

带可控串补和可调电抗器输电线路 纵联保护新原理

索南加乐¹, 何世恩^{1,2}, 粟小华³, 张健康³, 李怀强³, 李瑞生⁴

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 甘肃省电力公司, 730050, 兰州;
3. 西北电力调度通信中心, 710048, 西安; 4. 许继电气股份有限公司, 461000, 河南许昌)

摘要: 提出了一种适用于带可控串补和可调电抗器输电线路的故障分量综合阻抗纵联线路保护新原理. 利用故障时线路两端故障分量电压相量和与故障分量电流相量和的比值, 来判断线路上是否发生了故障. 在外部故障时, 该比值反映输电线路上的容抗, 其模值较大, 内部故障时, 该比值反映系统电源阻抗和线路阻抗, 其模值相对较小, 据此可以区分线路上的内部和外部故障. 新原理易整定, 本身具有选相能力, 不受电容电流的影响, 不受可控串补电容以及可调电抗器的影响, 耐受过渡电阻能力强. 利用中国电力科学研究院西北 750 kV 系统动模系统参数验证了原理的有效性.

关键词: 输电线路; 纵联保护; 故障分量; 综合阻抗; 可控串补; 可调电抗器

中图分类号: TM77 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)10-1259-05

New Pilot Protection Principle of Transmission Line with Thyristor Controlled Series Capacitors and Thyristor Controlled Reactor

SUONAN Jiale¹, HE Shi'en^{1,2}, SU Xiaohua³, ZHANG Jiankang³, LI Huaiqiang³, LI Ruisheng⁴

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730050, China; 3. Northwest Electric Power Dispatching and Communication Centre, Xi'an 710048, China; 4. Xuji Electric Group, Xuchang, Henan 461000, China)

Abstract: A new pilot protection principle based on fault component integrated impedance of transmission line with thyristor controlled series capacitors (TCSC) and thyristor controlled reactor (TCR) is proposed. The fault component integrated impedance becomes a ratio of the sum of the fault component voltage phasor to the sum of the fault component current phasor of two terminals. It is used to identify if a fault exists on the line. If the fault is out of the line, the calculation value of fault component integrated impedance reflects the line capacitive impedance with a greater amplitude; if the fault is on the line, it reflects the system impedance and line impedance with a relatively smaller amplitude. According to the amplitude of the fault component integrated impedance, the fault location can be distinguished. The new principle relays can be set easily and has phase selection capacity, which gets free from the influence of capacitive current and TCSC and TCR, and resists the higher fault resistance. The effectiveness of the new principle is validated by dynamic simulations of the northwest 750 kV system model.

Keywords: transmission line; pilot protection; fault component; integrated impedance; thyristor controlled series capacitors; thyristor controlled reactor

可控串补是常用的灵活交流输电(FACTS)之一,就是在输电线路中串联可控的电容器,抵消输电线路本身固有的感抗,使整个输电线路的阻抗值减小并实现可控,从而加强两侧电源联系,提高系统的暂态稳定性和输电线路的输送能力,实现线路潮流控制、抑制次同步振荡等功能^[1-3].然而,应用串补电容在提高线路输送能力的同时,也给电力系统带来了一些不利影响.

分析表明^[4],现有的继电保护原理应用于可控串补系统并不完善,在带有可控串补线路区内故障有可能保护拒动,而反向故障可能误动,正向区外故障可能超越^[5].

本文分析了带可控串补和可调电抗器的输电线路区外故障、区内故障时,线路两侧故障分量电压、电流相量和比值的特点,提出了基于故障分量综合阻抗的纵联线路保护新原理,分析了不同串补电容位置、串补补偿度以及可调电抗器补偿度的影响,并利用中国电力科学研究院 750 kV 工程数据,通过 EMTP 建立的仿真模型,验证了新原理的有效性.

