

带串联补偿的输电线路纵联阻抗性能分析

夏经德, 索南加乐, 罗玲, 梁振锋, 张健康, 何世恩

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 在系统分析基于串联补偿电容器下输电线路纵联阻抗性能特点和阻值特征的基础上, 特别在详细分析串联补偿电容器及其附属的金属氧化物变阻器(MOV)、放电间隙等不同的运行方式在纵联阻抗产生影响的前提下, 确立了纵联保护的甄别方法. 由于在串联补偿下输电线路分布电容和系统运行方式共同影响纵联阻抗的阻值, 因此通过分析和计算才能确定是否需要补偿. 一旦纵联阻抗幅值小于设定数值时, 就可确定发生区内故障, 保护将正确动作; 否则, 就断定在保护区内没有发生故障, 保护将稳定不动. 在 EMTP 软件的仿真中, 建立了一条 1 000 kV、500 km 含工频串联补偿度为 45% 串联补偿电容器的特高压输电线路模型, 进行了在各种故障下的仿真模拟, 仿真结果验证了上述纵联阻抗及其算法在串联补偿环境下具有足够的稳定性和可靠性.

关键词: 输电线路; 纵联阻抗; 纵联保护; 串联补偿

中图分类号: TM77 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)06-0097-07

Pilot Impedance Performance Analysis for Transmission Lines with Series Compensation

XIA Jingde, SUONAN Jiale, LUO Ling, LIANG Zhenfeng, ZHANG Jiankang, HE Shi'en

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: According to the systematic analysis for performance and impedance value of the transmission line pilot impedance based on the series compensation capacitors, especially for the influences of the different operation modes of the series compensation capacitors and subsidiary metal oxide varistor (MOV), and the discharge gap on the pilot impedance, a discrimination method of the related pilot protection is established. Because the distributed transmission line capacitances and the system operation modes mutually affect the pilot impedance, the necessity of compensation for pilot impedance can be determined via calculation. When the amplitude of the pilot impedance is smaller than the setting value to demonstrate the internal fault, the pilot protection is correctly operated; otherwise the pilot protection is stably be blocked. In the EMTP simulation, an UHV transmission line model of 1 000 kV, 500 km, including the series compensation capacitors of 45% power frequency series compensation degree, is constructed to simulate different types of faults.

Keywords: transmission line; pilot impedance; pilot protection; series compensation

在长距离(特、超)高压输电线路中增加串联补偿电容器, 可有效缩短发电机组之间的电气计算距离, 能明显提高输电线路的电能输送容量, 将明显减少输电走廊的新建设需求量, 并显著增加系统运行

的稳定性和可靠性, 最终体现为具有较高的经济与技术优越性和可行性等^[1].

虽然串联补偿技术给输电线路的运行和控制带来了诸多可观的经济利益和社会效益, 但同时它在

输电线路中的运用也改变了输电线路参数“均匀”分布的结构特点,体现在串联补偿位置上产生了电气状态的“跃变”.在串联补偿装置上安装的附加保护设备(如金属氧化物变阻器(MOV)和放电间隙等)会由于串联补偿电容器所处的运行状态及周围发生的故障而变化,并引发进一步结构及参数的改变.上述情况都将可能造成如电流反向、电压反向及低频振荡等扰动现象^[2],这些现象必将增加继电(纵联)保护识别故障的难度及保护设置的复杂性,如距离保护^[3]和电流差动保护^[4]等.同时,由于配置了串联补偿,输电线路必然面对更多的限制条件和技术要求,为了最大限度满足这些新的要求,将有必要改进或创新继电(纵联)保护理念^[5].针对我国近期在输电系统中出现的串联补偿需求的快速增长,深入研究基于串联补偿条件下各种继电(纵联)保护的特性,是相关科研机构所必须面对的课题^[6].

通过分析在串联补偿下纵联阻抗的阻值特性,确定了输电线路的纵联保护方案.在纵联阻抗性能分析中,定性确立了阻抗数值随故障位置和串联补偿电容的变化规律,并特别针对系统阻抗对阻值的影响,增补了保护动作的判据.通过 EMTP 软件进行仿真,证实了所作理论分析的正确性.

