

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241033

基于柔性合环装置 SAPST 的配电网自适应电流保护研究

赵耀, 高泽华, 李东东, 何怡阳, 李成志, 许江蛟

(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 使用单芯不对称移相变压器(single-core asymmetric phase shifting transformer, SAPST)进行柔性合环操作可提高传统配电网合环成功率。但 SAPST 本身复杂的结构和本体特性增加了保护装置配置的复杂性, 易引起保护装置拒动、误动, 降低保护灵敏度。针对上述问题, 提出一种含 SAPST 合环网络自适应电流保护方法。首先, 建立含 SAPST 合环网络的等值模型, 分析 SAPST 接入对传统电流保护的影响机理。然后, 基于 SAPST 挡位信息, 利用故障复合序分量关系计算短路电流构建 I 段保护方案, 通过调整分支系数构建 II 段保护方案。同时设计保护方案切换判据以实时评估合环状态, 并制定合环保护方案流程图。最后, 基于 PSCAD/EMTDC 以及 RTlab 半实物仿真平台对所提保护方案进行验证。实验结果表明, 所提方案具有较高的选择性与可靠性, 为 SAPST 的工程应用提供了理论支撑。

关键词: 配电网; 单芯不对称; 移相变压器; 柔性合环; 自适应电流保护

Research on adaptive current protection for distribution networks based on flexible loop closing device SAPST

ZHAO Yao, GAO Zehua, LI Dongdong, HE Yiyang, LI Chengzhi, XU Jiangjiao

(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Flexible loop closing using single-core asymmetric phase shifting transformer (SAPST) can improve the success rate of traditional distribution network loop closures. However, the complex structure and intrinsic characteristics of SAPST increase the complexity of configuring protection devices, which may lead to malfunction or failure of protection actions and reduce protection sensitivity. To address these issues, an adaptive current protection method for loop closing networks employing SAPST is proposed. First, an equivalent model of the loop closing network containing SAPST is established, and the mechanism by which SAPST affects traditional current protection is analyzed. Then, based on the SAPST tap position information, a stage-I protection scheme is developed by calculating the short-circuit current using the fault compound sequence component relationships. A stage-II protection scheme is established by adjusting the branch coefficients. Additionally, switching criteria for protection schemes are designed to evaluate the loop closing status in real-time, and a flowchart for the loop closing protection scheme is proposed. Finally, the proposed protection scheme is verified using PSCAD/EMTDC and the RTlab hardware-in-the-loop simulation platforms. Experimental results demonstrate that the proposed scheme offers high selectivity and reliability, providing theoretical support for the engineering application of SAPST.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52377111).

Key words: distribution network; single-core asymmetric; phase shifting transformer; flexible loop closing; adaptive current protection

0 引言

我国 10 kV 配电网普遍采用“闭环设计、开环

运行”的模式, 随着社会需求增加, 电力负荷密度日益增大, 供电可靠性越来越重要, 在进行网内故障处理、负荷转移和设备检修时, 通过合环操作实现不停电倒负荷逐渐成为主要方式。然而对于某些合环点两侧电压差、相角差较大的场景, 直接合环时产生过大的冲击电流将导致继电保护动作, 对配电网的安全运行产生较大影响。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52377111); 西藏自治区科技项目资助(XZ202401ZY0037); 教育部春晖计划合作科研项目资助(HZKY20220084)

因此,迫切需要一种配电网合环控制装置,满足电力用户对高可靠性供电的追求。现有合环装置中,智能软开关(soft open point, SOP)可有效实现配电网馈线间的柔性合环及精准潮流控制^[1-2],统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)具有控制目标多和响应速度快等优点,同时兼具无功补偿的能力^[3],但价格昂贵、占地面积大、损耗高等原因限制了 SOP 和 UPFC 在配电网的推广应用。晶闸管控制移相变压器(thyristor controlled phase shifting transformer, TCPST)和电磁式旋转潮流控制器(rotary power flow controller, RPFC)的功能齐全、控制简单、无谐波且故障承受能力高,能满足多数情况下系统对柔性合环的要求,但对于一般城市配电网合环相角差相对较小的情况, TCPST 和 RPFC 的性价比比较低。因此,单芯不对称移相变压器(single-core asymmetric phase shifting transformer, SAPST)由于其自身的电压补偿特性与相位调节特性逐渐被应用于合环调节, SAPST 可以通过改变分接头调节输出电压和电流的幅值与相位,从而实现柔性合环^[4]。且 SAPST 具有结构更简单、体积更小、成本更低的优点,实用性强。然而 SAPST 阻抗和输出电压电流随自身挡位变化而变化,且配电网拓扑会因 SAPST 接入而发生变化,这些都会对继电保护装置的判断产生影响,辐射状配电网原有的保护方案无法确保动作的可靠性与灵敏性。因此需要重新制定保护方案以确保配电网可靠合环。

目前国内外对于含移相变压器配电网保护的研究,主要集中于分析双芯对称移相器或单芯三角型移相器作为潮流控制装置对电网的影响,并对保护方案做出改进。文献[5]分析了对称双芯移相器接入对距离保护的影响机理,利用对称分量反变换和同步相量测量技术,提出了基于相角补偿和相量测量单元的自适应距离保护。文献[6]研究了三角-六边形移相器对距离保护的影响,提出基于移相器等效电路的方法来修正计算阻抗值。文献[7]基于双芯对称移相变压器的三序等效电路分析了其对距离保护的影响和测量阻抗的变化特性,通过实时读取移相变压器挡位信息对保护所需要的电压电流值进行相位和幅值补偿,提出了含移相变压器线路的自适应改进距离保护方案。文献[8]设计并提出了含阻尼/旁路复合模块的移相变压器故障穿越控制方案,该方案不受移相变压器挡位的影响,可提高距离保护的可靠性。文献[9]分别研究了常规线路纵联电流差动保护中对称双芯移相器对稳态分相电流差动保护、零序电流差动保护、分相突变量电流差动保护的影响,并提出改进措施。文献[10]采用纵联比较

