{(2)}$ 为负序阻抗。

零序网络方程如式(11)所示。

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ -\dot{I}_f^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11}^{(0)} & \cdots & y_{1i}^{(0)} & \cdots & y_{1j}^{(0)} & \cdots & y_{1n}^{(0)} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ y_{i1}^{(0)} & \cdots & y_{ii}^{(0)} & \cdots & y_{ij}^{(0)} & \cdots & y_{in}^{(0)} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ y_{j1}^{(0)} & \cdots & y_{ji}^{(0)} & \cdots & y_{jj}^{(0)} & \cdots & y_{jn}^{(0)} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ y_{n1}^{(0)} & \cdots & y_{ni}^{(0)} & \cdots & y_{nj}^{(0)} & \cdots & y_{nn}^{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1^{(0)} \\ \vdots \\ \dot{U}_i^{(0)} \\ \vdots \\ \dot{U}_j^{(0)} \\ \vdots \\ \dot{U}_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中，注意零序导纳矩阵是对称矩阵且与移相角无关。

根据式(11)系统故障时节点电压的负序分量如式(12)所示。

$$\dot{U}_i^{(0)} = -z_{in}^{(0)} \dot{I}_f^{(0)} \quad i=1,2,\dots,n \quad (12)$$

式中， $z_{in}^{(0)}$ 为零序阻抗。

由式(8)、式(10)和式(12)可得到短路点的电压方程如式(13)。

$$\begin{cases} \dot{U}_n^{(1)} = \dot{U}_{n-}^{(1)} - z_{nn}^{(1)} \dot{I}_f^{(1)} \\ \dot{U}_n^{(2)} = -z_{nn}^{(2)} \dot{I}_f^{(2)} \\ \dot{U}_n^{(0)} = -z_{nn}^{(0)} \dot{I}_f^{(0)} \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中，有 6 个未知量，包括节点电压三序分量和故障点短路电流的三序分量。需要根据短路类型的边界条件补充的三个方程才可求解。

2.3 不对称故障的实用计算

2.3.1 单相(a相)接地故障

以 a 相直接接地故障^[20]为例，将 a 相作为特殊相，边界条件用序分量表示如式(14)。

$$\begin{cases} \dot{I}_{af}^{(2)} = \dot{I}_{af}^{(0)} = \dot{I}_{af}^{(1)} = \frac{\dot{I}_{af}}{3} \\ \dot{U}_{af}^{(1)} + \dot{U}_{af}^{(2)} + \dot{U}_{af}^{(0)} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中： $\dot{I}_{af}^{(1)}$ 、 $\dot{I}_{af}^{(2)}$ 、 $\dot{I}_{af}^{(0)}$ 分别为短路点 a 相正序、负序、零序电流； \dot{I}_{af} 为 a 相电流； $\dot{U}_{af}^{(1)}$ 、 $\dot{U}_{af}^{(2)}$ 、 $\dot{U}_{af}^{(0)}$ 分别为短路点 a 相正序、负序、零序电压。

根据式(13)和式(14)联立求解，并根据式(6)得故障相短路电流 \dot{I}_f 为

$$\dot{I}_f = \dot{I}_{af} = \frac{3\dot{U}_{n-}^{(1)}}{z_{nn}^{(1)} + z_{nn}^{(2)} + z_{nn}^{(0)}} \quad (15)$$

2.3.2 两相(b、c)接地短路

以 b、c 相发生直接接地短路为例，将 a 相作为特殊相，边界条件用序分量表示如式(16)。

$$\begin{cases} \dot{I}_{af}^{(1)} + \dot{I}_{af}^{(2)} + \dot{I}_{af}^{(0)} = 0 \\ \dot{U}_{af}^{(0)} = \dot{U}_{af}^{(2)} = \dot{U}_{af}^{(1)} = \frac{\dot{U}_{af}}{3} \end{cases} \quad (16)$$