1 基于基本结构下纵联阻抗性能简述

根据文献^[7]纵联阻抗定义及阻值分析过程,按照图 1a 所示电压和电流之间的电气数理关系,可得发生区外故障时的纵联阻抗

$$|Z_{\text{op}\Delta}| = \left| \frac{\Delta \dot{U}_{\text{op}}}{\Delta \dot{I}'_{\text{op}}} \right| = \infty > |zD| \quad (1)$$

式中: $zD = \frac{\Delta \dot{U}_{\text{op}}}{\Delta \dot{I}'_m} = \frac{\Delta \dot{U}_{\text{op}}}{-\Delta \dot{I}'_n}$; $\Delta \dot{U}_{\text{op}} = \Delta \dot{U}_m - \Delta \dot{U}_n$; $\Delta \dot{I}'_{\text{op}} = \Delta \dot{I}'_m + \Delta \dot{I}'_n$.

同理,按照图 1b 所示,根据线路两端电流故障分量和为故障电流的事实,将线路两端电压故障分量、故障电流分别用 $\dot{U}'_F$ 表示后,可得发生区内故障时的纵联阻抗

$$|Z_{\text{op}\Delta}| = \left| \frac{\Delta \dot{U}_{\text{op}}}{\Delta \dot{I}'_{\text{op}}} \right| = \left| \frac{Z_m zD - (Z_m + Z_n) zd}{Z_m + zD + Z_n} \right| < |zD| \quad (2)$$

由此可知,当发生区内故障时,纵联阻抗 $Z_{\text{op}\Delta}$ 的幅值是随故障位置(距离)呈线性变化的,因此当获得线路两端纵联阻抗的(计算)阻值后,就可准确确定在整个被保护区域内纵联阻抗的变化情况.在此可以证明,线路阻抗是纵联阻抗甄别区内、外故障的

阻值分界线.

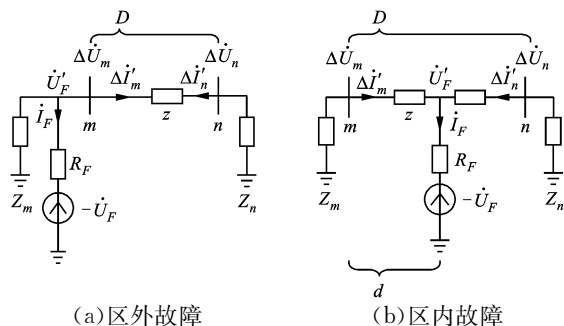


图 1 R-L 单相等效线路模型

图 2 为在考虑长距离输电线路分布电容影响的前提下,将线路分布电容简化集中处理后的单相等效线路模型.

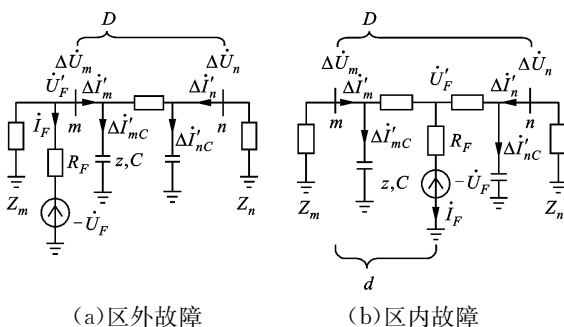


图 2 带线路电容的单相线路模型

在考虑线路分布电容影响的前提下,当区外发生故障时,线路两端电流的相量和为线路电容电流.根据图 2a 所示,通过对线路模型进行阻抗串、并联转换及相关电压相量的计算,纵联阻抗

$$|Z_{\text{op}\Delta}| = K_C |zD| \quad (3)$$

式中: $K_C = |Z_{\text{CD}} / (2Z'_n + zD)|$, $Z_{\text{CD}} = 2/j\omega cD$ 为线路电容容抗, $Z'_n = Z_n Z_{\text{CD}} / (Z_n + Z_{\text{CD}})$.

根据式(1)和式(2),只要 $|K_C| > 1$,纵联阻抗就可以在忽略线路电容影响的前提下同样正确地分辨区内、外故障.根据本文所用 1 000 kV、500 km 等效线路模型相关参数可知,只要系统阻抗满足

$$|Z_n| < 272 \Omega \quad (4)$$

纵联阻抗就可在不考虑补偿线路分布电容影响的前提下完成对所发生各种故障的甄别任务.按照电力系统运行控制的要求,系统的短路功率不得小于该输电线路的自然传输功率,而后者受制于该线路的特征阻抗,上述线路模型的特征阻抗为

$$|Z_T| \approx |(l/c)^{1/2}|_{l=1, c=c_1} \approx 243 \Omega \quad (5)$$

由此可知,由于纵联阻抗对系统阻抗的限制要求大于该输电线路的特征阻抗,因此在系统各种正常的运行控制方式下,系统的等效阻抗必不会大于该输电线路的特征阻抗,自然满足式(4)的条件。反之,在式(4)不能被满足时,说明该系统的短路功率小于被保护线路的自然传输功率,应定义为弱系统。这样,输电线路的电容电流将在系统的总输出电流中占据相当大的比例,加大了纵联阻抗计算式分母项的数量,促使纵联阻抗的计算结果发生数值超越,并可能引起纵联保护误动。纵联阻抗不能忽略线路分布电容的影响,需采取措施解决上述问题。通常解决的方法有两种:① 补偿线路电容的影响;② 适当提高保护启动动作的门槛。