原理进行移相变压器的继电保护设计,结合零序故障分量的方向判别元件,构成了基于虚拟阻抗的对称双芯移相变压器的纵联保护。文献[11]和文献[12]分别对单芯不对称移相变压器和单芯对称移相器的差动保护进行研究,通过引入变换矩阵在线补偿移相器的相角偏移,提出了新的差动保护方案。文献[13]分别从对称双芯移相变压器对电源侧和负荷侧的影响两个方面分析了移相器对纵联电流差动保护的影响,并从电流互感器的角度提出了改进方案。合环过程中配电网拓扑将发生变化且合环网络电流大小受合环点两侧相角差影响,以上保护方案无法直接应用于移相变压器作为配电网合环装置的情况。

针对以上不足,本文对 SAPST 作为合环装置接入配电网后的保护问题进行分析。首先,建立 SAPST 及合环网络的等值模型,分析 SAPST 接入后对电流保护的影响。然后,根据故障复合序分量关系,求解在不同位置发生两相短路、三相短路故障时各保护安装处的正序电流,提出改进的自适应 I、II 段电流保护方案及其切换判据。最后,通过 PSCAD/EMTDC 数值仿真以及实际算例分析,在半实物仿真平台上验证所提保护方案的有效性和可行性。

1 SAPST 等值模型及控制策略

SAPST 结构及相量图分别如图 1 和图 2 所示。图 1 中: $U_{S\phi}$ 为 ϕ 相的输入侧电压, $\phi = A, B, C$; $U_{L\phi}$ 为 ϕ 相的输出侧电压; $I_{S\phi}$ 为 ϕ 相的输入侧电流; $I_{L\phi}$ 为 ϕ 相的输出侧电流。SAPST 内部 A、B、C 三相变压器一次侧为三角形连接的励磁绕组; $I_{1\phi}$ 为流过一次侧绕组的电流; 二次侧为调压绕组; $I_{2\phi}$ 为流过二次侧绕组的电流; 每个调压绕组上装有方向开关和分接开关^[14]。以 A 相为例,调节方向开关和分接开关,可以在 U_{SA} 的基础上增加可变的正交电压 ΔU_A ,从而使输出侧电压的幅值和相位发生改变^[15-16]。

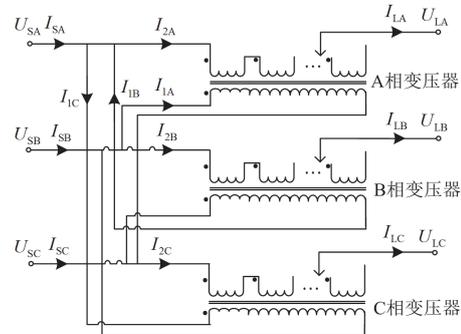


图 1 SAPST 结构图

Fig. 1 Structural diagram of SAPST

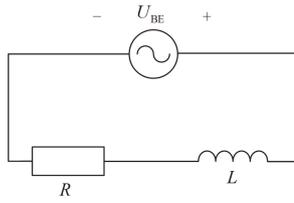


图 6 合环网络单相戴维南等值电路

Fig. 6 Thévenin equivalent circuit of phase A in loop-closing network

$$\sqrt{2}U_{BE} \sin(\omega t + \phi) = Ri_t + L \frac{di_t}{dt} \quad (4)$$

式中: ϕ 为初相角; i_t 为 t 时刻合环支路的电流瞬时值。

对上述微分方程进行求解即可得到合环冲击电流解析式, 如式(5)所示。

$$i_M = e^{-\frac{R}{L}t} \left\{ -\frac{\sqrt{2}U_{BE}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin \left[\phi - \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right) \right] \right\} + \frac{\sqrt{2}U_{BE}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin \left[\omega t + \phi - \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right) \right] \quad (5)$$

理想条件下, SAPST 输出的补偿电压与合环前合环点两侧的电压相量差恰好完全补偿, 即经补偿后的 $U_{BE} = 0$, 因此经过 SAPST 补偿后, 冲击电流 i_M 近似为 0, 不会对继电保护产生影响。

2.1.2 阶段一稳态电流影响分析

阶段一的稳态过程相当于 SAPST 在环运行。根据叠加定理, 合环后的稳态电流可由合环前流过两条馈线的电流与循环电流叠加而成, 其中循环电流为去除电源及负荷的无源网络中由合环点两侧的电电压相量差引起的稳态环流。循环电流 I_C 的表达式为

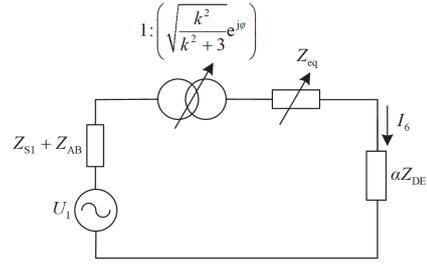
$$I_C = \frac{U_{BE}}{Z_\Sigma} \quad (6)$$

式中: Z_Σ 为环网等值阻抗。

在理想条件下, 经 SAPST 补偿后的 $U_{BE} = 0$, 即 $I_C = 0$, 因此 SAPST 合环网络合环前后稳态电流相近, 不会对继电保护产生影响。

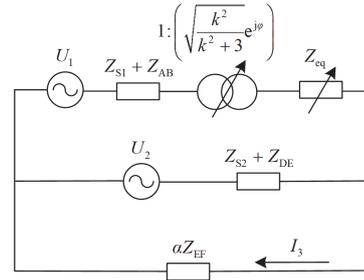
2.1.3 阶段一故障电流影响分析

阶段一发生故障的情况如图 5 所示, 当 SAPST 接入点上游发生故障, 保护装置 R1、R4 检测到的短路电流基本不受影响, 而保护装置 R5、R6 检测到的短路电流会受到移相角大小的影响。当 f_4 发生故障时, 等效电路如图 7 所示。图 7 中: U_1 为电源 E_1 的电压; α 为故障点到保护装置的距离占比系数; I_6 为 R6 检测到的故障电流; Z_{AB} 、 Z_{DE} 分别为线路 AB、DE 的阻抗。 I_6 的表达式如式(7)所示。

