

基于线模相电流的串补线路故障选相方法

杨黎明¹, 谢诗敏¹, 王仲¹, 陈福锋¹, 薛明军^{1,2}, 陈中²

(1. 国电南京自动化股份有限公司, 南京 211100;
2. 东南大学 电气工程学院, 南京 210096)

摘要: 串补电容的接入将改变线路的序网络阻抗及故障后的序电流分布, 虽然对串补电容安装侧选相元件无不利影响, 但可能会导致对侧选相元件误选相。为此, 提出一种基于线模相电流的故障选相方法。首先, 将线模相电流定义为各相故障分量电流与零序电流之差; 然后, 分析不同故障类型下线模相电流的特征, 提取故障相与非故障相的特征差异, 从而构造选相判据; 最后, 基于PSCAD平台进行仿真验证, 结果表明, 所提方法能够准确识别串补线路的故障相别, 且其性能不受故障位置、线路长度、串补补偿度等因素的影响。

关键词: 输电线路; 故障选相; 串补电容; 故障分量; 序分量

DOI: 10.19585/j.zjdl.202603007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Installation locations of surge arresters on double-circuit transmission lines

YANG Liming¹, XIE Shimin¹, WANG Zhong¹, CHEN Fufeng¹, XUE Mingjun^{1,2}, CHEN Zhong²

(1. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 211100, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The connected series-compensated capacitors alter the sequence network impedance of transmission lines and the distribution of sequence currents during faults. While this does not adversely affect the phase-selection elements on the capacitor installation side, it may lead to misidentification by those on the opposite side. To address this, a fault phase selection method based on line-mode phase current is proposed. First, the line-mode phase current is defined as the difference between the fault-component current of each phase and the zero-sequence current. Next, the characteristics of line-mode phase currents under different fault types are analyzed to extract distinctions between faulted and non-faulted phases, from which the phase-selection criterion is constructed. Finally, the method is validated through simulations on the PSCAD platform. The results show that the proposed method can accurately identify the faulted phase in series-compensated transmission lines, and its performance is robust with respect to fault location, line length, and the degree of series compensation.

Keywords: transmission lines; fault phase selection; series-compensated capacitor; fault components; sequence components

0 引言

串补装置能够增加远距离高压输电线路的输送能力, 降低线路损耗, 优化系统潮流, 提高电力系统经济性和可靠性, 在我国高压输电线路中得到了广泛应用^[1]。串补电容破坏了线路参数的均一性, 在故障期间将引入大量低频谐波和衰减

的非周期分量, 并且可能造成电压电流反向, 对传统继电保护产生不利影响^[2-4]。

单端量的保护元件可用信息有限, 难以应对串补引入导致的线路阻抗改变, 相关学者做了大量研究^[5-7]。文献[5]通过识别故障点与串补电容的位置关系, 配合传统距离保护, 提出适用于串补线路的距离保护方案。文献[6]利用系统故障时的暂态信息识别串补线路的电感参数来反映故障点到保护安装处距离, 克服了串补电容带来的超越问题。上述两种方法都考虑了串补的阻抗模型,

文献[7]对此进行了精细化的研究, 给出了串补线性化模型。文献[8-11]分析了串补线路对相关差动保护、纵联保护和方向元件的影响。

故障选相是线路保护的基础性功能, 故障选相元件的快速正确动作对距离保护、重合闸和故障测距的动作性能都有重要影响。传统输电线路故障选相方案是基于线路的线性阻抗特性设计^[12-14]。随着智能电网的发展, 现代电力系统中出现了很多新元件和新情况, 需要重新考虑选相元件的适用性。文献[15]分析了交直流混联系统对选相元件的影响, 指出了此情况下突变量选相的局限性。文献[16]推导了光伏电站送出线故障的电流表达式, 分析了其相位关系, 指出了选相元件可能不正确动作的原因。文献[17]考察了风电场低电压穿越策略下传统故障序分量选相元件的适应性。文献[18]基于逆变型电源并网故障时的故障特征, 指出电流分配系数不同是故障选相错误的原因。在此基础上, 学者给出了适用于风电接入的故障选相新原理^[19-21]。文献[19]依据各相电压暂态特性之间的关系, 提出了不受风电弱馈特性和背侧阻抗不稳定性影响的时域电压选相原理。文献[20]讨论了大规模新能源送出线路场景下, 基于电流故障分量补偿和基于相电压、相间电压突变量幅值比较的选相方法。文献[21]采用修正故障电压序分量相位偏差角的方式构造故障电压序分量选相元件。

近年来不断有新的数学方法和保护理论应用于选相元件^[22-23]。然而, 串补接入对选相元件影响的相关研究较少。通常情况下, 加装串补电容侧的保护元件受到串补的影响更为显著。串补对选相元件的影响比较特殊, 对串补本侧的选相元件无不利影响, 但会导致线路对侧的选相元件发生误选相。这与传统选相利用分流系数的构成特性相关。本文首先分析了传统电流序分量选相的适用边界, 研究了串补影响序分量选相的机理。在此基础上, 定义了免疫串补影响的线模相电流, 提出了适用于串补线路的故障选相方法。最后, 通过仿真分析验证了该方法的有效性。

1 传统序分量选相原理的适用边界

1.1 序分量选相原理

线路某处发生故障时, 利用边界条件可求得

故障点的电流序分量。以A相接地故障为例进行分析:

$$I_{F0} = I_{F2} = \frac{I_{FA}}{3} \quad (1)$$

式中: I_{F0} 和 I_{F2} 分别为流入故障点的零序、负序电流; I_{FA} 为流入故障点的A相电流。

由式(1)可知, 故障点零序和负序电流相等。A相接地故障时, 故障序网图如图1所示。

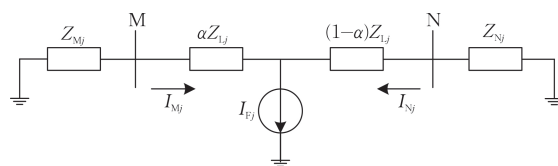


图1 故障分量序网图

Fig.1 Sequence networks of fault components

图1中, 当下标 j 为0和2时, 分别对应零序量、负序量; I_{Fj} 为故障点电流, I_{Mj} 为保护安装处电流, I_{Nj} 为对侧电流, Z_{Mj} 和 Z_{Nj} 分别为M侧、N侧的背侧系统阻抗, Z_{Lj} 为线路总阻抗, α 为故障点与M侧的距离占线路全长的百分比。

根据图1中的分流关系, 可以求得M侧保护安装处的序分量电流表达式如下:

$$I_{Mj} = \frac{(1-\alpha)Z_{Lj} + Z_{Nj}}{Z_{Mj} + Z_{Lj} + Z_{Nj}} \times \frac{I_{FA}}{3} = k_j \frac{I_{FA}}{3} \quad (2)$$

式中: k_j 为复数, 当下标 j 为0和2时, 分别对应电流的零序分布系数、负序分布系数。

k_j 与系统阻抗和线路阻抗相关。对于高压输电线路, 无论是零序还是负序, 线路阻抗角与系统阻抗角较为接近(约 80°), k_j 的相角近似为 0° 。因此, AG(A相接地故障)时, 保护安装处零序和负序电流的相位差如下:

$$p_{AG} = \arg \frac{I_{M0}}{I_{M2}} = \arg \frac{k_0}{k_2} \approx 0^\circ \quad (3)$$