通过图 3 和图 4 所示的电气连接关系,建立在各相电气状态数据上,并通过以线路两端零序电压替换由非平衡接地故障引起的线路两端零序电流,得到对应简化的单相线路模型如图 5 所示,同时获得在单相电路中通过彻底消除相间耦合后基于输电线路正序参数下的纵联阻抗

$$|Z_{\text{op}\Delta\varphi}| = \left| \frac{\Delta\dot{U}_{\text{op}\varphi}}{\Delta\dot{I}'_{\text{op}\varphi}} \right| \begin{cases} \leq |z_1 D|, & \text{区内故障} \\ \geq |z_1 D|, & \text{区外故障} \end{cases} \quad (6)$$

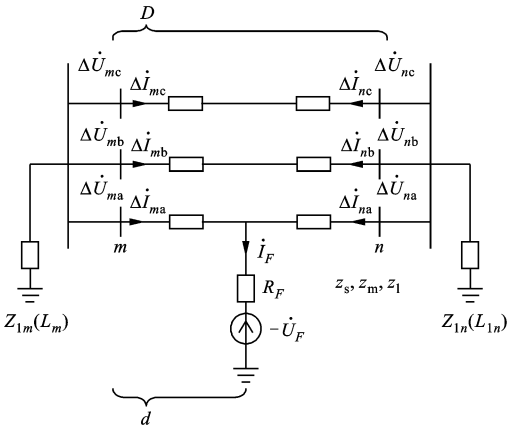


图 3 a 相单相接地时三相等效线路模型

式中:下标 φ 代表a、b、c相; $\Delta\dot{U}_{\text{op}\varphi} = \Delta\dot{U}_{m\varphi\Sigma} - \Delta\dot{U}_{n\varphi\Sigma}$, $\Delta\dot{U}_{m\varphi\Sigma} = \Delta\dot{U}_{m\varphi} - 3Z_m\dot{U}_{m0}/Z_0$, $\Delta\dot{U}_{n\varphi\Sigma} = \Delta\dot{U}_{n\varphi} - 3Z_n\dot{U}_{n0}/Z_0$; $\Delta\dot{I}'_{\text{op}\varphi} = \Delta\dot{I}'_{m\varphi} + \Delta\dot{I}'_{n\varphi}$ 。

2 串联补偿下的纵联阻抗

2.1 纵联阻抗的性能分析

在输电线路中的某个位置(本文选择在 n 侧的被保护区内出口处)安装了串联补偿电容器后,图 6

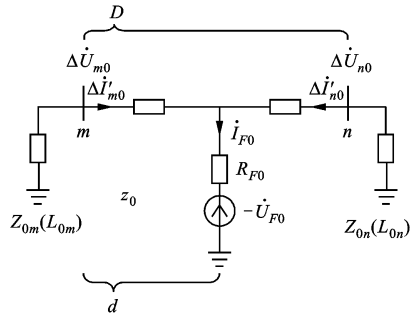


图 4 零序线路模型

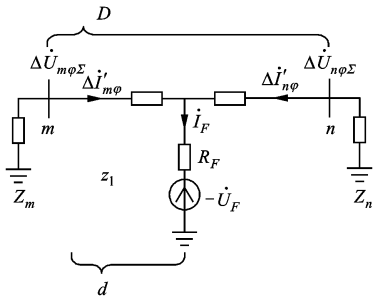
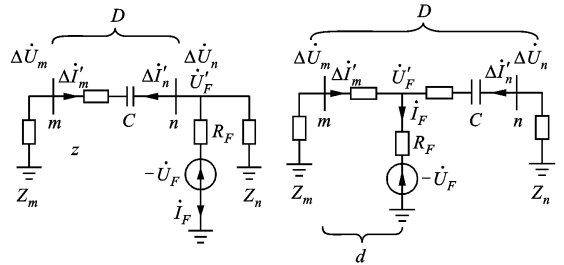