图 7 阶段一 f_4 故障等效电路图Fig. 7 Equivalent circuit diagram of stage 1 f_4 fault

$$I_6 = \frac{U_1}{Z_{S1} + Z_{AB} + \sqrt{\frac{k^2}{k^2 + 3}} e^{j\phi} (Z_{eq} + \alpha Z_{DE})} \quad (7)$$

可知随着移相角 ϕ 的增大, I_6 会逐渐减小。当 SAPST 接入点下游发生故障时, 保护装置检测到的短路电流来自两个电源, 远超过合环前的短路电流, 可能导致保护误动。同时, SAPST 的挡位也会导致保护装置检测电流发生变化。以 f_3 故障为例, 等效电路如图 8 所示。图 8 中: U_2 为电源 E_2 的电压; Z_{EF} 为线路 EF 的阻抗。

图 8 阶段一 f_3 故障等效电路图Fig. 8 Equivalent circuit diagram of stage 1 f_3 fault

此时 R3 检测到的电流 I_3 为

$$I_3 = \frac{U_1}{Z_{S1} + Z_{AB} + \sqrt{\frac{k^2}{k^2 + 3}} e^{j\phi} (Z_{eq} + \alpha Z_{EF})} + \frac{U_2}{Z_{S2} + Z_{DE} + \alpha Z_{EF}} \quad (8)$$

随着移相角 ϕ 的增大, I_3 将逐渐降低, 但仍远超过于合环前的短路电流。因此有必要对 R2、R3 与 R5、R6 电流整定值分别重新进行整定。

2.2 阶段二分析

阶段二中可能导致电流变化的原因主要为挡位调节。以挡位由 0 调节至最高挡位的极端情况为例, 此时的冲击电流相当于在合环点两端电压相位相同的情况下, 将 SAPST 挡位调节至最高挡并进行合环时的冲击电流。调节不同挡位跨度导致的冲击电流

如表 1 所示。

表 1 挡位调节导致的冲击电流与稳态电流
Table 1 Surge current and steady-state current caused by gear adjustment

挡位调节	调节 跨度/挡	合环线路冲击 电流/kA	合环线路稳态 电流/kA
0—3 挡	3	0.119	0.099
3—9 挡	6	0.220	0.163
6—15 挡	9	0.334	0.244
0—12 挡	12	0.412	0.310
0—15 挡	15	0.533	0.396

根据图 6 所示合环网络 A 相等值电路，列写微分方程，可得挡位变化导致的最大冲击电流 $i_{t\max}$ 为

$$i_{t\max} = e^{-\frac{R}{L}t} \left\{ -\frac{\sqrt{2}\Delta U_{A\max}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin \left[\phi - \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right) \right] \right\} + \frac{\sqrt{2}\Delta U_{A\max}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin \left[\omega t + \phi - \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right) \right] \quad (9)$$

$$\Delta U_{A\max} = U_{LA\max} - U_{SA} = \left(\sqrt{1 + \frac{3}{k_{\min}^2}} e^{j\phi} - 1 \right) U_s \quad (10)$$

式中： $\Delta U_{A\max}$ 为 SAPST 挡位最大时输出的补偿电压； $U_{LA\max}$ 为挡位最大时移相器输出侧电压； k_{\min} 为挡位最大时移相器实际变比。

由式(9)和式(10)可知，随着挡位跨度的增加， $i_{t\max}$ 逐渐增大，可能超过保护定值而导致保护误动。因此在操作过程中，应减小每次调节时挡位的跨度，即可避免造成保护误动。

2.3 阶段三分析

阶段三发生故障的情况如图 9 所示，SAPST 输入侧上游发生故障时，保护装置检测到的短路电流不受移相器的影响。

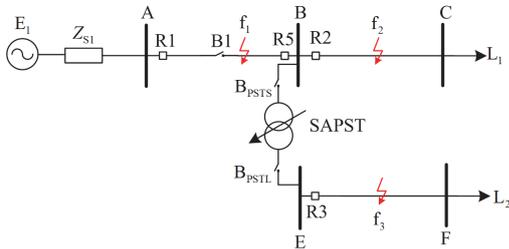


图 9 阶段三发生故障位置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of fault location in stage 3

当 SAPST 接入点下游发生故障时，保护装置检测到的故障电流会受到移相角的影响。以 f_3 故障为例，故障等效电路如图 10 所示，其中 Z_{BC} 为线路 BC 的阻抗。

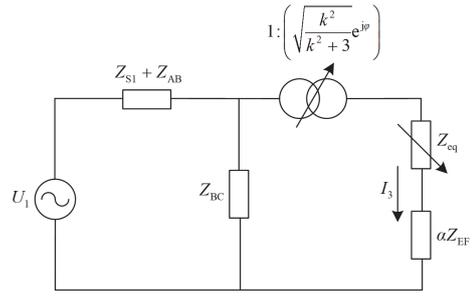


图 10 阶段三 f_3 故障等效电路图

Fig. 10 Equivalent circuit diagram of stage 3 f_3 fault

此时 R3 检测到的电流 I_3 为

$$I_3 = \frac{U_1 Z_{BC}}{Z_{S1} + Z_{AB} + Z_{BC} + \left((Z_{S1} + Z_{AB}) // Z_{BC} \right) + \sqrt{\frac{k^2}{k^2 + 3}} e^{j\phi} (Z_{eq} + \alpha Z_{EF})} \quad (11)$$

随着移相角的增加，R3 处的短路电流将减小。因此有必要对 R2、R3 制定新的保护方案。

2.4 SAPST 合环仿真分析

以上海市某地区 10 kV 典型合环场景为例，在 PSCAD 中搭建 SAPST 合环网络仿真模型，两条馈线最大相相差为 15°，SAPST 设置 15 挡，各相变压器容量为 2 MVA，系统基准电压为 10.5 kV，线路阻抗参数如表 2 所示，线路功率参数如表 3 所示。