采用同样的方法可知, BG(B相接地故障)时, 零序与负序电流的相位差为 120° ; CG(C相接地故障)时, 零序与负序电流的相位差为 -120° 。不同故障类型下, 零序与负序电流的相位差存在显著差异, 因此可构造如图2所示的序分量选相分区。

由图2可知, 序分量选相的裕度较大。即使线路阻抗角或系统阻抗角发生一定变化, 只要电流分布系数 k_j 的相角偏差在 $\pm 60^\circ$ 以内, 就可实现正确选相。该方法同样也可用于分析两相接地故障,

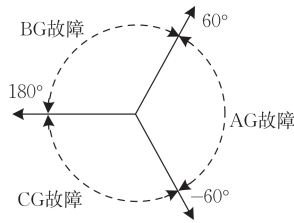


图2 序分量选相分区

Fig.2 Phase selection regions based on sequence components

实现故障选相。

1.2 串补对序分量选相的影响

电流序分量选相与整个系统的阻抗分布相关，而串补的引入改变了线路的阻抗分布。当串补线路发生A相接地故障(见图3)，由于故障边界条件未发生变化，故障点处序分量电流与式(1)相同。

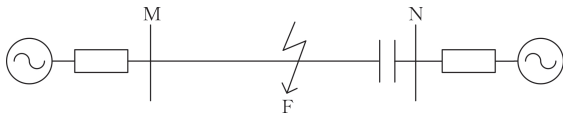


图3 串补线路故障

Fig.3 Faults on series-compensated transmission lines

串补线路故障时，故障分量序网图见图4。

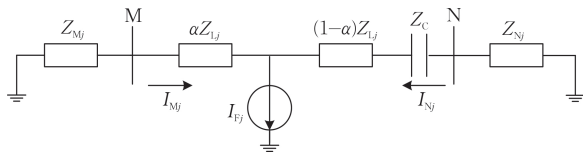


图4 串补线路故障分量序网图

Fig.4 Sequence network diagram of fault components for series-compensated transmission lines

图4中变量意义与图1相同。三相串补电容由3个分立无耦合的电容器构成，其正序、负序和零序阻抗相等，记为 Z_C 。

$$Z_C = -\beta Z_{L1} \quad (4)$$

式中： β 为补偿度(串补容抗与线路的正序阻抗之比)，一般采取欠补偿的方式，取0~1。

分析图4中的电流分流关系，可得M侧保护安装处零序电流和负序电流表达式为：

$$\begin{cases} I_{M0} = \frac{(1-\alpha)Z_{L0} + Z_{N0} - j\beta Z_{L1}}{Z_{L0} + Z_{M0} + Z_{N0} - j\beta Z_{L1}} \frac{I_{FA}}{3} = k_{M0} \frac{I_{FA}}{3} \\ I_{M2} = \frac{(1-\alpha)Z_{L2} + Z_{N2} - j\beta Z_{L1}}{Z_{L2} + Z_{M2} + Z_{N2} - j\beta Z_{L1}} \frac{I_{FA}}{3} = k_{M2} \frac{I_{FA}}{3} \end{cases} \quad (5)$$

此时，M侧电流的分布系数 k_{M0} 和 k_{M2} 的分母仍将保持电抗特性。为便于叙述，将N侧系统阻抗与N侧母线至故障点的线路阻抗之和记为N侧总阻抗。当故障点靠近M侧(即 α 较小时)，N侧总阻抗大于串补阻抗，分布系数 k_{M0} 和 k_{M2} 的分子仍呈电抗特性。当 α 较大时，N侧总阻抗小于串补阻抗，分布系数 k_{M0} 和 k_{M2} 的分子呈负电抗特性。这意味着分布系数 k_{M0} 和 k_{M2} 分子虚部的正负号随故障位置 α 而改变。

由于线路零序阻抗通常大于正序阻抗，因此在一段故障区间内，会出现零序电流分布系数 k_{M0} 的分子为正电抗，负序电流分布系数 k_{M2} 的分子为负电抗的情况，即：

$$(1-\alpha)Z_{L2} + Z_{N2} < Z_C < (1-\alpha)Z_{L0} + Z_{N0} \quad (6)$$

此时，M侧零序电流会与负序电流相位相反，二者相位差为 180° 。根据图2所示的序分量选相分区，电流序分量选相元件将无法正确识别A相故障。通过对B相和C相接地故障进行分析可知，M侧的序分量选相元件无法正确选出故障相。

实际运行中，故障点位置 α 及对侧系统阻抗(Z_{N2} 和 Z_{N0})均未知，难以通过补偿来修正串补对零序和负序电流相位差的影响。

同理，对N侧的序分量选相元件进行分析。然而，由于N侧保护安装处零序电流和负序电流表达式中，其分子项不受串补电容的影响，该侧选相元件仍能正确选相。上述分析基于串补装置仅安装在线路一侧的典型场景，对于两侧均装设串补或串补位于线路中央的场景，亦可采用类似方法进行分析。综上所述，串补线路中，序分量选相元件在安装串补的一侧(图3中N侧)可正确选相，而在串补的对侧(图3中M侧)不能正确选相。

2 串补线路的故障选相

线路的正序和负序阻抗相等，但零序阻抗与之不相等($Z_{L1} = Z_{L2} \neq Z_{L0}$)；串补线路的正序、负序和零序阻抗均相等，均为 Z_C 。这导致串补线路的零序电流分布系数 k_0 与负序电流分布系数 k_2 特性存在差异，进而使得传统序分量选相元件在串补线路中失效。然而，串补线路的正序与负序电流分布系数仍保持相等，即 $k_1 = k_2$ 。

因此，若排除零序的影响，只保留线模量(正

序和负序), 则可规避串补导致的错误选相问题。线模 A 相电流 I_{A-} 、线模 B 相电流 I_{B-} 和线模 C 相电流 I_{C-} 定义如下:

$$\begin{cases} I_{A-} = \Delta I_A - I_0 \\ I_{B-} = \Delta I_B - I_0 \\ I_{C-} = \Delta I_C - I_0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: I_0 为零序电流, 可由外接零序直接获得, 也可由三相故障电流计算得到; ΔI_A 、 ΔI_B 、 ΔI_C 分别为 A 相、B 相、C 相故障分量电流。

通过分析线模相电流在不同故障类型下的特性, 旨在提出一种适用于串补线路的故障选相新方法。

2.1 单相接地故障

以 A 相接地故障为例, 参考图 4(串补线路故障分量序网图), 计算保护安装处 A 相故障分量电流和零序电流:

$$\begin{cases} \Delta I_A = k_0 I_{F0} + k_1 \Delta I_{F1} + k_2 I_{F2} = k_0 \frac{I_{FA}}{3} + k_1 \frac{I_{FA}}{3} + k_1 \frac{I_{FA}}{3} \\ I_0 = k_0 I_{F0} = k_0 \frac{I_{FA}}{3} \end{cases} \quad (8)$$