1 基于故障分量综合阻抗的纵联保护原理

1.1 故障分量综合阻抗的概念^[6-7]

本节首先以非串补线路的单相模型为例,简单说明基于故障分量综合阻抗的纵联线路保护原理.

图1为双侧电源供电的单相模型在F点发生故障时的故障附加状态图,线路采用Π型等值电路

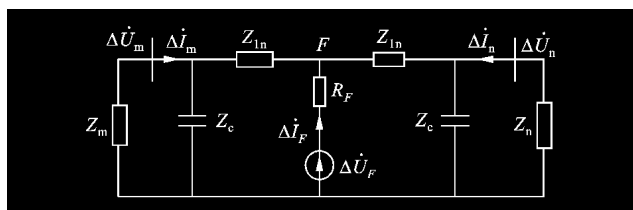


图1 内部故障时的短路附加状态

模型.定义故障分量综合阻抗为

$$Z_{cd} = \Delta \dot{U}_{cd} / \Delta \dot{I}_{cd} \quad (1)$$

式中: $\Delta \dot{U}_{cd} = \Delta \dot{U}_m + \Delta \dot{U}_n$; $\Delta \dot{I}_{cd} = \Delta \dot{I}_m + \Delta \dot{I}_n$.

1.2 串补线路区外故障时故障分量综合阻抗分析

1.2.1 串补电容位于线路中点时 线路上发生区外故障时,差动电流全部由电容电流构成.图2为线路发生区外故障时的故障附加状态网络图.

故障分量差动电流为

$$\begin{aligned} \Delta \dot{I}_{cd} &= \Delta \dot{I}_m + \Delta \dot{I}_n = \Delta \dot{I}_{mc} + \Delta \dot{I}_{nc} = \\ &\Delta \dot{U}_m / Z_c + \Delta \dot{U}_n / Z_c \end{aligned} \quad (2)$$

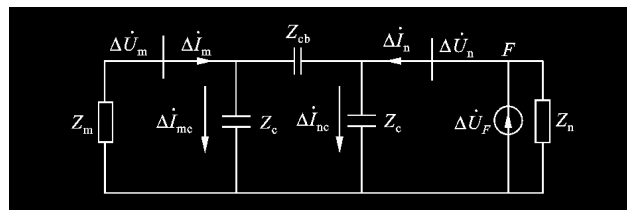


图2 串补位于线路中点时外部故障的短路附加状态

故障分量综合阻抗为

$$Z_{cd} = (\Delta \dot{U}_m + \Delta \dot{U}_n) / \Delta \dot{I}_{cd} = Z_c \quad (3)$$

即线路上发生区外故障时, Z_{cd} 和 Z_c 相等,与线路中的串补电容 Z_{cb} 无关,相对于系统阻抗和线路阻抗,它是一个较大的数值.

1.2.2 串补电容位于母线出口时 当串补电容位于m端母线出口即线路始端时,线路外部故障时的等效电路如图3所示.