表 2 线路阻抗参数

Table 2 Line impedance parameters

线路	单位阻抗/(Ω/km)	长度/km
AB	0.17 + j0.38	5.5
BC	0.17 + j0.38	5.5
DE	0.17 + j0.38	5.6
EF	0.17 + j0.38	5.6

表 3 线路功率参数

Table 3 Line power parameters

功率分布	功率/MVA
线路 AB 流过功率	1.5 + j0.5
线路 DE 流过功率	1.4 + j0.3
母线 A 注入功率	7.1 - j1.4
母线 D 注入功率	9.1 + j1.4

设置 0.5 s 时 B_{PSTS} 闭合，SAPST 输入端接入合环网络，1 s 时调节 SAPST 对应挡位，闭合 B_{PSTL} 实现合环，1.5 s 时发生故障，2 s 时 B2 断开，E2 电源退出。以 f_3 处发生 AC 两相相间短路故障为例，R3 处故障电流随合环前相相差变化的情况如图 11 所示。由图 11 可知，1 s 合环时，经过 SAPST 补偿，合环前后电流相近，且冲击电流为 0。合环后及 B2

断开后的稳态过程中发生故障时, 保护安装处检测到的故障电流将随合环前合环点两侧相角差的不同而变化。原有电流保护方案定值固定, 无法适应 SAPST 合环网络, 因此有必要制定新的保护方案。

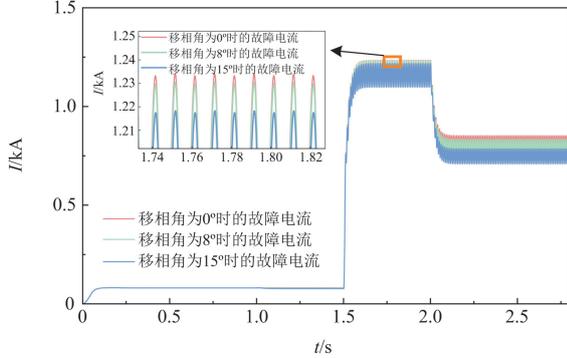


图 11 故障电流随合环前相角差变化情况

Fig. 11 Variation of fault current with phase angle difference before loop closing

3 SAPST 合环网络的自适应保护方案

经过 SAPST 合环后, 配电网系统结构会发生变化, 线路保护装置无法提供原有的保护效果。因此需要分别对合环各个阶段及各个位置发生两相短路、三相短路的情况进行分析, 以此对保护方案进行改进^[24]。

3.1 改进电流速断保护方案

3.1.1 f_1 、 f_4 处发生两相短路故障

在合环稳态运行时, 当 f_1 、 f_4 处发生短路故障, 故障电流由合环前的单向流动变为双向, 因此需要在 AB、DE 线路末端设置含方向元件的继电器保护装置 R5、R6。只有合环后, R5、R6 处才能检测到正向电流, 所以 R5、R6 的整定方案应根据系统合环后的复合序网图求解保护安装处的正序电流制定。

SAPST 的负序网络模型与正序网络模型的等值电路图基本相同, 由于负序三相相序与正序相反, 故负序模型中等效的理想变压器复数变比为正序的共轭^[5]。 f_1 发生两相短路故障的复合序网图如图 12 所示。图 12 中: U_{s1} 、 I_{s1} 分别为 R5 处检测到的正序电压、正序电流; $K_2 = \sqrt{(k^2 + 3)/k^2}$ 。

令 $A_5 = Z_{S1} + \alpha Z_{AB}$; $B_5 = (1 - \alpha)Z_{AB}$; $C_5 = Z_{eq} + Z_{S2} + Z_{DE}$; $K_1 = 1/K_2$ 。由图 12 可知, 当 f_1 发生故障时, R5 处的正序电流为

$$I_{s1} = -\frac{E_5 U_1 - (2E_5 + A_5)U_2 + Z_5 U_s}{2D_5 E_5 + A_5 D_5 + A_5 E_5} \quad (12)$$

式中: $E_5 = K_1 e^{-j\varphi} C_5 + B_5$; $Z_5 = 2E_5 K_2 (e^{j\varphi} - 1) + A_5 K_2 (e^{j\varphi} - e^{-j\varphi})$; $D_5 = K_1 e^{j\varphi} C_5 + B_5$ 。

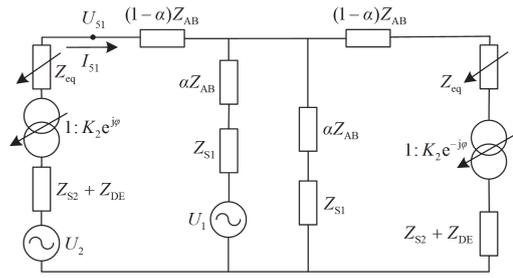


图 12 f_1 两相短路故障复合序网图

Fig. 12 Composite sequence network for f_1 two-phase fault

令故障发生在线路末端, 即 $\alpha = 0$, 得到在 f_1 两相短路故障时 R5 的 I 段电流保护整定值 $I_{5set(2)}^I$ 为

$$I_{5set(2)}^I = K_{rel}^I I_{s1} \quad (13)$$

式中: K_{rel}^I 为 I 段保护可靠系数。

当 f_4 发生两相短路故障的复合序网图如图 13 所示。图 13 中: U_{61} 、 I_{61} 分别为 R6 处检测到的正序电压、正序电流。

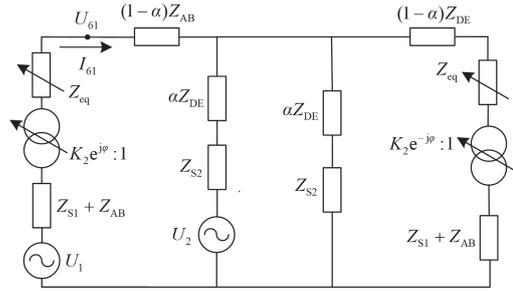


图 13 f_4 两相短路故障复合序网图

Fig. 13 Composite sequence network for f_4 two-phase fault

令 $A_6 = Z_{S1} + Z_{AB}$; $B_6 = Z_{eq} + (1 - \alpha)Z_{DE}$; $C_6 = Z_{S2} + \alpha Z_{DE}$ 。由图 13 可知, 当 f_4 发生故障时, R6 处的正序电流为

$$I_{61} = \frac{G_6 K_1 U_1 + K_1 (C_6 E_6 - G_6) U_2 - Z_6 U_s}{F_6 G_6 + C_6^2 D_6 K_1} \quad (14)$$