式中: k_0 和 k_1 分别为零序、正序电流分布系数。

将式(8)代入式(7)可得线模 A 相电流:

$$I_{A-} = \Delta I_A - I_0 = \frac{2}{3} k_1 I_{FA} \quad (9)$$

同理, 得线模 B 相和线模 C 相电流:

$$\begin{cases} I_{B-} = -\frac{1}{3} k_1 I_{FA} \\ I_{C-} = -\frac{1}{3} k_1 I_{FA} \end{cases} \quad (10)$$

综上, A 相接地故障时, 线模 B 相和 C 相电流完全相等, 线模 A 相电流为线模 B 相和 C 相的 2 倍且方向相反。

由式(9)、(10)可知, 线模相电流均与故障电流成正比, 其比例系数只与 k_1 相关, 与 k_0 无关。

2.2 相间故障

以 BC 相间故障为例, 其故障边界条件为:

$$\begin{cases} I_{FA} = 0 \\ I_{FB} + I_{FC} = 0 \\ I_{FB} R_F = U_{FB} - U_{FC} \end{cases} \quad (11)$$

式中: R_F 为过渡电阻。

故障点处电流序分量为:

$$\begin{bmatrix} I_{F0} \\ I_{F1} \\ I_{F2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_{FB} \\ -I_{FB} \end{bmatrix} = \frac{I_{FB}}{3} \begin{bmatrix} 0 \\ a - a^2 \\ a^2 - a \end{bmatrix} \quad (12)$$

考虑电流分布系数后, 可计算得到线模各相电流:

$$\begin{cases} I_{A-} = 0 \\ I_{B-} = k_1 I_{FB} \\ I_{C-} = -k_1 I_{FB} \end{cases} \quad (13)$$

由式(11)~(13)可知, 当发生两相故障时, 故障相的线模相电流大小相等, 方向相反; 非故障相的线模相电流为 0。

2.3 两相接地故障

两相接地故障时, 不能直接采用序网图分析, 需要结合复合序网图进行分析, 同样可以求得:

$$\begin{cases} I_{A-} = k_1 \frac{E_1}{z_\Sigma} \\ I_{B-} = -k_1 \frac{E_1(j\sqrt{3}z_\Sigma + z_{1\Sigma})}{2z_{1\Sigma}z_\Sigma} \\ I_{C-} = k_1 \frac{E_1(j\sqrt{3}z_\Sigma - z_{1\Sigma})}{2z_{1\Sigma}z_\Sigma} \\ z_\Sigma = z_{1\Sigma} + 2z_{0\Sigma} + 6R_F \end{cases} \quad (14)$$

式中: E_1 为等效正序电源; $z_{0\Sigma}$ 和 $z_{1\Sigma}$ 分别为等效零序总阻抗、正序总阻抗。

式(14)中的电流表达式较为复杂, 以 I_{A-} 为基准进行分析:

$$\begin{cases} I_{B-} = \left(-\frac{1}{2} - j\left(\sqrt{3} \frac{z_{0\Sigma} + 3R_F}{z_{1\Sigma}} + \frac{\sqrt{3}}{2}\right)\right) I_{A-} \\ I_{C-} = \left(-\frac{1}{2} + j\left(\sqrt{3} \frac{z_{0\Sigma} + 3R_F}{z_{1\Sigma}} + \frac{\sqrt{3}}{2}\right)\right) I_{A-} \end{cases} \quad (15)$$

通常而言, 零序阻抗约为正序阻抗的 2~3 倍。在加入串补电容后, 零序阻抗仍大于正序阻抗, 且零序总阻抗与正序总阻抗的相角基本一致。因此, 式(15)中系数的模值在最极端的工况下 ($z_{0\Sigma} \approx z_{1\Sigma}$) 仍不低于 2。基于此, 故障相(B 相和 C 相)的线模相电流幅值不小于非故障相(A 相)对应值的 2 倍。

2.4 三相接地故障

三相接地故障时, 系统中只有正序电流, 线模各相电流为:

$$\begin{cases} I_{A-} = k_1 I_{FA} \\ I_{B-} = k_1 a^2 I_{FA} \\ I_{C-} = k_1 a I_{FA} \end{cases} \quad (16)$$

由式(16)可知,当发生三相接地故障时,线模相电流的幅值相同,相角依次相差 120° 。

2.5 选相方案

本文选取单相接地故障(AG、BG、CG)、相间故障(BC、CA、AB)、两相接地故障(BCG、CAG、ABG)、三相接地故障(ABCG)开展分析,上述4种故障类型下的线模相电流如表1所示。

表1 不同故障类型下的线模相电流

Table 1 Line-mode phase currents under different fault types

类型		I_{A-}	I_{B-}	I_{C-}
单相接地故障	AG	$\frac{2k_1 I_{FA}}{3}$	$-\frac{k_1 I_{FA}}{3}$	$-\frac{k_1 I_{FA}}{3}$
	BG	$-\frac{k_1 I_{FB}}{3}$	$\frac{2k_1 I_{FB}}{3}$	$-\frac{k_1 I_{FB}}{3}$
	CG	$-\frac{k_1 I_{FC}}{3}$	$-\frac{k_1 I_{FC}}{3}$	$\frac{2k_1 I_{FC}}{3}$
相间故障	BC	0	$k_1 I_{FB}$	$-k_1 I_{FB}$
	CA	$-k_1 I_{FC}$	0	$k_1 I_{FC}$
	AB	$k_1 I_{FA}$	$-k_1 I_{FA}$	0
两相接地故障	BCG	$k_1 \frac{E_1}{z_\Sigma}$	$-k_1 \frac{E_1 z_{\Sigma+}}{2z_{1\Sigma} z_\Sigma}$	$k_1 \frac{E_1 z_{\Sigma-}}{2z_{1\Sigma} z_\Sigma}$
	CAG	$k_1 \frac{a^2 E_1 z_{\Sigma-}}{2z_{1\Sigma} z_\Sigma}$	$k_1 \frac{a^2 E_1}{z_\Sigma}$	$-k_1 \frac{a^2 E_1 z_{\Sigma+}}{2z_{1\Sigma} z_\Sigma}$
	ABG	$-k_1 \frac{a E_1 z_{\Sigma+}}{2z_{1\Sigma} z_\Sigma}$	$k_1 \frac{a E_1 z_{\Sigma-}}{2z_{1\Sigma} z_\Sigma}$	$k_1 \frac{a E_1}{z_\Sigma}$
三相接地故障	ABCG	$k_1 I_{FA}$	$k_1 a^2 I_{FA}$	$k_1 a I_{FA}$

注: $z_{\Sigma+} = j\sqrt{3}z_\Sigma + z_{1\Sigma}$, $z_{\Sigma-} = j\sqrt{3}z_\Sigma - z_{1\Sigma}$ 。

由表1可知,所有线模相电流均以正序电流分布系数作为乘数。因此, k_1 的大小和特性对各相电流间的相对关系无影响。表1分析的是M侧线模各相电流情况,N侧的电流情况类似,故不再赘述。