图 5 简化的单相线路模型

为带串联补偿电容器的 $R-L$ 单相线路模型,其中 C 为串联补偿电容器及其容量。



(a) 区外故障

(b) 区内故障

图 6 串联补偿下 $R-L$ 单相等效线路模型

在工频量的基础上,输电线路串联补偿电容器的补偿度最大值一般小于 50%,由此可以看出线路两端间的总阻抗仍呈感性阻抗特征。针对区外故障,如图 6a 所示,线路两端电压差可表示为

$$\begin{aligned} \Delta\dot{U}_m - \Delta\dot{U}_n &= \Delta\dot{I}'_m(zD - j/\omega C) = \\ \Delta\dot{I}'_m zD(1 - K_{sc}) &= -\Delta\dot{I}'_n(zD - j/\omega C) = \\ &= -\Delta\dot{I}'_n zD(1 - K_{sc}) \end{aligned} \quad (7)$$

式中: K_{sc} 是串联补偿的补偿度。

根据图 6b 所示电路的电气关系,可以分别得到线路两端电压及线路两端电流和为

$$\Delta\dot{U}_m = \dot{U}'_F Z_m / (Z_m + zd) \quad (8)$$

$$\Delta\dot{U}_n = \dot{U}'_F Z_n / (Z_n + z(D(1 - K_{sc}) - d)) \quad (9)$$

$$\Delta I'_{op} = U'_F \frac{Z_m + zD(1 - K_{sc}) + Z_n}{(Z_m + zD)(z(D(1 - K_{sc}) - d) - Z_n)} \quad (10)$$

将式(8)~式(10)带入式(2),可获得在串联补偿下纵联阻抗在区内故障时幅值随故障位置的变化规律

$$|Z_{op\Delta}| = \left| \frac{\Delta U'_{op}}{\Delta I'_{op}} \right| = \left| \frac{Z_m zD(1 - K_{sc}) - (Z_m + Z_n)zd}{Z_m + zD(1 - K_{sc}) + Z_n} \right| \quad (11)$$

由式(11)可以获得在线路的保护区内两端点位置上的纵联阻抗

$$|Z_{op\Delta}| \Big|_{d=0} = \left| \frac{Z_m zD(1 - K_{sc})}{Z_m + zD(1 - K_{sc}) + Z_n} \right| < |zD| \quad (12)$$

$$|Z_{op\Delta}| \Big|_{\substack{d=D \\ \text{电容左侧}}} = \left| \frac{-Z_m zDK_{sc} - Z_n zD}{Z_m + zD(1 - K_{sc}) + Z_n} \right| < |zD| \quad (13)$$

当故障发生在 n 端被保护出口处、串联电容的右侧时,可以分别得到线路两端电压及线路两端电流和为

$$\Delta U_m = U'_F Z_m / (Z_m + zD(1 - K_{sc})) \quad (14)$$

$$\Delta U_n = U'_F \quad (15)$$

$$\Delta I'_{op} = U'_F \frac{Z_m + zD(1 - K_{sc}) + Z_n}{(Z_m + zD(1 - K_{sc}))Z_n} \quad (16)$$

将式(14)~式(16)带入式(2),可以获得该定点位置的纵联阻抗

$$|Z_{op\Delta}| \Big|_{\substack{d=D \\ \text{电容左侧}}} = \left| \frac{-Z_n zD(1 - K_{sc})}{Z_m + zD(1 - K_{sc}) + Z_n} \right| < |zD| \quad (17)$$

由式(13)和式(17)的结果可以看出,虽然故障分别在串联补偿电容器两侧时会造成纵联阻抗的计算结果产生一个幅值的跳变,但仍然能够维系并满足上述的限制关系,并且式(12)和式(17)间存在着结构的对称关系(式(2)的计算结果同样可反映出相同结构的对称关系)。

从式(12)、式(13)和式(17)的计算结果可以看出,在整个输电线路被保护区内的任何位置发生故障,纵联阻抗的计算值完全能够适应以线路原始的串联阻抗作为故障甄别分界线的规定。根据上述结果还可以看出,串联补偿度 K_{sc} ($0\% \leq K_{sc} < 100\%$) 对于纵联阻抗计算值在区内故障时的变化几乎不产生影响,由此可以得出纵联阻抗具有较强的适应串联补偿的能力。当串联补偿电容器放置在输电线路的其他位置上(如在线路左侧 m 端被保护区内出口处、线路的中点)时,同样可以获得相同或相似的结果,

推导过程在此省略。

为了保障串联补偿电容器的安全可靠运行,常常在电容器周围布置相关的保护设备,如 MOV 和放电间隙等,当电容器所承受的电压或通过的电流超过允许的范围,这些设备将依据整定值分别被启动。在放电间隙击穿前可确定 MOV 为纯电阻性的器件,从外部看串联补偿可表示为串联补偿电容器和 MOV 的并联

$$\frac{R_M / j\omega C}{R_M + 1/j\omega C} = \frac{R_M}{1 + (R_M \omega C)^2} - \frac{jR_M^2 \omega C}{1 + (R_M \omega C)^2} \quad (18)$$