式中: $E_6 = K_1 C_6 + D_6$; $Z_6 = C_6^2 K_1^2 (1 - K_2 e^{-j\varphi}) - K_1 G_6 (1 - K_2 e^{j\varphi})$; $G_6 = D_6 E_6 + C_6 D_6$; $F_6 = (Z_{S1} + Z_{AB}) e^{-j\varphi} / K_1 + B_6$; $D_6 = K_1 B_6 + A_6 e^{j\varphi}$ 。

令故障发生在线路末端, 即 $\alpha = 0$, 得到在 f_4 两相短路故障时 R6 的 I 段电流保护整定值 $I_{6set(2)}^I$ 如式(15)所示。

$$I_{6set(2)}^I = K_{rel}^I I_{61} \quad (15)$$

3.1.2 阶段一 f_2 、 f_3 处发生两相短路故障

f_2 发生两相短路故障的复合序网图如图 14 所示。其中 U_{21} 、 I_{21} 分别为 R6 处检测到的正序电压、正

序电流。

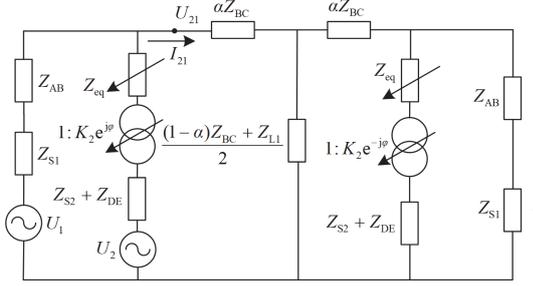


图 14 f_2 两相短路故障复合序网图

Fig. 14 Composite sequence network for f_2 two-phase fault

令 $A_2 = Z_{S1} + Z_{AB}$; $B_2 = Z_{eq}$; $C_2 = Z_{S2} + Z_{DE}$;

$$D_2 = \alpha Z_{BC}; E_2 = \frac{(1-\alpha)Z_{BC} + Z_{L1}}{2}; Y_{21} = K_2 e^{-j\varphi} - 1;$$

$Y_{22} = K_2 e^{j\varphi} - 1$ 。由图 14 可知, 当 f_2 发生两相短路故障时, R2 处的正序电流为

$$I_{21} = \frac{A_2 X_{22} U_2 + X_{22} X_{23} U_1 - Z_2 U_S}{A_2 X_{22} X_{23} + (E_2 X_{21} + D_2 X_{22})(X_{23} + A_2)} \quad (16)$$

式中: $X_{21} = (K_1 e^{-j\varphi} C_2 + B_2)(A_2 + D_2) + A_2 D_2$; $X_{22} = (K_1 e^{-j\varphi} C_2 + B_2 + A_2)E_2 + X_{21}$; $X_{23} = K_1 e^{j\varphi} C_2 + B_2$;
 $Z_2 = Y_{22} X_{22}(X_{23} + A_2) - A_2 E_2 Y_{21}(X_{23} + A_2) - X_{22} X_{23} Y_{22}$ 。

令故障发生在线路末端, 即 $\alpha = 1$, 得到在 f_2 两相短路故障时 R2 的 I 段电流保护整定值 $I_{2set(2)}^I$ 为

$$I_{2set(2)}^I = K_{rel}^I I_{21} \quad (17)$$

f_3 发生两相短路故障的复合序网如图 15 所示。其中 U_{31} 、 I_{31} 分别为 R6 处检测到的正序电压、正序电流。

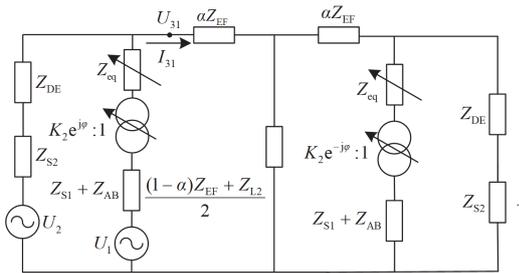


图 15 f_3 两相短路故障复合序网图

Fig. 15 Composite sequence network for f_3 two-phase fault

令 $A_3 = Z_{S2} + Z_{DE}$; $B_3 = Z_{eq}$; $C_3 = Z_{S1} + Z_{AB}$;

$$D_3 = \alpha Z_{EF}; E_3 = \frac{(1-\alpha)Z_{EF} + Z_{L2}}{2}; Y_{31} = 1 - K_2 e^{-j\varphi};$$

$Y_{32} = K_2 e^{j\varphi} - 1$ 。由图 15 可知, 当 f_3 发生两相短路故障时, R3 处的正序电流为

$$I_{31} = \frac{A_3 X_{33} U_1 + X_{32} X_{33} U_2 - Z_3 U_S}{A_3 X_{32} X_{33} + (D_3 X_{33} - E_3 X_{31})(X_{32} + A_3)} \quad (18)$$

式中: $X_{31} = (e^{j\varphi} C_3 / K_1 + B_3)(A_3 + D_3) + A_3 D_3$; $X_{32} = e^{-j\varphi} C_3 / K_1 + B_3$; $X_{33} = A_3 (e^{j\varphi} C_3 / K_1 + B_3 + E_3) + X_{32}$;
 $Z_3 = Y_{32} X_{33}(X_{32} + A_3) - A_3 E_3 Y_{31}(X_{32} + A_3) + X_{32} X_{33} Y_{32}$ 。