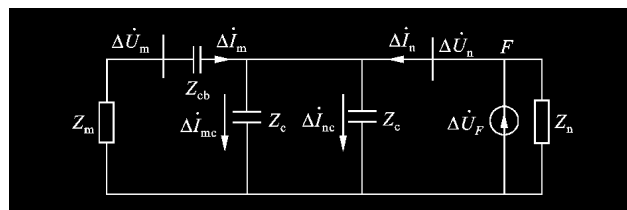


图3 串补位于母线出口时外部故障的短路附加状态

由图3可以看出,当串补位于母线出口时,对于外部故障来说,其故障分量差动电流为

$$\begin{aligned} \Delta \dot{I}_{cd} &= \Delta \dot{I}_m + \Delta \dot{I}_n = \Delta \dot{I}_{mc} + \Delta \dot{I}_{nc} = \\ &(\Delta \dot{U}_m - Z_{cb} \Delta \dot{I}_m) / Z_c + \Delta \dot{U}_n / Z_c = \\ &(\Delta \dot{U}_m + \Delta \dot{U}_{cb}) / Z_c + \Delta \dot{U}_n / Z_c \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $\Delta \dot{U}_{cb}$ 为 $\dot{I}_m$ 在串补电容上形成的压降.若TV装设在母线处,由于采用可控串补技术,其补偿度未知,则无法计算出 $\Delta \dot{U}_{cb}$.假设串补电容最大补偿度为50%,则 $Z_{cb\max} = -0.5Z_l$,因此 $\Delta \dot{U}_{cb\max} = Z_{cb\max} \dot{I}_m = -0.5Z_l \dot{I}_m$,此时的综合阻抗

$$Z'_{cd} = (\Delta \dot{U}'_m + \Delta \dot{U}_n) / \Delta \dot{I}_{cd} = Z_c \quad (5)$$

其中 $\Delta \dot{U}'_m = \Delta \dot{U}_m + \Delta \dot{U}_{cb}$,因此

$$Z_{cd} = (\Delta \dot{U}_m + \Delta \dot{U}_n) / \Delta \dot{I}_{cd} < Z_c \quad (6)$$

此时的故障分量综合阻抗比线路的容抗值要小一些.由于线路本身的压降较小,因此相当于线路压降一半的 $\Delta \dot{U}_{cb}$ 也比较小,其对故障分量综合阻抗造成的影响不是很大,相对于系统阻抗和线路阻抗来说,其模值较大.

由此可见,当串补线路区外发生故障时,若串补位于线路中点,则其故障分量综合阻抗 Z_{cd} 为线路的容抗 Z_c ;若串补位于母线出口时,则其故障分量综合阻抗 Z_{cd} 略小于 Z_c ,与串补电容的大小有关,但仍大于系统阻抗和线路阻抗.

1.3 串补线路区内故障时故障分量综合阻抗分析

区内故障时,故障分量差动电流中的电容分量是很小的,因此在下面分析中,忽略了电容的影响。

1.3.1 串补电容位于线路中点时 当串补线路上发生区内故障时,其故障附加状态网络如图4所示。

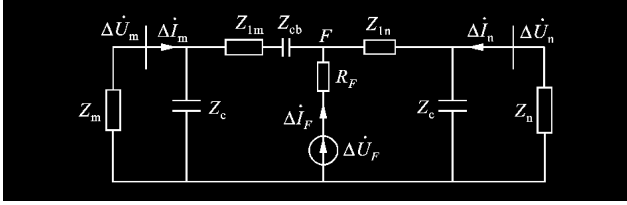


图4 串补位于中点时内部故障的短路附加状态

假设故障点到m端母线的距离占线路全长的百分比为 p ,则 $Z_{lm}=pZ_1$, $Z_{ln}=(1-p)Z_1$ 。若串补电容的补偿度为50%, $Z_{cb}=-0.5Z_1$,则故障点两侧的阻抗 Z_1 、 Z_2 分别如下。