式中: R_M 为 MOV 的等效电阻值。

式(18)等号右边的前半部呈电阻特性,可转换为对上述线路全长阻抗参数的修正,因此不会改变纵联阻抗的性质和计算阻值的变化范围,而式(18)等号右边的后半部为考虑 MOV 影响后综合串联补偿的结果。由此可以看出,MOV 只在有限的范围内适当地调整并降低了在式(11)、式(17)中所表示补偿度 K_{sc} 的数值,并且决不会引起纵联阻抗发生数据超越的现象。同样,由于放电间隙在保护启动后至故障被可靠消除或隔离这段时间内处于完全导通的状态,这样串联补偿电容器被完全旁路,纵联阻抗的计算结果(式(11)、式(17))就被完全转换为没有串联补偿时的式(2),由于数据状态没有发生本质的变化,因此不对区内故障的甄别产生任何影响。由此可见,当发生区内故障时,无论串联补偿处于何种状态,纵联阻抗的计算结果可确保始终保持在式(2)至式(11)、式(17)间的数据变化范围内。

在现代输电线路串联补偿中,更多地采用了可控串联补偿(TCSC)技术,这项技术有利于优化系统潮流控制,改善系统暂态稳定等。但是,它对某些对串联补偿度比较敏感的继电(纵联)保护及其性能有一定的影响,如距离保护在不能得到实时补偿度的情况下就不得不按照最大补偿的情况设置保护整定值,这样灵敏度将严重下降。对于纵联阻抗,只需考虑在最大补偿度下区外发生故障时纵联阻抗的阻值即可,对灵敏度影响较小。

当发生区外故障时,考虑长距离输电线路分布电容情况下,带串联补偿单相等效线路模型见图7。根据式(3)的推导过程,可以得到基于串联补偿下的纵联阻抗

$$|Z_{op\Delta}| = K'_C |zD| \quad (19)$$

式中: $K'_C = |K_{sc} Z_{CD} / (2Z'_n + K_{sc} zD)|$ 。

以本文 1 000 kV、500 km 的 EMTP 仿真输电

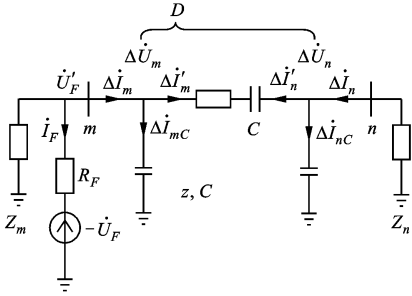


图 7 基于串联补偿下带线路电容的单相线路模型

线路模型中所设固定 K_{sc} 等于 45% 为例,在纵联阻抗的计算过程中,可以得到系统等效阻抗能够满足

$$|Z_n| < Z_{max} = 173 \, \Omega \tag{20}$$

式中: Z_{max} 为最大允许系统阻抗的幅值。

同样,可以在不考虑线路分布电容影响的前提下完成对所发生故障的甄别任务. 由于在式(20)中的计算阻值小于该输电线路的特征阻抗,由此可知当系统只能提供较小的短路功率时,该系统的等效阻抗将可能不满足式(20)的限制要求,造成纵联阻抗的计算值发生超越,如不采取合适的补救措施,将引起相关纵联保护误动. 通常解决的方法有两种:①适当提高相关纵联保护的启动门槛值,以躲过线路电容的影响;②补偿线路电容的影响,具体计算方式如下

$$\Delta I'_m = \Delta I_m - \Delta U_m / Z_{CD}; \Delta I'_n = \Delta I_n - \Delta U_n / Z_{CD} \tag{21}$$

式中: $Z_{CD} = 2 / j\omega C D$ 为线路电容阻抗。

在实际运行中,可以根据在该线路上所实施的最大(实际)串联补偿度,基于所获得的实时的电气状态信号,估测出系统的等效阻抗

$$Z_{1m} \approx -\Delta U_{m\varphi} / \Delta I_{m\varphi}; Z_{1n} \approx -\Delta U_{n\varphi} / \Delta I_{n\varphi} \tag{22}$$