式中， \dot{U}_{af} 为 a 相电压。

根据式(13)和式(16)联立求解，并根据式(6)得故障相短路电流为

$$\dot{I}_f = |\dot{I}_{bf}| = |\dot{I}_{cf}| = \sqrt{1 - \frac{z_{nn}^{(2)} z_{nn}^{(0)}}{z_{nn}^{(2)} + z_{nn}^{(0)}}} \cdot \frac{\sqrt{3}\dot{U}_{n-}^{(1)}}{z_{nn}^{(1)} + \frac{z_{nn}^{(2)} z_{nn}^{(0)}}{z_{nn}^{(2)} + z_{nn}^{(0)}}} \quad (17)$$

式中， \dot{I}_{bf} 、 \dot{I}_{cf} 为 b、c 相电流。

2.3.3 两相短路

以 b、c 相发生直接短路为例，将 a 相作为特殊相，边界条件用序分量表示如式(18)。

$$\begin{cases} \dot{I}_{af}^{(1)} + \dot{I}_{af}^{(2)} = 0, \dot{I}_{af}^{(0)} = 0 \\ \dot{U}_{af}^{(1)} = \dot{U}_{af}^{(2)} \end{cases} \quad (18)$$

根据式(13)和式(18)联立求解，并根据式(6)得故障相短路电流为

$$i_f = |i_{bf}| = |i_{cf}| = \frac{\sqrt{3}U_n^{(1)}}{z_{nn}^{(1)} + z_{nn}^{(2)}} \quad (19)$$

根据式(15)、式(17)、式(19)可以求出单相短路、两相接地短路、两相短路故障点的短路电流。从式中可以看出, 单相接地短路和两相接地短路受到三序网络的阻抗值影响, 而两相短路仅受到正序和负序影响。 $z_{nn}^{(1)}$ 、 $z_{nn}^{(2)}$ 、 $z_{nn}^{(0)}$ 的值在加装移相器前后发生了改变。因移相器的存在使短路点短路电流是增大还是减小只能通过具体的数值计算才能得出。

3 不对称短路电流实用计算及移相器影响的算例分析

以 IEEE 3 机 9 节点系统为例, 按照本文所提不对称短路电流实用计算方法计算, 并分析可控移相器接入后对系统的短路电流影响。3 机 9 节点系统如图 5 所示, 参数参考文献[21]。计算时负荷用恒定阻抗表示。

在线路 5-7 上加装一台移相器。从图 5 可知, 节点 1 为一个发电机节点; 节点 7 是移相器所在线路的两端节点; 节点 4、9 分别作为距移相器电气距离较近和较远的节点代表。对以上 4 个节点计算不同移相角时发生不对称短路故障的短路电流, 观察移相角和短路电流之间的关系。

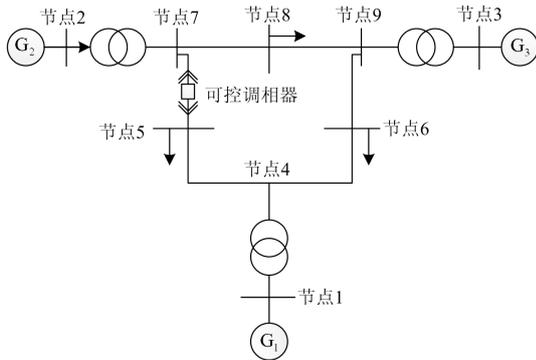


图 5 3 机 9 节点系统

Fig. 5 Wiring diagram of 3-machine 9-node system

计算结果如图 6—图 8 所示, 图中纵坐标为短路电流, 横坐标为移相角。图 6 为短路点 a 相电流, 图 7 和图 8 均为短路点 b 相电流。图 6 是 a 相接地短路故障, 图 7 是 bc 相短路, 图 8 为 bc 相接地短路。分图(a)(b)(c)(d)分别代表节点 1、4、7、9 发生对应不对称短路。为了便于比较, 在图中用直线给出了无移相器时的短路电流。