(1)当 $0 \leq p < 0.5$ 时,有

$$Z_1 = Z_m + Z_{lm} = Z_m + pZ_1$$

$$Z_2 = Z_n + Z_{ln} + Z_{cb} = Z_n + (0.5 - p)Z_1$$

(2)当 $0.5 \leq p \leq 1$ 时,有

$$Z_1 = Z_m + Z_{lm} + Z_{cb} = Z_m + (p - 0.5)Z_1$$

$$Z_2 = Z_n + Z_{ln} = Z_n + (1 - p)Z_1$$

则可导出

$$Z_{cd} = -\frac{Z_2 Z_m + Z_1 Z_n}{Z_1 + Z_2} \quad (7)$$

在高压系统中,电源阻抗和线路阻抗的阻抗角都接近 90° ,假设阻抗角近似相等,分析可得

$$Z_{cd} < \min\{2Z_1, 2Z_2\}$$

可见,当串补电容位于线路中点时,线路内部故障时的故障分量综合阻抗反映的是系统阻抗和线路阻抗,与串补电容无关,相比于线路外部故障时的线路容抗,模值很小。

1.3.2 串补电容位于母线出口时 当串补电容 Z_{cb} 位于母线出口时,其内部故障的短路附加状态网络如图5所示,此时忽略线路电容的影响。

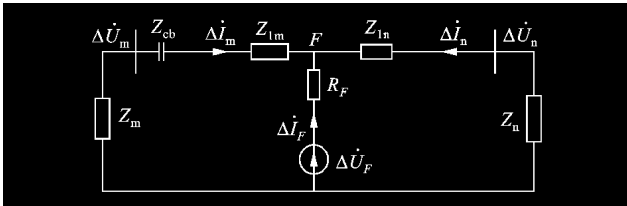


图5 串补位于母线出口时线路内部故障的短路附加状态

假设故障点的位置与m端的距离占线路全长的百分比为 p ,若串补电容的补偿度为50%,则 Z_{cb}

$= -0.5Z_1$,因此故障点两侧的阻抗 Z_1 和 Z_2 分别为 $Z_1 = Z_m + Z_{lm} + Z_{cb} = Z_m + (p - 0.5)Z_1$, $Z_2 = Z_n + Z_{ln} = Z_n + (1 - p)Z_1$,由前面的分析可知

$$Z_{cd} = -\frac{Z_2 Z_m + Z_1 Z_n}{Z_1 + Z_2} \quad (8)$$

可见,当故障点的位置发生变化时, Z_1 、 Z_2 也随之变化,据前面的分析,有

$$Z_{cd} < \min\{2Z_1, 2Z_2\}$$

Z_{cd} 仍反映系统阻抗和线路阻抗,数值较小。

1.4 健全相故障分量综合阻抗的分析

由于互感的作用,故障相的短路电流会在非故障相感应出电流,产生感应电压,影响线路综合测量阻抗。因为序阻抗中已经考虑了互感的影响,因此用对称分量进行分析。

设线路发生A相接地故障,故障点的故障电流为 I_{FA} , C_{1m} 、 C_{1n} 、 C_{2m} 、 C_{2n} 、 C_{0m} 、 C_{0n} 分别为m、n两端的正序、负序和零序电流分配系数,且认为正序和负序电流分配系数相等,仅以B相为例。

根据故障分析,m、n两端保护安装处的B相故障分量电流为

$$\Delta I_{mB} = \frac{\Delta U_{mB}}{Z_c} + \frac{C_{0m} - C_{1m}}{3} I_{FA}$$

$$\Delta I_{nB} = \frac{\Delta U_{nB}}{Z_c} + \frac{C_{0n} - C_{1n}}{3} I_{FA}$$

$$\Delta I_{cdB} = \Delta I_{mB} + \Delta I_{nB}$$

注意到 $C_{1m} + C_{1n} = 1$, $C_{0m} + C_{0n} = 1$,则有

$$Z_{cdB} = \Delta U_{cdB} / \Delta I_{cdB} = Z_c$$

对C相以及其他非对称接地故障的非故障相也有同样结论,即线路上发生单相短路接地和两相短路接地故障时,本线路的健全相 Z_{cd} 和 Z_c 相等,与线路中的串补电容 Z_{cb} 无关,相对于系统阻抗和线路阻抗,它是一个较大的数值。

对于1.3.2节所述串补电容位于母线出口时的情况,结论也与前面一样,即线路上发生非对称故障时,本线路的健全相 Z_{cd} 和 Z_c 相等,与线路中的串补电容 Z_{cb} 无关,相对于系统阻抗和线路阻抗,它也是一个较大的数值。

发生两相相间短路故障时,对于健全相来说, ΔU_m 、 ΔU_n 、 ΔI_m 、 ΔI_n 均为0, Z_{cd} 没有意义,没有必要进行计算。

1.5 基于故障分量综合阻抗的纵联保护判据

从上面的分析可知,当串补线路上发生区外故障时,无论串补电容的位置和大小如何, $|Z_{cd}|$ 在理论上都近似等于 $|Z_c|$ 。发生区内故障时,若串补电容位于线路中点,故障相对应的 $|Z_{cd}|$ 都反映系统电源