上述分析仅考虑了固定串补的情况。实际应用中,可控串补结构更为复杂,其等效电路如图5所示。可控串补等效电路主要由并联电容 C 、并联电感 L 及一对反并联晶闸管构成。更复杂的可控串补还包含间隙、串联电感和旁路开关等元件。可控串补等效电路通过调节反并联晶闸管的触发角控制并联电感所在支路电流,从而改变其等效阻抗,文献[24]给出了可控串补等效阻抗的表达式。对于相同的并联电容 C ,可控串补的等效阻

抗值小于固定串补的阻抗值, β 值将变小,串补对线路的影响将会降低,不影响上述选相的推导分析过程。

同时,选相方案还需考虑MOV(金属氧化物压敏电阻)元件因过电压而开始放电的暂态过程。该过程会导致电压和电流波形的突变,并产生一些较为显著的非整次谐波分量,对选相计算过程中的电流工频相量的计算产生不利影响。此外,MOV导通亦会引发等效阻抗的变化。文献[7]分析了MOV导通时可控串补的等效电路,提出线性电阻与线性电容串联的等效模型。其中,线性电阻的最大阻值小于并联电容 C 的容抗值,且线性电容的容抗随着短路电流增大而快速减小。总体而言,MOV导通时串补对线路的影响将会降低,上述选相分析仍然成立。

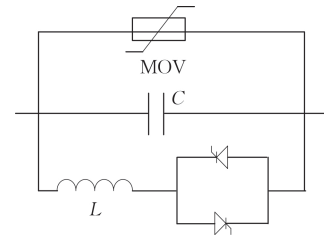


图5 可控串补的等效电路

Fig.5 Equivalent circuit of controllable series compensation

具体的选相流程如图6所示。首先,计算线模各相电流,并将幅值从小到大排序,得到 $|I_{\min}|$ 、 $|I_{\text{mid}}|$ 、 $|I_{\max}|$ 。

然后,计算零序电流 I_0 的幅值,并判断故障是否接地。

$$|I_0| > |I_0|_{\text{set}} \quad (17)$$

式中: $|I_0|_{\text{set}}$ 为零序电流幅值的阈值,可取0.1倍的额定电流。

若故障为不接地故障,当 $|I_{\min}| < 0.1|I_{\max}|$ 时,可判定为相间故障,且 $|I_{\text{mid}}|$ 和 $|I_{\max}|$ 对应的相别为故障相;否则可判定为三相故障。

若故障为接地故障,当 $|I_{\min}|/|I_{\text{mid}}| > 0.8$ 时,可判定为单相接地故障,且 $|I_{\max}|$ 为故障相;否则可判定为两相接地故障, $|I_{\text{mid}}|$ 和 $|I_{\max}|$ 对应的相别为故障相。

该选相方案适用于串补线路和常规线路。对于无串补的线路, $Z_c = 0$,即 $\beta = 0$ 的场景,上述

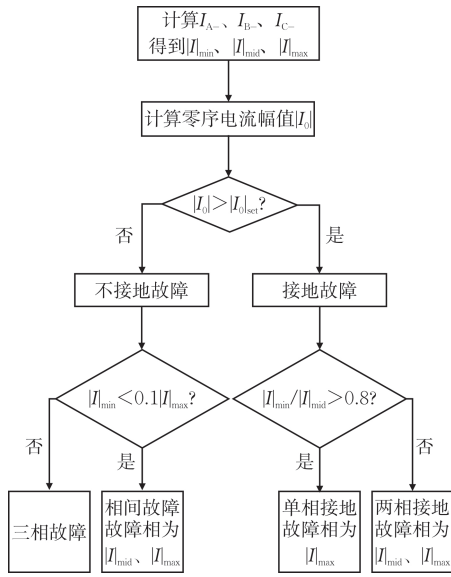


图 6 选相流程

Fig.6 Flowchart of the phase selection

推导过程和结论仍然成立。

新能源送出线路两侧的背侧系统阻抗 Z_{Mj} 或 Z_{Nj} 不稳定且不相等, 幅值较大, 相角不确定, 极端情况下甚至呈现负电阻和负电抗的特性。由于包括本文方案在内的阻抗分析类选相方法均需要通过稳定且特性明确的系统阻抗进行推导, 故此类方法存在错误选相的风险。因此, 针对该类场景的单端量选相方法有待进一步研究, 或采用需要通信的差流选相等双端量选相方案。

2.6 邻线串补对选相的影响

为便于阐述基本原理, 上文仅分析了单回线场景, 本节进一步分析双回线路均带串补的情况, 如图 7 所示。

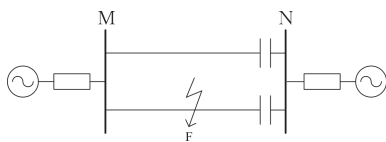


图 7 带串补的双回输电系统线路故障

Fig.7 Line faults in a double-circuit transmission system with series compensation

由于故障边界条件未变化, 故障点处序分量电流与式(1)相同。带串补的双回线路故障分量序网图如图 8 所示。

图 8 中变量意义与图 4 相同。新增的 $Z_{Lj,II}$ 为邻线线路阻抗, $Z_{C,II}$ 为串补容抗。定义邻线总阻抗

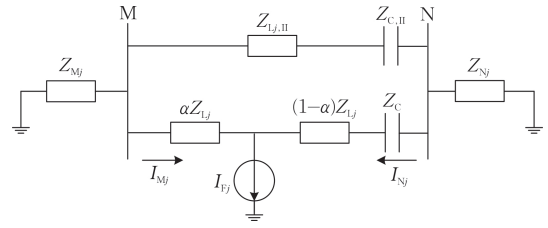


图 8 带串补的双回线路故障分量序网图

Fig.8 Sequence network diagram of fault components for double-circuit lines with series compensation

$Z_{j,II} = Z_{Lj,II} - Z_{C,II}$ 。鉴于串补通常采用欠补偿方案, 在各序分量下, 串补容抗值 $Z_{C,II}$ 小于线路总阻抗 $Z_{Lj,II}$, 因此邻线总阻抗 $Z_{j,II}$ 仍为正电抗性质。

相较于单回线, 图 8 中的电流分流关系较为复杂。列写本线和邻线的 KVL 方程:

$$\begin{cases} V_{Mj} - I_{Mj}\alpha Z_{Lj} = V_{Nj} - I_{Nj}((1-\alpha)Z_{Lj} - Z_C) \\ V_{Mj} - V_{Nj} = I_{j,II}Z_{j,II} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $I_{j,II}$ 为邻线电流, 从 M 侧指向 N 侧。

列写两侧系统的 KVL 方程:

$$\begin{cases} V_{Mj} = -(I_{j,II} + I_{Mj})Z_{Mj} \\ V_{Nj} = (I_{j,II} - I_{Nj})Z_{Nj} \end{cases} \quad (19)$$

列写故障点处的 KCL 方程:

$$I_{Nj} = I_{Fj} - I_{Mj} \quad (20)$$

将式(19)、(20)代入式(18)中, 消去 I_{Nj} 、 V_{Mj} 和 V_{Nj} 可得:

$$\begin{cases} (Z_{Mj} + Z_{Nj})I_{j,II} + (Z_{Mj} + Z_{Nj} + Z_{Lj} - Z_C)I_{Mj} = \\ (Z_{Lj} + Z_{Nj} - \alpha Z_{Lj} - Z_C)I_{Fj} \\ (Z_{Mj} + Z_{Nj} + Z_{j,II})I_{j,II} + (Z_{Mj} + Z_{Nj})I_{Mj} = Z_{Nj}I_{Fj} \end{cases} \quad (21)$$