由图 6—图 8 可以看出, 移相角对于短路电流

的影响情况较为复杂。总体而言, 在任意节点发生任意短路故障, 移相角与故障点短路电流关系都近似一条不对称的“抛物线”, 短路电流最大时对应的移相角往往在 0° 附近。

随着移相角度绝对值的增大, 正负移相角造成的短路电流差异也就越大。但是, 对移相角正负哪个方向更有利于降低短路电流水平这一问题没有确

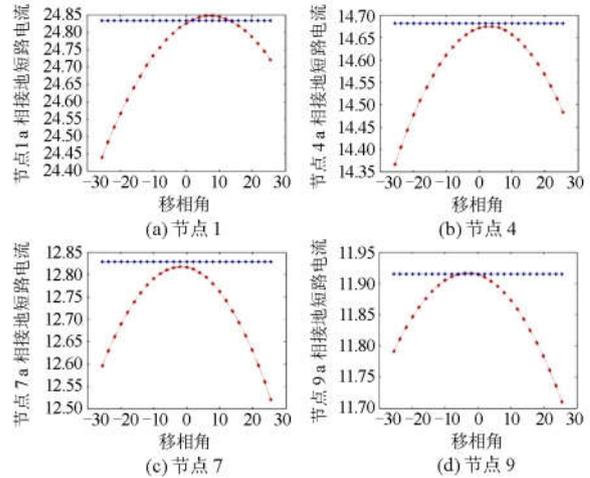


图 6 单相接地短路 a 相电流

Fig. 6 Phase a current during a single-phase earth fault

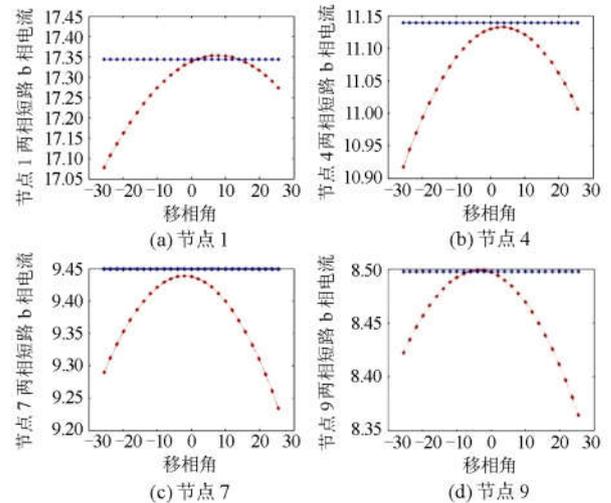
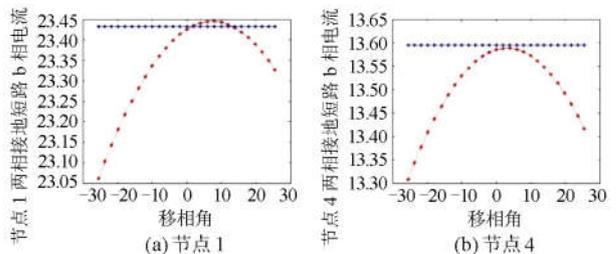


图 7 两相短路 b 相电流

Fig. 7 Phase b current during a two-phase short fault



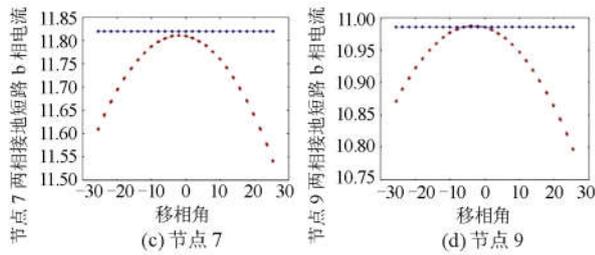


图 8 两相接地短路 b 相电流

Fig. 8 Phase b current during a two-phase earth fault

定结论。在本算例中, 无论何种短路类型, 在移相角绝对值相同情况下, 当 1、4 节点(即发电机节点和电气距离较近的节点)故障时, 移相角为正向时短路电流更大; 而在 7、9 节点(即移相器所在节点和电气距离较远的节点)故障时, 移相角为负向时短路电流更大。而且从图 6(a)、图 7(a)和图 8(a)可以看出, 安装移相器后短路电流比未安装时有所增加。因此可知, 移相角对不同短路点的短路电流的影响是不同的, 必须经过具体问题具体计算。移相器对短路电流的影响与移相角和短路点位置等因素有关。