阻抗及线路阻抗,远小于 $|Z_c|$.若串补电容位于一端母线出口时,则故障相对应的 $|Z_{cd}|$ 与故障点的位置有关,但其大小仍远小于 $|Z_c|$.因此,可以根据 $|Z_{cd}|$ 的大小来区分线路内部、外部故障,本文据此提出了基于故障分量综合阻抗的纵联保护原理,判据为

$$|Z_{cd}| < Z_{set}; |\Delta I_{cd}| > I_{set} \quad (9)$$

式中: Z_{set} 为阻抗定值,整定原则为

$$Z_{set} = K_{rel} Z_c \quad (10)$$

式中: K_{rel} 为可靠系数,一般可以取0.5~0.6,足以保证区外故障时不误动.

以电压等级为750 kV、长度为500 km的线路为例, $|Z_c|$ 约在900 Ω 左右,可以将 Z_{set} 整定为400~500 Ω .线路较短时, $|Z_c|$ 变大,根据式(10)整定的 Z_{set} 也会较大,此时可以将 Z_{set} 取为500 Ω .

ΔI_{cd} 是故障分量,在系统正常运行时, $|\Delta I_{cd}|$ 理论上为0, I_{set} 为电流定值,一般 I_{set} 可取大于0.08 A(二次值),已有足够的安全性.

1.6 性能分析

1.6.1 并联电抗器投切的影响 若串补线路两端装有并联电抗器,电抗器的阻抗要比系统电源阻抗和线路阻抗大得多.区内故障时,流过并联电抗器的故障分量差动电流很小,因此可以忽略电抗器的影响,即当线路上安装电抗器后,内部故障时,故障相对应的 $|Z_{cd}|$ 与串补电容的位置有关,但基本上都反映系统阻抗和线路阻抗,其值较小.

当装有并联电抗器的串补线路上发生区外故障时,其短路附加状态如图6所示,其中 Z_L 为线路上并联电抗器的阻抗.

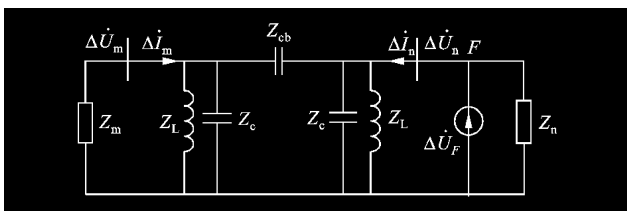


图6 带并联电抗器的串补线路外部故障时的短路附加状态

当线路上发生外部故障时,令 Z_{cd0} 、 Z_{cd1} 分别为并联电抗器退出运行及投入运行时的故障分量综合阻抗.当并联电抗器退出运行时,与前文分析类似,故障分量综合阻抗 $|Z_{cd0}| = |Z_c| = 1/(\omega c)$.当并联电抗器投入运行时,从图6可知

$$\begin{aligned} \Delta I_{cd} &= \Delta I_m + \Delta I_n = \Delta U_m / (Z_c // Z_L) + \Delta U_n / (Z_c // Z_L) \\ Z_{cd1} &= (\Delta U_m + \Delta U_n) / \Delta I_{cd} = Z_c // Z_L \\ Z_{cd1} &= 1 / [j(\omega c - 1/(\omega L))] \end{aligned}$$

输电线路一般采用欠补偿,即当并联电抗器投入运行后,线路上的差动电流依然是电容电流,由此易知 $\omega c > 1/(\omega L)$.所以, $|Z_{cd1}| = 1/(\omega c - 1/(\omega L))$,而 $|Z_{cd0}| = 1/(\omega c)$,显然 $|Z_{cd1}| > |Z_{cd0}|$,即当并联电抗器投入运行后,相对于其未投入时的情况,发生外部故障时,故障分量综合阻抗的模值增大了.