令故障发生在线路末端, 即 $\alpha = 1$, 得到在 f_3 两相短路故障时 R3 的 I 段电流保护整定值 $I_{3set(2)}^I$, 如式(19)所示。

$$I_{3set(2)}^I = K_{rel}^I I_{31} \quad (19)$$

3.1.3 阶段三 f_2 、 f_3 处发生两相短路故障

当阶段三中 f_2 发生两相短路故障时, 流过 SAPST 的电流较小, 可以忽略其影响, R2 的 I 段保护仍可使用原整定值。 f_3 发生两相短路故障时, R3 的 I 段保护同式(19), 只需将 DE 线路相关系数置 0。

3.1.4 发生三相短路故障

当发生三相短路故障时, 故障点所在线路保护安装处的正序电流与正序电压关系满足式(20)所示关系。

$$U_{X1} = I_{X1} Z_D \quad (20)$$

式中: U_{X1} 、 I_{X1} 分别为任一故障点所在线路保护安装处的正序电压、正序电流; Z_D 为保护安装处到故障点之间的正序阻抗。正序电流整定值 $I_{Xset(2)}^I$ 如式(21)所示。

$$I_{Xset(2)}^I = \left| \frac{K_{rel}^I U_{X1}}{Z_D} \right| \quad (21)$$

3.2 改进限时电流速断保护方案

SAPST 的挡位应根据合环点两侧相角差进行调节, 导致流过 SAPST 的电流不是固定值, 分支系数也会随之发生变化, 因此 R1 和 R4 处的 II 段保护定值需要重新整定。

以 R4 为例, 当 f_2 发生故障时, R4 的 II 段保护整定值 I_{4set}^{II} 为

$$I_{4set}^{II} = \frac{K_{rel}^{II}}{K_{b1}} I_{2set}^I \quad (22)$$

式中: K_{rel}^{II} 为 II 段保护可靠系数; K_{b1} 为 f_2 发生故障时的分支系数; I_{2set}^I 为 R2 的 I 段保护整定值。

K_{b1} 的表达式为

$$K_{b1} = \frac{I_L}{I_{DE}} = K_2 e^{-j\varphi} \left(1 + \frac{K_1 e^{j\varphi} (Z_{eq} + Z_{S2} + Z_{DE})}{Z_{S1} + Z_{AB}} \right) \quad (23)$$

式中: I_{DE} 为流过线路 DE 的电流。

同时, R4 的 II 段保护定值还需要与 R3 的 I 段保护相配合, 此时 R4 的 II 段保护整定值 I_{4set}^{II} 为

$$I_{4set}^{II} = \frac{K_{rel}^{II}}{K_{b2}} I_{3set}^I \quad (24)$$

式中: K_{b2} 为 f_3 发生故障时的分支系数; I_{3set}^I 为 R3 的 I 段保护整定值。

K_{b2} 的表达式为

$$K_{b2} = \frac{I_{EF}}{I_{DE}} = 1 + \frac{Z_{S2} + Z_{DE}}{K_2 e^{-j\varphi} (Z_{S1} + Z_{AB}) + Z_{eq}} \quad (25)$$

式中: I_{EF} 为流过线路路 EF 的电流。

R4 的 II 段保护整定值应取式(22)和式(24)中的较大值, 令 $Z_A = Z_{S1} + Z_{AB}$, 因此在合环网络中 R4 的 II 段整定值 I_{4set}^{II} 为

$$I_{4set}^{II} = \begin{cases} \frac{K_{rel}^{II}}{K_{b1}} I_{2set}^I, Z_{eq} \leq (1 - K_1 e^{-j\varphi}) Z_A \\ \frac{K_{rel}^{II}}{K_{b2}} I_{3set}^I, Z_{eq} > (1 - K_1 e^{-j\varphi}) Z_A \end{cases} \quad (26)$$

II 段保护需要有足够的灵敏系数来保证保护间的配合, R4 的灵敏系数 K_{sen} 如式(27)所示。

$$K_{sen} = \begin{cases} \frac{I_{K.E.min} K_{b1}}{I_{2set}^I K_{rel}^{II}}, Z_{eq} \leq (1 - K_1 e^{-j\varphi}) Z_A \\ \frac{I_{K.E.min} K_{b2}}{I_{3set}^I K_{rel}^{II}}, Z_{eq} > (1 - K_1 e^{-j\varphi}) Z_A \end{cases} \quad (27)$$

式中: $I_{k.E.min}$ 为合环网络最小运行方式下线路 DE 末端发生两相短路故障时 R4 的短路电流。

3.3 保护方案切换判据

随着合环过程的进行, 各保护整定值需要不断更新以保证保护方案的可靠性, 具体流程如图 16 所示。

未合环时, 两电源分列运行, SAPST 线路没有电流流过, 以此电流特征构造保护切换判据, 当式(28)成立时, 判断配电网处于未合环运行状态。

$$I_L = 0 \cap I_4 \neq 0 \quad (28)$$

式中: I_4 为 R4 处电流。

阶段一中 SAPST 线路电流始终不为 0, 构造判据如式(29)所示, 此时判断合环网络处于阶段一。

$$I_L \neq 0 \cap I_4 \neq 0 \cap |I_L - I_4| > \varepsilon \quad (29)$$

式中: ε 为任意趋近于 0 的正数。

阶段三中 E_2 电源退出, 构造判据如式(30)所示, 此时判断合环网络处于阶段三。

$$I_4 = 0 \cap |I_L - I_6| \leq \varepsilon \quad (30)$$

4 仿真验证

基于 PSCAD 仿真平台搭建 SAPST 合环网络仿真模型, 系统参数设置同 2.4 节。调节两电源的相角、线路故障位置、故障类型、SAPST 挡位等对保护方案进行验证。