再将 $I_{j,II}$ 消去, 即得到:

$$I_{Mj} = \frac{(Z_{j,II} + Z_{Sj})(Z_{Lj}(1-\alpha) - \beta Z_{Lj}) + Z_{j,II}Z_{Nj}}{(Z_{j,II} + Z_{Sj})(Z_{Lj} - \beta Z_{Lj}) + Z_{Sj}Z_{j,II}} I_{Fj} \quad (22)$$

为表达简洁, 定义背侧系统总阻抗 $Z_{Sj} = Z_{Mj} + Z_{Nj}$ 。式(22)与式(4)的形式一致, 但结构更为复杂。此时, 保护安装处的电流序分量可由故障点处的对应电流序分量线性表出, 即分布系数 k_0 和 k_1 只与系统中的阻抗参数有关。本文提出的新算法与零序无关, 在双回线的场景下, 其选相推导过程与 2.1—2.4 节完全一致, 且双回线不会对该算法产生不利影响。

2.7 误差分析

由表1可知,本文方法的准确性受分布系数 k_j 与电流测量误差两方面因素的影响。

三相串补电容容差导致的不对称性会破坏前文所述“正负序电流分布系数相同”的前提,即 $k_1=k_2$ 不再成立。根据国标要求,电容容量偏差应在 $-5\% \sim +10\%$ 范围内,且容量越大,允许的相对误差越小。假定实际电容值和标称电容值分别为 βZ_{L1} 、 $(\beta + \Delta\beta)Z_{L1}$,则分布系数 k_j 将变为 $k_j + \Delta k_j$:

$$k_j + \Delta k_j = \frac{(1 - \alpha)Z_{Lj} + Z_{Nj} - j(\beta + \Delta\beta)Z_{L1}}{Z_{Lj} + Z_{Mj} + Z_{Nj} - j(\beta + \Delta\beta)Z_{L1}} \quad (23)$$

对比分布系数的变化:

$$\frac{k_j + \Delta k_j}{k_j} = \frac{(1 - \alpha)Z_{Lj} + Z_{Nj} - j(\beta + \Delta\beta)Z_{L1}}{(1 - \alpha)Z_{Lj} + Z_{Nj} - j(\beta + \Delta\beta)Z_{L1}} \cdot \frac{(1 - \alpha)Z_{Lj} + Z_{Nj} - j(\beta + \Delta\beta)Z_{L1}}{Z_{Lj} + Z_{Mj} + Z_{Nj} - j(\beta + \Delta\beta)Z_{L1}} \quad (24)$$

将 $\Delta\beta$ 作为 β 的一阶小量,可得:

$$\frac{k_j + \Delta k_j}{k_j} = 1 - \frac{j\Delta\beta Z_{L1}}{(1 - \alpha)Z_{Lj} + Z_{Nj} - j\beta Z_{L1}} \quad (25)$$

由式(25)可知,若 $\Delta\beta$ 的变化较小,相应的 Δk_j 变化也将很小,进而对线模相电流的影响有限。由于选相判据的裕度很大,仍可准确识别故障相。

因为线模相电流与三相测量电流和零序电流线性相关,电流测量误差引起的算法误差也将是线性的,所以本文方法仍能够依赖判据的高裕度而正确选相。

3 仿真实验

3.1 仿真系统

在PSCAD中建立如图3所示的带串补电容的输电系统。线路采用如图9所示的杆塔模型,总长100 km。串补电容安装在N侧,容量为110 μF ,相当于补偿度为68%。两侧为220 kV交流系统,M侧等值正序阻抗 $Z_{M1} = 0.5 + j5.3 \Omega$,零序阻抗 $Z_{M0} = 1.2 + j15.7 \Omega$;N侧正序阻抗 $Z_{N1} = 0.5 + j5.4 \Omega$,零序阻抗 $Z_{N0} = 1.2 + j14.4 \Omega$ 。采样频率取10 kHz,故障起始时刻为0.1 s。

3.2 序分量选相元件仿真分析

在电路上不同位置设置A相接地故障,对称

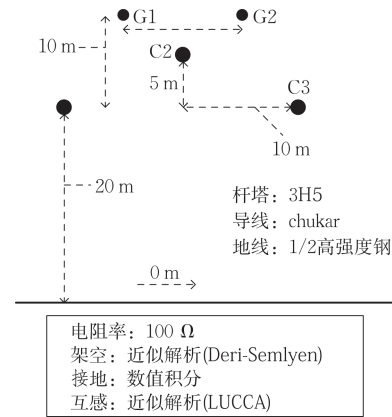


图9 线路杆塔模型

Fig.9 Transmission line tower model

分量选相元件的动作情况如图10所示。由图10可知,当单侧带串补的线路上任意一点发生A相故障时,N侧(带串补侧)选相元件均能正确选出A相。然而,M侧选相元件会出现误选相的情况,当故障发生在距M侧15~55 km时,选相结果为B相;其余位置可正确选到A相。

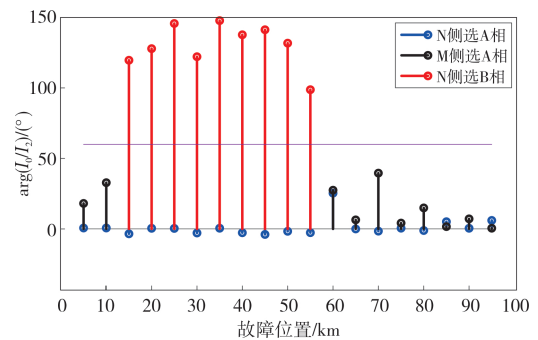


图10 对称分量选相元件动作情况

Fig.10 Operation of phase-selection elements based on symmetrical components

将线路和背侧系统的参数代入式(5),求解会发生误选相的故障点位置(即 α 值)。当 $0.12 < \alpha < 0.57$ 时,不等式成立,即故障发生在线路全长的12%~57%处时,对称分量选相元件会发生误选相的情况,与图10的仿真结果相符。

进一步改变故障类型、线路长度、串补补偿度及系统阻抗等参数进行仿真,均可得到相似的结果。

3.3 故障选相仿真实验

在距M侧45 km处设置A相接地故障,M侧线模相电流相量如图11所示,横轴为电流相量实

部, 纵轴为电流相量虚部。

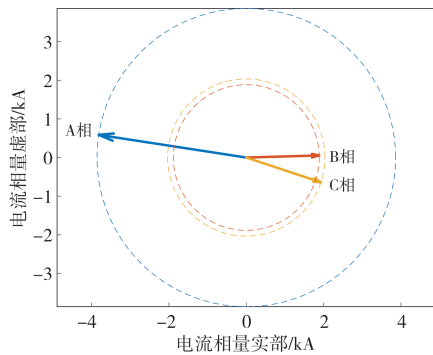


图11 A相接地故障M侧线模相电流相量

Fig.11 Phasors of line-mode phase currents on the M side for an A-phase ground fault