若并联电抗器为可控并联电抗器,则调节其补偿度亦可影响到 $|Z_{cd1}|$ 的大小.若降低补偿度使 Z_L 增大,故障分量综合阻抗 $|Z_{cd1}|$ 会减小,若提高补偿度, $|Z_{cd1}|$ 会增大.

对于装有并联电抗器的线路,如果定值 Z_{set} 按照电抗器退出运行时的情况来整定,则当电抗器退出运行时,该原理可以正确工作.当电抗器投入运行时,区内故障的灵敏度不会受影响,而外部故障时的安全性更高,可见该原理可以顺利应用于带可控补偿电抗器的输电线路.

1.6.2 新判据抗过渡电阻能力强 对于电流差动保护,差动电流门槛要躲开电容电流,整定值相对较高,这降低了它的抗过渡电阻能力.对于基于故障分量综合阻抗的纵联保护原理,从式(7)可知,其动作量 Z_{cd} 仅与系统阻抗和线路阻抗有关,与故障时的过渡电阻无关,判据容许过渡电阻的能力仅与式(9)中的定值 I_{set} 有关. $|\Delta I_{cd}|$ 是故障分量,只在故障时出现,所以式(9)中的 I_{set} 可以取的较低.因此,相较于传统电流差动保护,该原理的抗过渡电阻能力在理论上要强得多.

2 仿真验证

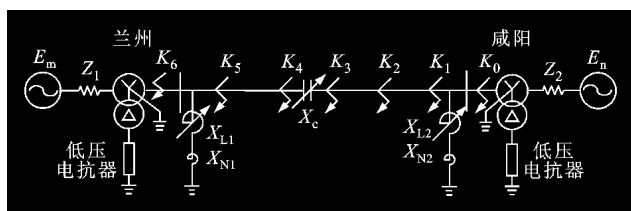
2.1 仿真模型

为了验证上述基于故障分量综合阻抗的差动保护新原理,以西北750 kV工程为原型,根据中国电力科学研究院动模系统参数^[8],用EMTP建立了如图7所示的仿真系统.

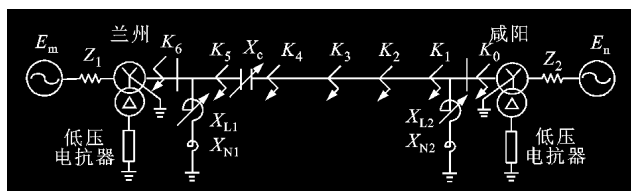
2.2 仿真结果

本文考虑可控串补位于线路中点和首端时的情况.仿真中,分别在 K_0 、 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 、 K_5 、 K_6 6个点模拟各种金属性故障和带过渡电阻接地故障,如图7所示.计算时采用傅里叶滤波算法,采样率为2 kHz. $|\Delta I_{cd}|$ 小于10 A,保护不启动,因此不需给出结果.本文仅给出其中的两个仿真结果,图8为串补位于输电线路中间时的仿真结果,图9为串补位于输电线路首端,且可控串补补偿度为25%,首端并补,补偿度为17.5%时的仿真结果.