当某侧的计算结果呈现容性阻抗时,说明故障发生在该侧背后的区外,计算所得为对侧系统等效阻抗加线路阻抗的负值,这样可能会过高估计系统阻抗. 根据理论分析和仿真验证可知,在上述状态下补偿与否对于纵联阻抗几乎不产生任何影响,因此完全可以不必理会由于故障发生在特殊的位置上而造成系统阻抗计算异常的现象。

由式(22)估测出系统等效阻抗满足式(20)的要求时,可以在不进行线路电容补偿的条件下完成依据纵联阻抗所进行的故障甄别任务;反之,如果估测出系统等效阻抗接近或者超过式(20)的要求时,必须使用式(21)对线路电容进行补偿。

2.2 采用纵联阻抗的输电线路纵联保护

输电线路纵联保护有 3 个计算项,分别是纵联

保护启动项、系统阻抗计算判别项和故障分量下纵联阻抗计算项. 这 3 个计算项通过逻辑与运算联合,可表示为

$$\left\{ \begin{aligned} &|\Delta I'_{m\varphi} + \Delta I'_{n\varphi}| > I_{set} \\ &\left\{ \begin{aligned} &|Z_{1m}| \geq K_R Z_{max} \\ &|Z_{1n}| \geq K_R Z_{max} \end{aligned} \right\}; \left\{ \begin{aligned} &\Delta I'_m = \Delta I_m - \Delta U_m / Z_{CD} \\ &\Delta I'_n = \Delta I_n - \Delta U_n / Z_{CD} \end{aligned} \right\} \\ &|Z_{op\Delta\varphi}| < |z_1 D| \end{aligned} \right. \tag{23}$$

在此纵联保护中,利用各相电流故障分量和的模数作为启动单元, I_{set} 作为保护动作的最小启动量门槛,应保证能躲过在区外故障时所产生的不平衡电流及其影响, I_{set} 可固定地取为 0.1 A(二次侧电流). 使用线路各端的电气量计算对应的系统阻抗,并根据比较的结果确定是否需要补偿, $K_R = 0.8$ 为阻抗计算保险系数,任何一个系统阻抗不满足式(20)限值要求时,就需进行电容补偿. 当纵联阻抗小于线路阻抗时,必为区内故障,线路两侧保护可同时动作,否则为区外故障,保护稳定不动. 图 8 为纵联保护动作流程图。

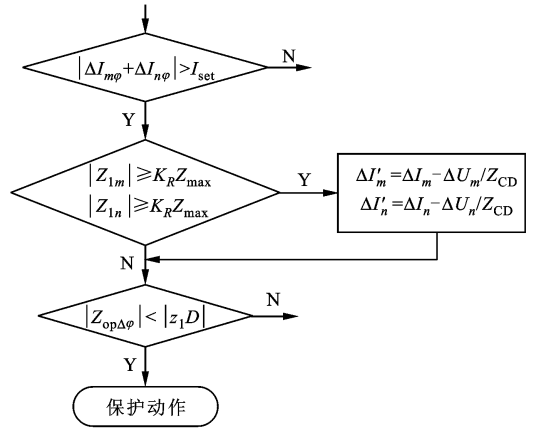


图 8 纵联保护动作流程

3 仿真实验

在 EMTP 仿真系统中,线路采用的是分布参数模型,线路电压等级为 1 000 kV. 电源侧系统参数、输电线路参数、故障电阻等见文献[7]. 在输电线路的 n 侧保护区出口处设置了串联补偿电容器,电容器的容量为 54.6 μF (按照线路全长正序电感的 45%进行固定补偿),图 9 为数字仿真中故障位置设置示意图。

表 1 为单相接地故障的仿真结果,表 2 为相间短路故障的仿真结果,表 3 为相间接地故障的仿真结果,表 4 为三相短路故障的仿真结果. 由于在上述所用线路模型的区外等效系统阻抗都满足式(20)的

要求,因此在仿真结果中分别列出了带电容补偿和不带电容补偿的两组数据进行对比。

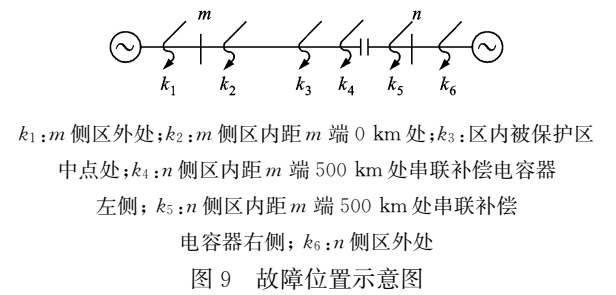


表 5 是表 1 在弱系统下的对比仿真结果. 本文

将上述线路模型两侧的系统等效阻抗幅值放大了 5 倍,这样系统等效阻抗就不能满足式(20)的数值限定要求,需要进行电容补偿。

- 通过查阅仿真计算数据,可以得出以下结论:
- (1)当区内发生故障时,无论是否进行线路电容补偿,所有纵联阻抗的数值都小于线路阻抗;
 - (2)当区外发生故障时,在大多数运行环境下(系统能够提供较大的短路功率),纵联阻抗可以不必进行线路电容补偿;
 - (3)当区外发生故障时,系统又处于较小的运行方式下,纵联阻抗必须进行线路电容补偿。