由图11可知, A相故障时, M侧保护安装处线模相电流中A相幅值最大(约为其他两相的2倍), 且相位与其他两相相反。B相与C相的幅值和相角基本一致, 验证了2.1节中的分析。按照2.5节所述选相流程, 可正确选到故障相A相。

当A相接地故障时, N侧线模相电流相量如图12所示, N侧保护安装处线模相电流的特征与M侧相似, 仍可正确选择故障相A相。

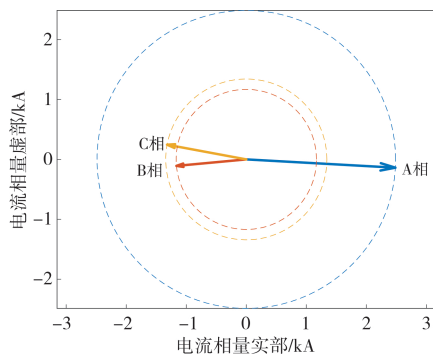


图12 A相接地故障N侧线模相电流相量

Fig.12 Phasors of line-mode phase currents on the N side for an A-phase ground fault

考察线路不同位置发生故障时的选相情况, 以A相接地故障为例, M侧选相元件动作情况如表2所示。

由表2可知, 线路不同位置发生故障后, 线模相电流特征与理论分析一致, 均能正确选出故障相。进一步考察线路发生不同类型故障时, 本文提出的选相元件的有效性。以线路中点故障为例, M侧选相元件动作情况如表3所示。

表2 不同位置发生故障时M侧选相元件动作情况

Table 2 Operation of phase-selection elements on the M side under faults at different locations

故障位置/km	I_0/kA	I_A /kA	I_B /kA	I_C /kA	故障选相
10	$4.33\angle-87^\circ$	$0.73\angle146^\circ$	$0.37\angle-27^\circ$	$0.41\angle-30^\circ$	AG
20	$3.21\angle-83^\circ$	$1.09\angle114^\circ$	$0.51\angle-68^\circ$	$0.54\angle-76^\circ$	AG
30	$2.71\angle-78^\circ$	$1.75\angle113^\circ$	$0.86\angle-57^\circ$	$0.91\angle-74^\circ$	AG
40	$3.19\angle-21^\circ$	$7.66\angle169^\circ$	$3.87\angle-8^\circ$	$3.79\angle-13^\circ$	AG
50	$2.72\angle-59^\circ$	$2.50\angle174^\circ$	$1.22\angle5^\circ$	$1.32\angle-16^\circ$	AG
60	$2.53\angle-72^\circ$	$2.60\angle117^\circ$	$1.25\angle-57^\circ$	$1.34\angle-69^\circ$	AG
70	$1.47\angle40^\circ$	$5.39\angle-128^\circ$	$2.86\angle53^\circ$	$2.53\angle51^\circ$	AG
80	$1.37\angle52^\circ$	$2.37\angle-112^\circ$	$1.31\angle68^\circ$	$1.21\angle69^\circ$	AG
90	$1.10\angle-16^\circ$	$1.18\angle-129^\circ$	$0.66\angle54^\circ$	$0.59\angle44^\circ$	AG

表3 不同故障类型时M侧选相元件动作情况

Table 3 Operation of phase-selection elements on the M side under different fault types

故障类型	I_0/kA	I_A /kA	I_B /kA	I_C /kA	故障选相
AG	$2.72\angle-59^\circ$	$2.50\angle174^\circ$	$1.22\angle5^\circ$	$1.32\angle-16^\circ$	AG
BG	$2.72\angle-179^\circ$	$1.32\angle-134^\circ$	$2.50\angle55^\circ$	$1.22\angle-116^\circ$	BG
CG	$2.72\angle61^\circ$	$1.22\angle124^\circ$	$1.32\angle105^\circ$	$2.50\angle-66^\circ$	CG
BC	0	$0.24\angle-172^\circ$	$5.61\angle-176^\circ$	$5.85\angle4^\circ$	BC
AC	0	$5.85\angle-116^\circ$	$0.24\angle70^\circ$	$5.61\angle64^\circ$	AC
AB	0	$5.61\angle-56^\circ$	$5.85\angle123^\circ$	$0.24\angle-55^\circ$	AB
BCG	$1.25\angle108^\circ$	$0.74\angle167^\circ$	$5.37\angle-175^\circ$	$6.08\angle3^\circ$	BCG
ACG	$1.25\angle-12^\circ$	$6.08\angle-117^\circ$	$0.74\angle49^\circ$	$5.37\angle65^\circ$	ACG
ABG	$1.25\angle-132^\circ$	$5.37\angle-55^\circ$	$6.08\angle123^\circ$	$0.74\angle-73^\circ$	BCG
ABCG	0	$6.61\angle-86^\circ$	$6.62\angle154^\circ$	$6.60\angle34^\circ$	ABCG

由表3可知, 线路中点发生不同类型故障时, 其零序电流和线模相电流特征与理论分析一致, 均能正确选出故障相。

进一步考察带过渡电阻故障时的选相情况, 以线路中点A相接地故障为例, M侧选相元件动作情况如表4所示。

表4 不同过渡电阻故障时M侧选相元件动作情况

Table 4 Operation of phase-selection elements on the M side under faults with different transition resistances

过渡电阻/ Ω	I_0/kA	I_A /kA	I_B /kA	I_C /kA	故障选相
0	$2.72\angle-59^\circ$	$2.50\angle174^\circ$	$1.22\angle5^\circ$	$1.32\angle-16^\circ$	AG
1	$2.29\angle-41^\circ$	$1.92\angle-158^\circ$	$0.98\angle21^\circ$	$0.92\angle21^\circ$	AG
10	$1.27\angle-26^\circ$	$1.58\angle-160^\circ$	$0.81\angle19^\circ$	$0.83\angle19^\circ$	AG
50	$0.75\angle-14^\circ$	$0.94\angle179^\circ$	$0.50\angle-1^\circ$	$0.53\angle0^\circ$	AG
100	$0.35\angle-12^\circ$	$0.63\angle174^\circ$	$0.31\angle-6^\circ$	$0.29\angle-5^\circ$	AG
200	$0.18\angle-11^\circ$	$0.39\angle171^\circ$	$0.19\angle-9^\circ$	$0.17\angle-7^\circ$	AG

由表4可知,在不同的过渡电阻下,电流零序、线模相电流特征与理论分析一致,均能正确选出故障相,说明本文算法不受过渡电阻的影响。

考察不同线路长度下本文算法的选相情况,仍以线路中点A相接地为例,M侧选相元件动作情况如表5所示。

表5 不同线路长度时M侧选相元件动作情况
Table 5 Operation of phase-selection elements on the M side for different line lengths