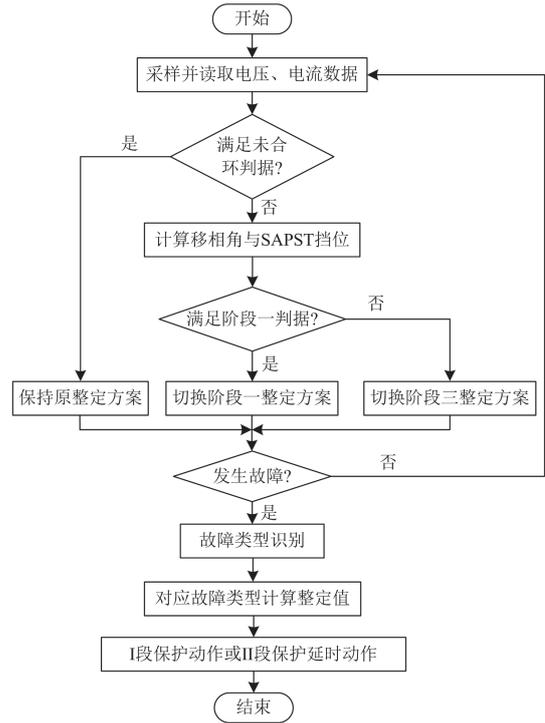


图 16 合环网络保护方案流程图

Fig. 16 Protection scheme flowchart for ring network

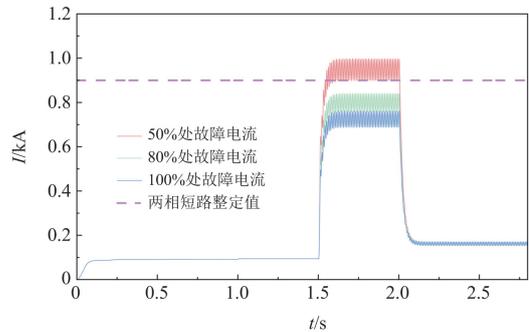
4.1 R5 自适应整定验证

在线路 AB 不同位置(50%、80%、100%)处发生两相短路故障和三相短路故障, 整定结果如图 17 所示。

由图 17 可知, 当线路 50%处发生两相短路故障和三相短路故障时, R5 检测到的故障电流大于 I 段整定值, R5 能够切除故障, 线路 80%处发生两相短路故障时, I 段保护整定值为 0.8997 kA, 故障电流为 0.7987 kA, 此时 R5 不动作, 需要靠 II 段保护切除; 当发生三相短路故障时, I 段保护整定值为 1.2531 kA, 故障电流为 1.2337 kA, R5 不动作, 需要靠 II 段保护切除, I 段保护范围为 78%。线路 100%处故障分析同上。

4.2 R2 自适应整定验证

在线路 BC 不同位置(50%、80%、100%)处发生两相短路故障和三相短路故障, 整定结果如图 18 所示。



(a) 发生两相短路故障

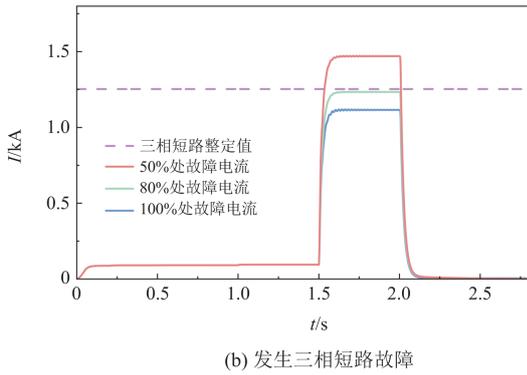


图 17 线路 AB 不同位置发生故障的整定结果
Fig. 17 Setting results for faults at different positions on line AB

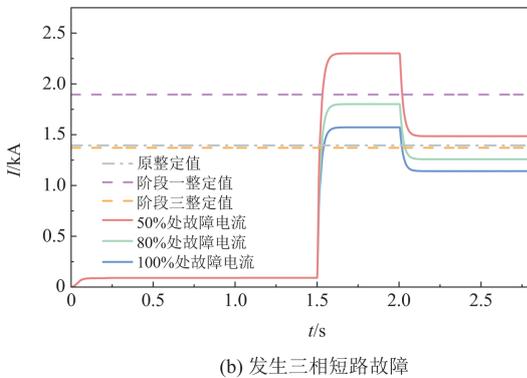
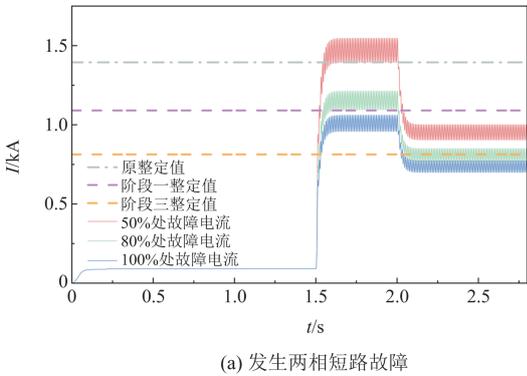


图 18 线路 BC 不同位置发生故障的整定结果
Fig. 18 Setting results for faults at different positions on line BC

当发生两相短路故障时，故障电流大于新整定值，R2 能够可靠动作，保护范围为 87%；线路 100% 处发生故障时，故障电流小于新整定值，R2 不动作，需要靠 II 段保护完成故障切除。阶段三中 50% 处与 80% 处 R2 能够可靠动作，保护范围约为 80%。发生三相短路时，阶段一和阶段三的保护范围分别约为 72% 和 65%。与原整定值相比，两相短路的新整定值在阶段一和阶段三中保护范围均上升；三相短

路在阶段一中原保护范围超过本段线路，新整定值的保护范围有所下降，使 I 段保护的保护区维持在本段线路内，阶段三的保护范围基本维持不变。

经仿真验证，所提 I 段保护方案在线路发生两相短路、三相短路故障时，具有较高的灵敏度与可靠性。

4.3 保护自适应性验证

将合环前相角差设置为 0°、8°、15°，调节相应的 SAPST 挡位，当线路发生两相短路故障、三相短路故障时，R2 的整定电流与故障电流结果分别如表 4、表 5 所示。