由图8、图9可以看出,不管串补装置位于输电

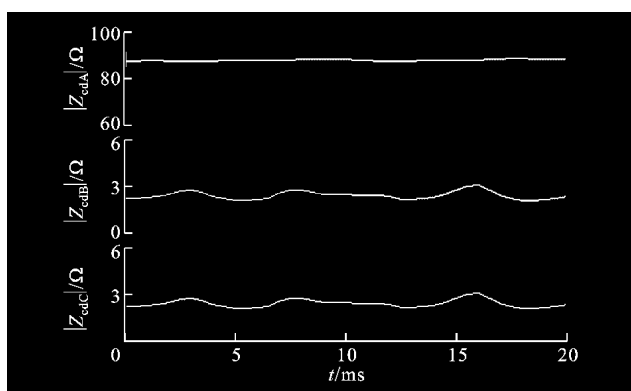
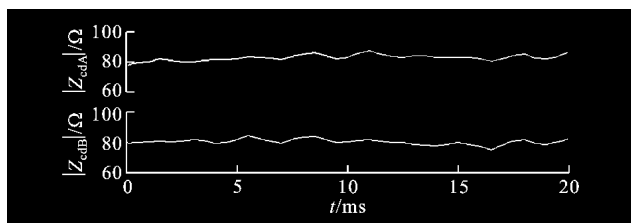


(a)可控串补位于输电线路中间



(b)可控串补位于输电线路首端

图7 输电线路仿真系统

图8 区内 K_1 点A相金属性接地故障时的三相综合阻抗图9 区内 K_3 点AB相间故障时的AB两相综合阻抗

线路的首端还是中间区外故障时,综合阻抗的数值都大于整定值,保护可靠不动作,区内故障时综合阻抗数值均小于整定值,保护可靠动作。

由图9可见,当发生区内故障,且非故障相差流数值小于差流启动整定值时,保护不启动,不计算综合阻抗。串补补偿度和可调电抗器补偿度调整后,保护的灵敏度仍然很高,不影响保护的正确动作。另外,大量的仿真结果表明,基于综合阻抗的输电线路纵联保护新原理,区内故障时,可以耐受 $600\ \Omega$ 以上的过渡电阻。

3 结论

本文提出了适用于带可控串补和可调电抗器的基于故障分量综合阻抗的纵联线路保护新原理,并

利用中国电科院750 kV动模系统参数建立仿真模型进行了验证。理论分析和仿真结果表明,在发生区外故障时,新原理的动作量反映线路容抗,其数量级为千欧。在内部故障时,动作量反映系统阻抗和线路阻抗,其数值不大于 $200\ \Omega$,二者有明显区别。分析表明,发生非对称故障时,健全相的故障分量综合阻抗具有外部故障特征。该原理耐受过渡电阻能力强,不受电容电流、可控串补补偿度调整、可调电抗器补偿度调整的影响,具有较高的灵敏性。仿真验证了新原理的有效性。

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(1):50-55.
WANG Weizhou, PENG Xi'an, HE Shi'en. The operation and maintenance of the 220 kV Chenxian-Bikou TCSC[J]. Power System Technology, 2007,31(1):50-55.
- [2] 中国电力科学研究院. 可控串补的工程应用研究[R]. 北京:中国电力科学研究院,2000.
- [3] 中国电力科学研究院. 可控串补的电力系统分析[R]. 北京:中国电力科学研究院,2000.
- [4] 西北电网公司. 适用于带有可控串补及可控电抗器的750 kV输电线路保护和电抗器保护解决方案研究报告[R]. 西安:西北电网公司,2007.
- [5] 郑玉平. 串补线路继电保护的研究与同杆双回线继电保护及重合闸的研究[D]. 武汉:武汉大学电气工程学院,2004.
- [6] 索南加乐,刘凯,栗小华,等. 输电线路综合阻抗纵联保护新原理[J]. 电力系统自动化,2008,32(3):36-40.
SUONAN Jiale, LIU Kai, SU Xiaohua, et al. Novel transmission line pilot protection based on integrated impedance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008,32(3):36-40.
- [7] 索南加乐,刘凯,张泽宁,等. 基于电阻性差流的差动保护新原理[J]. 电力系统自动化,2007,31(16):45-49.
SUONAN Jiale, LIU Kai, ZHANG Yining, et al. New principle of differential protection based on the resistance component of differential current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007,31(16):45-49.
- [8] 中国电力科学研究院. 750 kV系统继电保护动模试验方案[R]. 北京:中国电力科学研究院,2004.

(编辑 杜秀杰)