表 1 单相接地故障时的仿真结果 Ω

故障位置	AG $R_F=0\ \Omega$						AG $R_F=500\ \Omega$					
	带电容补偿			不带电容补偿			带电容补偿			不带电容补偿		
	$Z_{op\Delta a}$	$Z_{op\Delta b}$	$Z_{op\Delta c}$	$Z_{op\Delta a}$	$Z_{op\Delta b}$	$Z_{op\Delta c}$	$Z_{op\Delta a}$	$Z_{op\Delta b}$	$Z_{op\Delta c}$	$Z_{op\Delta a}$	$Z_{op\Delta b}$	$Z_{op\Delta c}$
k_1	1797	586	586	277	260	260	739	330	330	251	322	322
k_2	14*	588	588	14*	260	260	13*	330	330	12*	322	322
k_3	18*	349	349	17*	1 581	1 580	20*	481	481	19*	553	553
k_4	41*	2 710	2 710	39*	513	513	52*	1 528	1 528	50*	796	796
k_5	35*	3 121	3 108	34*	401	401	32*	996	996	30*	386	386
k_6	2 272	3 121	3 108	392	402	402	1 052	996	996	301	386	386

注:表 1~表 5 中带“*”的数据为式(23)判别在该分相的保护区内发生了被甄别出的故障。

表 2 相间短路故障时的仿真结果 Ω

故障位置	BC $R_F=0\ \Omega$						BC $R_F=100\ \Omega$					
	带电容补偿			不带电容补偿			带电容补偿			不带电容补偿		
	$Z_{op\Delta a}$	$Z_{op\Delta b}$	$Z_{op\Delta c}$	$Z_{op\Delta a}$	$Z_{op\Delta b}$	$Z_{op\Delta c}$	$Z_{op\Delta a}$	$Z_{op\Delta b}$	$Z_{op\Delta c}$	$Z_{op\Delta a}$	$Z_{op\Delta b}$	$Z_{op\Delta c}$
k_1	862	1 172	1 106	1 142	311	312	704	896	891	1 132	269	269
k_2	880	20*	20*	1 142	21*	22*	704	20*	20*	1 133	18*	18*
k_3	908	21*	21*	1 236	19*	19*	896	24*	25*	1 196	23*	23*
k_4	893	61*	61*	1 473	58*	58*	1 022	66*	67*	1 439	62*	63*
k_5	1 000	51*	51*	1 101	49*	49*	674	49*	50*	842	52*	52*
k_6	992	2 489	674	1 102	478	479	674	1 814	1 971	842	394	405

表 3 相间接地故障时的仿真结果 Ω

故障位置	BCG $R_F=0\ \Omega$						BCG $R_F=500\ \Omega$					
	带电容补偿			不带电容补偿			带电容补偿			不带电容补偿		
	$Z_{op\Delta a}$	$Z_{op\Delta b}$	$Z_{op\Delta c}$	$Z_{op\Delta a}$	$Z_{op\Delta b}$	$Z_{op\Delta c}$	$Z_{op\Delta a}$	$Z_{op\Delta b}$	$Z_{op\Delta c}$	$Z_{op\Delta a}$	$Z_{op\Delta b}$	$Z_{op\Delta c}$
k_1	720	1 027	1 635	270	318	303	483	854	1 061	221	277	257
k_2	718	15*	15*	270	20*	14*	483	21*	14*	221	20*	14*
k_3	326	32*	19*	628	22*	18*	422	30*	21*	885	25*	20*
k_4	2 541	53*	43*	479	47*	40*	3 050	58*	50*	567	52*	47*
k_5	2 134	51*	36*	394	45*	35*	2 235	51*	35*	370	45*	33*
k_6	2 134	3 063	1 994	394	465	460	2 235	2 427	1 580	370	399	380