4 结论

基于 TCPST 的结构与原理和所建立的三序模型, 本文提出了不对称短路电流的实用计算方法, 并分析 TCPST 接入后对短路电流的影响, 得到如下结论:

(1) 由于可控移相器的接入, 使得系统计算短路电流时的正序、负序导纳矩阵变为不对称矩阵, 对零序矩阵的影响与普通阻抗一致。

(2) 单相接地短路和两相接地短路受到三序网络的阻抗值影响, 而两相短路仅受到正序和负序影响。含可控移相器的系统三序网络的节点阻抗值在加装移相器前后发生了改变。

(3) 移相器对短路电流的影响与移相角和短路点位置等因素有关, 移相角对不同短路点的短路电流的影响是不同的, 对具体问题须开展具体分析 with 计算。

本文研究为可控移相器接入后系统短路电流变化评估提供了有效计算依据, 具有重要意义。

参考文献

[1] 许海, 杨尚瑾, 金雪芬, 等. 基于潮流及短路计算的电力系统 Ward 等值实现方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 104-110.
XU Hai, YANG Shangjin, JIN Xuefen, et al. Ward equivalent implementation method of power system based on power flow and short circuit calculation[J].

Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 104-110.

- [2] 李鹏飞, 顾雪平, 杨超, 等. 考虑潮流转移对系统影响的低频减载方案优化[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 156-163.
LI Pengfei, GU Xueping, YANG Chao, et al. Optimization of low frequency load shedding scheme considering the influence of power flow on system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 156-163.
- [3] 崔勇, 余颖辉, 杨增辉, 等. 超高压电网可控移相器示范工程方案效果评估[J]. 华东电力, 2013, 41(11): 2237-2240.
CUI Yong, YU Yinghui, YANG Zenghui, et al. Effect evaluation of demonstration project of controllable phase shifter for ultra-high voltage power grid[J]. East China Electric Power, 2013, 41(11): 2237-2240.
- [4] 杨永前, 崔勇, 杨增辉, 等. 双芯对称离散型可控移相器的数学建模[J]. 陕西电力, 2014, 42(11): 61-67.
YANG Yongqian, CUI Yong, YANG Zenghui, et al. Mathematical modeling of two-core symmetric discrete controllable phase shifter[J]. Shaanxi Electric Power, 2014, 42(11): 61-67.
- [5] 康逸群, 宋梦琼, 罗辉, 等. 计及可控移相器的电力系统潮流优化[J]. 湖北电力, 2016(10): 11-16.
KANG Yiqun, SONG Mengqiong, LUO Hui, et al. Power system power flow optimization considering controllable phase shifters[J]. Hubei Electric Power, 2016(10): 11-16.
- [6] 周飞, 于弘洋, 方万良, 等. 分级投切可控移相器稳态相量建模与分析[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3184-3189.
ZHOU Fei, YU Hongyang, FANG Wanliang, et al. Modeling and analysis of steady state phasor of staged switching controllable phase shifter[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3184-3189.
- [7] 侯承昊, 戴朝波, 孙莹, 等. 可控移相器研究现状及其发展前景[J]. 智能电网, 2014, 2(1): 18-21.
HOU Chenghao, DAI Chaobo, SUN Ying, et al. Research status and development prospects of controllable phase shifters[J]. Smart Grid, 2014, 2(1): 18-21.
- [8] VERBOOMEN J, VAN-HERTEM D, SCHAVEMAKER, et al. Phase shifting transformer: principles and application[C] // International Conference on Future Power Systems, Amsterdam, Netherlands, 2005: 1-6.
- [9] 于弘洋, 周飞, 杨增辉. 可控移相器主电路参数设计