线路长度/km	I_0/kA	I_A/kA	I_B/kA	I_C/kA	故障选相
10	$3.92\angle-55^\circ$	$3.60\angle179^\circ$	$1.76\angle0^\circ$	$1.90\angle-9^\circ$	AG
50	$2.59\angle-46^\circ$	$2.17\angle-150^\circ$	$1.11\angle16^\circ$	$1.04\angle27^\circ$	AG
100	$2.72\angle-59^\circ$	$2.50\angle174^\circ$	$1.22\angle5^\circ$	$1.32\angle-16^\circ$	AG
200	$1.35\angle-8^\circ$	$1.69\angle174^\circ$	$0.90\angle4^\circ$	$0.95\angle-6^\circ$	AG
300	$1.05\angle-15^\circ$	$2.28\angle176^\circ$	$1.11\angle-2^\circ$	$0.99\angle-12^\circ$	AG

由表5可知,在不同线路长度下,零序电流和线模相电流特征与理论分析一致,均能正确选出故障相,说明本文算法适用于各类线路长度。

实际工程中,串补补偿度在20%~80%,过低的补偿度意义有限,过高的补偿度容易引发系统稳定问题。考察不同串补补偿度下本文算法的选相情况,仍以线路中点A相接地为例,M侧选相元件动作情况如表6所示。

表6 不同串补补偿度时M侧选相元件动作情况
Table 6 Operation of phase-selection elements on the M side under different series compensation levels

补偿度/%	I_0/kA	I_A/kA	I_B/kA	I_C/kA	故障选相
20	$1.06\angle-53^\circ$	$0.97\angle170^\circ$	$0.48\angle10^\circ$	$0.51\angle-3^\circ$	AG
40	$1.57\angle-71^\circ$	$1.32\angle-162^\circ$	$0.67\angle25^\circ$	$0.63\angle38^\circ$	AG
60	$2.10\angle-52^\circ$	$1.93\angle181^\circ$	$0.94\angle12^\circ$	$1.02\angle-7^\circ$	AG
70	$2.78\angle-59^\circ$	$2.56\angle169^\circ$	$1.25\angle-3^\circ$	$1.37\angle-12^\circ$	AG

由表6可知,在不同的串补度下,零序电流和线模相电流特征与理论分析一致,均能正确选出故障相,说明本文算法不受串补度的影响。

背侧系统阻抗间接反映系统的运行方式,考察不同系统阻抗下本文算法的选相情况,仍以线路中点A相接地为例,M侧选相元件动作情况如表7所示。

为表达简洁,表7中仅列出背侧正序阻抗值,实际试验中零序阻抗也做了相应大小的调整。由

表7 不同系统阻抗时M侧选相元件动作情况

Table 7 Operation of phase-selection elements on the M side under different system impedances

背侧系统正序阻抗/ Ω	I_0/kA	I_A/kA	I_B/kA	I_C/kA	故障选相
0.1+j1	$3.53\angle-65^\circ$	$2.97\angle-168^\circ$	$1.51\angle35^\circ$	$1.42\angle26^\circ$	AG
0.5+j5.3	$2.72\angle-59^\circ$	$2.50\angle174^\circ$	$1.22\angle5^\circ$	$1.32\angle-16^\circ$	AG
3+j20	$1.02\angle-57^\circ$	$0.94\angle177^\circ$	$0.46\angle-13^\circ$	$0.50\angle-7^\circ$	AG

表7可知,在不同背侧系统阻抗下,零序电流和线模相电流特征与理论分析一致,均能正确选出故障相,说明算法能够适应不同背侧系统阻抗。

可控串补在MOV导通时,其等效阻抗的变化和暂态放电过程会对选相计算过程产生影响。金属性故障且故障点距离串补较近时,易发生MOV导通的现象。考察10 km处不同类型的金属性故障,此时均发生MOV导通的现象,M侧选相元件动作情况如表8所示。

表8 MOV导通时M侧选相元件动作情况
Table 8 Operation of phase-selection elements on the M side when the MOV conducts

故障类型	I_0/kA	I_A/kA	I_B/kA	I_C/kA	故障选相
AG	$4.33\angle-87^\circ$	$0.73\angle146^\circ$	$0.37\angle-27^\circ$	$0.41\angle-30^\circ$	AG
BC	0	$0.34\angle-165^\circ$	$6.37\angle-172^\circ$	$6.48\angle11^\circ$	BC
BCG	$1.25\angle114^\circ$	$0.98\angle153^\circ$	$6.56\angle-159^\circ$	$6.82\angle23^\circ$	BCG
ABCG	0	$7.21\angle-76^\circ$	$7.25\angle146^\circ$	$7.23\angle38^\circ$	ABCG

由表8可知,可控串补的暂态过程对线模相电流幅值和相位产生了一定的影响,但由于选相判据的裕度较大,仍可正确选出故障相。

实际应用中,尤其在复杂负荷环境下,零序电流的测量误差可能会对选相结果产生影响。根据国标要求,10P型电流互感器的误差不应超过10%。以表2的不同故障类型实验数据为基础,零序电流幅值增加10%,相角增加5°,考察M侧选相元件动作情况如表9所示。

由表9可知,零序电流存在误差时,三相线模相电流与表2中的数据存在差异,但仍在判据范围内,可正确选相。

4 结论

本文分析了传统序分量选相元件的应用边界,提出了一种基于线模相电流的串补线路故障选相

表9 考虑零序电流误差的M侧选相元件动作情况

Table 9 Operation of phase-selection elements on the M side considering zero-sequence current errors

故障类型	I_0/kA	I_A/kA	I_B/kA	I_C/kA	故障选相
AG	$2.99\angle-54^\circ$	$2.87\angle173^\circ$	$0.88\angle13^\circ$	$0.95\angle-17^\circ$	AG
BG	$2.99\angle-174^\circ$	$0.95\angle-134^\circ$	$2.86\angle54^\circ$	$0.88\angle-109^\circ$	BG
CG	$2.99\angle66^\circ$	$0.88\angle131^\circ$	$0.95\angle105^\circ$	$2.87\angle-67^\circ$	CG
BC	$0.10\angle5^\circ$	$0.34\angle-173^\circ$	$5.71\angle-176^\circ$	$5.75\angle4^\circ$	BC
AC	$0.10\angle5^\circ$	$5.90\angle-117^\circ$	$0.22\angle95^\circ$	$5.56\angle65^\circ$	AC
AB	$0.10\angle5^\circ$	$5.56\angle-57^\circ$	$5.90\angle124^\circ$	$0.21\angle-80^\circ$	AB
BCG	$1.38\angle113^\circ$	$0.58\angle171^\circ$	$5.23\angle-174^\circ$	$6.23\angle2^\circ$	BCG
ACG	$1.38\angle-7^\circ$	$6.23\angle-118^\circ$	$0.58\angle54^\circ$	$5.23\angle66^\circ$	ACG
ABG	$1.38\angle-127^\circ$	$5.23\angle-54^\circ$	$6.23\angle122^\circ$	$0.58\angle-69^\circ$	BCG
ABCG	$0.10\angle5^\circ$	$6.61\angle-87^\circ$	$6.71\angle154^\circ$	$6.51\angle34^\circ$	ABCG

方法,主要结论如下:

1)串补电容的接入对串补侧的选相元件无不利影响,但会导致线路对侧的序分量选相元件发生误选相。

2)串补电容改变了线路的电流分布系数,在线路的一定范围内发生故障时,电流分布系数的极性会发生改变。

3)本文采用线模相电流,选相元件不受串补电容的影响,原理简单可靠,能够正确识别各种故障类型。

参考文献

- [1] RAID, FARIED S O, RAMAKRISHNA G, et al. Hybrid series compensation scheme capable of damping subsynchronous resonance [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2010, 4(3): 456-466.
- [2] 李鹏, 刘玢岩, 习伟, 等. 基于模型参数辨识的串联补偿输电线路纵联保护原理 [J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 20-28.
LI Peng, LIU Binyan, XI Wei, et al. Pilot protection principle based on model parameter identification for a series compensated transmission line [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 20-28.
- [3] NAYAK P K, PRADHAN A K, BAJPAI P. A fault detection technique for the series-compensated line during power swing [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 714-722.
- [4] NAYAK P K, PRADHAN A K, BAJPAI P. Wide-area measurement-based backup protection for power network with series compensation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(4): 1970-1977.
- [5] 陈福锋, 钱国明, 薛明军. 适用于串联电容补偿线路的距离保护新原理 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12): 61-66.
CHEN Fufeng, QIAN Guoming, XUE Mingjun. Research on new principle of distance protection adapted to series capacitor compensated line [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(12): 61-66.
- [6] 王育学, 尹项根, 张哲, 等. 基于参数识别原理的串补线路距离保护 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 98-102.
WANG Yuxue, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Distance protection for series compensated lines based on parameter identification principle [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 98-102.
- [7] 黄宗超, 王帆, 刘一民, 等. 基于串补线性化模型的含串补线路距离保护整定方法 [J]. 电力自动化设备, 2019, 39(11): 133-138.
HUANG Zongchao, WANG Fan, LIU Yimin, et al. Distance protection setting method for lines with series compensation based on series compensation linearization model [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 133-138.
- [8] 唐萃, 尹项根, 戚宣威, 等. 大串补度输电线路的电流差动保护分析与对策 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 157-163.
TANG Cui, YIN Xianggen, QI Xuanwei, et al. Analysis and countermeasures of current differential protection for large series compensation transmission lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 157-163.
- [9] 李振兴, 包文亮, 陈艳霞, 等. 适用于含串补设备的输电线路电流差动保护新判据 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 11-19.
LI Zhenxing, BAO Wenliang, CHEN Yanxia, et al. A new criterion for current differential protection of transmission lines with series compensation equipment [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 11-19.
- [10] HE S E, SUONAN J, BO Z Q. Integrated impedance-based pilot protection scheme for the TCSC-compensated EHV/UHV transmission lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 835-844.
- [11] 索南加乐, 谈树峰, 何世恩, 等. 基于模型识别的串补线路方向元件 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(14): 66-70.
TAN Shufeng, HE Shien, et al. Directional element of series compensation line based on model identification [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(14): 66-70.
- [12] 许庆强, 索南加乐, 宋国兵, 等. 一种电流故障分量高压线路保护选相元件 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(7): 50-54.
XU Qingqiang, XU Qingqiang, SONG Guobing, et al. Phase selection element for high-voltage line protection

- with current fault component [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(7): 50-54.
- [13] 马静, 王希, 王增平. 一种基于电流突变量的故障选相新方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 117-124.
MA Jing, WANG Xi, WANG Zengping. A new fault phase identification method based on phase current difference [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 117-124.
- [14] 徐振宇, 杨奇逊, 刘万顺, 等. 一种序分量高压线路保护选相元件[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(3): 214-216.
XU Zhenyu, YANG Qixun, LIU Wanshun, et al. A sequence fault phase selector for transmission line protective relay [J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(3): 214-216.
- [15] 黄少锋, 申洪明, 费彬. 交直流互联系统对电流选相元件的影响分析及对策[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2016, 43(2): 1-7.
HUANG Shaofeng, SHEN Hongming, FEI Bin. The effect of AC/DC interconnected network on the phase selector based on current and the countermeasure [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2016, 43(2): 1-7.
- [16] 李一泉, 屠卿瑞, 陈桥平, 等. 大型光伏电站对送出线路保护选相元件的影响[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2976-2982.
LI Yiquan, TU Qingrui, CHEN Qiaoping, et al. Influence of large-scale photovoltaic power plant on phase-selection elements of line protections [J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2976-2982.
- [17] 郎学毅, 汤亚芳, 熊炜, 等. 适用于逆变器风电接入系统的改进故障序分量选相方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(7): 89-97.
LANG Xueyi, TANG Yafang, XIONG Wei, et al. Improved fault sequence component phase selection method suitable for inverter wind power access system [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(7): 89-97.
- [18] 陈实, 邵能灵, 范春菊, 等. 逆变器电源接入对选相元件的影响分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 106-112.
CHEN Shi, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. Influence of inverter-interfaced generator on element of phase selectors [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 106-112.
- [19] 王晨清, 宋国兵, 汤海雁, 等. 选相及方向元件在风电接入系统中的适应性分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 89-95.
WANG Chenqing, SONG Guobing, TANG Haiyan, et al. Adaptability analysis of phase selectors and directional relays in power systems integrated with wind farms [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 89-95.
- [20] 李振兴, 杨梓康, 杨桃, 等. 大规模新能源送出线路继电保护关键技术探讨[J/OL]. 浙江电力, 2025: 1-17. (2025-06-27) [2025-07-27]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=ZJDL20250624001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
LI Zhenxing, YANG Zikang, YANG Guang, et al. Key technologies for relay protection of bulk renewable energy transmission lines [J/OL]. Zhejiang Electric Power, 2025: 1-17. (2025-06-27) [2025-07-27]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=ZJDL20250624001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [21] 张俊峰, 高亮, 沈奕菲, 等. 适用于双馈机组风电场的故障电压序分量选相元件[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 136-143.
ZHANG Junfeng, GAO Liang, SHEN Yifei, et al. Fault-sequence element of voltage phase selection applied to DFIG-based wind farm [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 136-143.
- [22] 崔超奇, 王占山, 杨东升, 等. 基于小波变换的输电线故障定位与选相方法[J]. 控制工程, 2017, 24(增刊1): 85-91.
CUI Chaoqi, WANG Zhanshan, YANG Dongsheng, et al. Approach of fault location and fault-phase selection for transmission lines with wavelet transform [J]. Control Engineering of China, 2017, 24(S1): 85-91.
- [23] 田书, 刘芳芳, 任晓明. 基于暂态量的同塔双回线路故障选相研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 50-54.
TIAN Shu, LIU Fangfang, REN Xiaoming. Research on transient-based faulty phase selection for double-circuit lines on the same tower [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 50-54.
- [24] 吴峰, 郑建勇, 梅军, 等. 基于可控串补的故障限流器[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 53-57.
WU Feng, ZHENG Jianyong, MEI Jun, et al. Theoretical study and simulation of TCSC based fault current limiter [J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 53-57.

收稿日期: 2025-07-30; 修回日期: 2025-10-09

作者简介:

杨黎明(1988), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电力系统继电保护、新型电力系统方面的研究工作。

谢诗敏(1988), 女, 学士, 高级工程师, 主要从事水电站自动化控制系统工程应用方面的研究工作。(通信作者)

(本文编辑: 张瑞敏)