表 4 三相短路故障时的仿真结果 Ω

故障 位置	ABC $R_F=0 \Omega$					
	带电容补偿			不带电容补偿		
	$Z_{op\Delta a}$	$Z_{op\Delta b}$	$Z_{op\Delta c}$	$Z_{op\Delta a}$	$Z_{op\Delta b}$	$Z_{op\Delta c}$
k_1	1 203	1 077	1 376	285	280	320
k_2	17 *	22 *	18 *	16 *	20 *	17 *
k_3	22 *	23 *	20 *	20 *	21 *	19 *
k_4	54 *	62 *	55 *	49 *	55 *	49 *
k_5	46 *	51 *	48 *	42 *	45 *	43 *
k_6	1 985	2 292	2 422	441	423	506

表 5 单相接地故障时的仿真结果(弱系统) Ω

故障 位置	AG $R_F=0 \Omega$					
	带电容补偿			不带电容补偿		
	$Z_{op\Delta a}$	$Z_{op\Delta b}$	$Z_{op\Delta c}$	$Z_{op\Delta a}$	$Z_{op\Delta b}$	$Z_{op\Delta c}$
k_1	393	382	380	44 #	46 #	46 #
k_2	62 *	382	380	42 *	50 #	50 #
k_3	77 *	288	287	35 *	40 #	40 #
k_4	120 *	320	320	70 *	52 #	52 #
k_5	102 *	247	248	64 *	60 #	61 #
k_6	480	251	251	66 #	61 #	61 #

注:带“#”的数据表示在不进行线路电容补偿的条件下,其阻抗幅值发生了数值超越,将导致该纵联保护产生误动的可能。

4 结 论

在分析了基本配置输电线路和带串联补偿电容器输电线路运行特性差异的前提下,通过准确地数学推导和合理的物理解释,建立了纵联阻抗的阻值关系变化特征,确立了故障分量下纵联阻抗的故障甄别分界线和输电线路纵联保护的動作流程.根据系统的运行状况及系统等效阻抗的幅值,设定输电线路分布电容的补偿条件和补偿方法,保证了纵联阻抗完全能够适应带各种方式串联补偿下输电线路的运行环境.EMTP 仿真证明了本文纵联保护完全能够胜任实际故障甄别的任务。

参考文献:

[1] 王维洲,彭夕岚,何世恩.成碧 220 kV 可控串补装置的运行与维护[J].电网技术,2007,31(22):50-55.
WANG Weizhou PENG Xilan HE Shi'en. Operation

and maintenance of the first home-made 220 kV TCSC equipment for transmission line from Cheng County to Bikou in Gansu Province [J]. Power System Technology, 2007, 31(22):50-55.

[2] 刘青,王增平,郑振华,等.基于信号复杂度的串补线路单端暂态保护[J].中国电机工程学报,2010,30(13):81-88.
LIU Qing, WANG Zengping, ZHENG Zhenhua, et al. Non-unit transient protection based on signal complexity for series compensated transmission lines [J]. Proceedings of the CSEE, 2010,30(13):81-88.

[3] 李生虎,丁明,张维,等.可控串补潮流控制对距离三段动作裕度的影响[J].电力系统保护与控制,2009,37(3):5-10,26.
LI Shenghu, DING Ming, ZHANG Wei, et al. Power flow control effect with TCSC on the operation margin of zone 3 impedance relays [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(3):5-10,26.

[4] 贺家李,郭征.有串补电容输电线分相电流差动保护的新原理[J].继电器,2005,33(1):1-9.
HE Jiali, GUO Zheng. New principle of segregated phase current differential protection in long distance transmission line with series capacitor compensation [J]. Relay, 2005,33(1):1-9.

[5] 索南加乐,何世恩,栗小华,等.带可控串补和可调电抗器输电线路纵联保护新原理[J].西安交通大学学报,2008,42(10):1259-1263.
SUONAN Jiale, HE Shi'en, SU Xiaohua, et al. New pilot protection principle of transmission line with thyristor controlled series capacitors and thyristor controlled reactor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(10):1259-1263.

[6] 韩彦华,施围.串补输电线路的精确故障定位算法[J].中国电机工程学报,2002,22(5):75-77.
HAN Yanhua, SHI Wei. Accurate fault location algorithm for series compensated transmission lines [J]. Proceedings of the CSEE, 2002,22(5):75-77.

[7] 夏经德,索南加乐,王莉,等.基于纵联阻抗幅值的输电线路纵联保护[J].电力系统保护与控制,2011,39(4):43-51.
XIA Jingde, SUONAN Jiale, WANG Li, et al. A transmission line pilot protection based on the amplitude of the pilot impedance [J]. Power System Protection and Control, 2011,39(4):43-51.

[8] 夏道止.电力系统分析[M].北京:中国电力出版社,2004:12-31,221-226.

(编辑 杜秀杰)