- 及稳态特性分析[J]. 中国电力, 2013, 46(11): 36-41.
YU Hongyang, ZHOU Fei, YANG Zenghui. Parameter design and steady-state characteristic analysis of main circuit of controllable phase shifter[J]. Electric Power, 2013, 46(11): 36-41.
- [10] 崔勇, 陈洁羽, 刘俊. 提高输电断面传输能力的可控移相器最优选址算法研究[J]. 陕西电力, 2013, 41(11): 75-79.
CUI Yong, CHEN Jieyu, LIU Jun. Research on the most preferred algorithm for controllable phase shifter to improve the transmission capacity of transmission section[J]. Shaanxi Electric Power, 2013, 41(11): 75-79.
- [11] 侯承昊. 新型混合式可控移相器及其控制研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
HOU Chenghao. New hybrid controllable phase shifter and its control research[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [12] 于弘洋, 周飞, 杨增辉. 可控移相器主电路参数设计及稳态特性分析[J]. 中国电力, 2013, 46(11): 36-41.
YU Hongyang, ZHOU Fei, YANG Zenghui. Parameter design and steady-state characteristic analysis of main circuit of controllable phase shifter[J]. Electric Power, 2013, 46(11): 36-41.
- [13] JIANG F, CHOI S S, SHRESTHA G. Power system stability enhancement using static phase shifter[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(1): 207-214.
- [14] 赵学强, 郭明星. 华东电网安装移相变压器的研究[J]. 华东电力, 2006, 34(11): 30-33.
ZHAO Xueqiang, GUO Mingxing. Research on installation of phase shifting transformer in East China Power Grid[J]. East China Electric Power, 2006, 34(11): 30-33.
- [15] 李勇, 于芮枝, 王英英, 等. 负荷对短路电流的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 40-45.
LI Yong, YU Ruiji, WANG Yingying, et al. Study on the effect of load on short-circuit current[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 40-45.
- [16] KUMKRATUG P. Improvement of transient stability of power system by thyristor controlled phase shifter transformer[J]. American Journal of Applied Sciences, 2010, 7(11): 1495-1499.
- [17] 周明, 曹炜, 陈文涛, 等. 串联电抗器对电力系统短路电流特性影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 147-153.
ZHOU Ming, CAO Wei, CHEN Wentao, et al. Study on the influence of series reactors on short-circuit current characteristics of power system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 147-153.
- [18] 盛万兴, 马静, 张瑜, 等. 基于故障等值网络的双馈风电机组三相短路电流计算方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 7-14.
SHENG Wanxing, MA Jing, ZHANG Yu, et al. Study on calculation method of three-phase short-circuit current of doubly-fed wind turbine based on fault equivalent network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 7-14.
- [19] 安德逊 P M, 佛阿德 A A. 电力系统的控制与稳定[M]. 王奔, 译. 北京: 水利电力出版社, 1979.
ANDERSON P M, FOAD A A. Control and stability of power systems[M]. WANG Ben, trans. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1979.
- [20] 杨超颖, 王金浩, 杨赟磊, 等. 不对称故障条件下并网光伏逆变器峰值电流抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 103-111.
YANG Chaoying, WANG Jinhao, YANG Yunlei, et al. Peak current suppression strategy for grid-connected PV inverters under asymmetric fault conditions[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 103-111.
- [21] ZHANG X, SOUDI F, SHIRMOHAMMADI D, et al. A distribution short circuit analysis approach using hybrid compensation method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(4): 2053-2059.

收稿日期: 2019-01-15; 修回日期: 2019-03-18

作者简介:

曹路(1971—), 男, 工学博士, 高级工程师, 主要从事电力系统调度运行和分析管理; E-mail: cao_l@ec.sgcc.com.cn

付俊波(1986—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统安全稳定控制系统的研究和电力电子设备对系统影响方面的工作。E-mail: fujb@nrec.com

(编辑 魏小丽)