表 4 两相短路时整定电流、故障电流

Table 4 Setting currents and fault currents for two-phase short circuit

相角差	阶段一 整定值/ kA	阶段三 整定值/ kA	距离占 比系数 $\alpha/\%$	阶段一 故障 电流/kA	阶段三 故障 电流/kA
0°	1.1052	0.8129	50	1.482	0.954
			80	1.166	0.811
			100	1.020	0.737
8°	1.0908	0.8129	50	1.471	0.953
			80	1.154	0.810
			100	1.010	0.736
15°	1.0610	0.8129	50	1.443	0.951
			80	1.128	0.808
			100	0.985	0.734

表 5 三相短路时整定电流、故障电流

Table 5 Setting currents and fault currents for three-phase short circuit

相角差	阶段一 整定值/ kA	阶段三 整定值/ kA	距离占 比系数 $\alpha/\%$	阶段一 故障 电流/kA	阶段三 故障 电流/kA
0°	1.916	1.371	50	2.317	1.487
			80	1.819	1.260
			100	1.590	1.143
8°	1.895	1.371	50	2.301	1.485
			80	1.801	1.258
			100	1.573	1.141
15°	1.845	1.371	50	2.258	1.482
			80	1.759	1.255
			100	1.532	1.138

由表 4 和表 5 可知， f_2 处发生两相短路故障和三相短路故障时，故障电流与合环前相角差成反比关系，本方案 I 段保护整定值能够跟随合环前相角差的变化而自适应改变，具有较高的灵敏度和可靠性。

4.4 R4 II 段保护方案验证

以 f_4 发生三相短路故障、合环前合环点两侧相

角差为 15° 为例, 此时 $Z_{\text{eq}} \leq (1 - K_1 e^{-j\varphi}) Z_A$, 应选择式(22)作为整定值, 整定结果如图 19 所示。

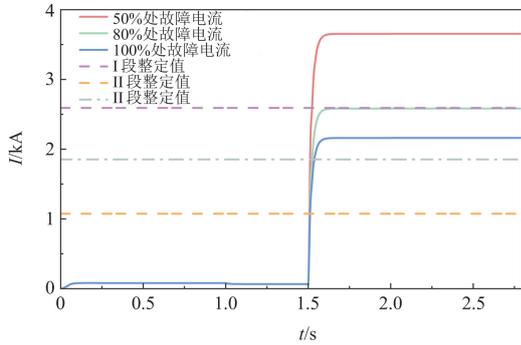


图 19 R4 的 II 段保护整定结果

Fig. 19 Setting results for the phase II protection of R4

由图 19 可知, R4 的 I 段保护可以保护线路 DE 的 80% 左右, II 段保护定值为 1.0748 kA, 可以保护线路 DE 全长及下级线路的一部分。原 II 段保护整定值为 1.8533 kA, 新的保护定整值使 R4 的 II 段保护灵敏系数提高了 0.5398。

5 RTlab 实验验证

为了进一步验证所提保护方案的有效性, 本文基于 RTlab 实时数字仿真系统搭建了如图 20 所示的实验平台示。

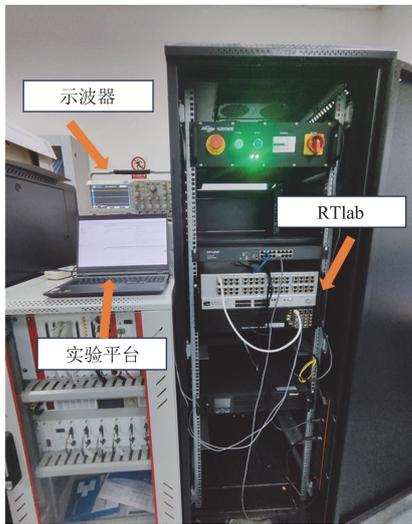


图 20 RTlab 实验平台

Fig. 20 RTlab simulation experiment platform

为了避免 RTlab 中电流超限导致波形畸变, 对实验数据添加一个值为 1/1000 的增益系数。图 21 为线路 EF 发生两相短路故障时, R3 处检测到的故障电流随合环前相角差变化情况。

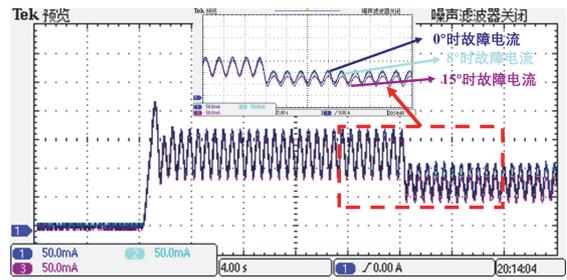


图 21 线路 EF 两相短路故障时电流随合环前相角差变化情况
Fig. 21 Variation of fault current for two-phase short circuit on line EF with phase angle difference before loop closing

假定相角差逐渐增大, 调整 SAPST 档位, R3 处故障电流逐渐降低。图 22 为线路 BC 80% 处发生两相短路故障时, R2 检测到的故障电流与重新整定的保护动作值。

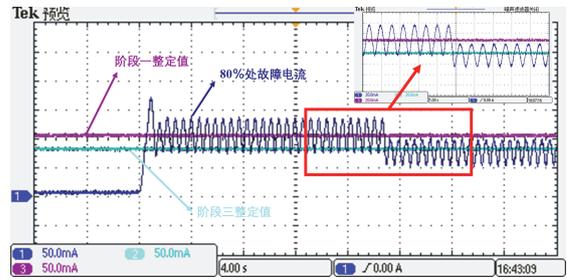


图 22 线路 BC 80% 处发生两相短路故障时 R2 的 I 段保护整定结果

Fig. 22 Setting results for phase I protection of R2 during a two-phase short circuit fault at 80% of line BC

从图 22 可看出两个阶段的保护范围均在 80% 以上, 保护的灵敏性显著提升。图 23 为线路 DE 末端发生三相短路故障时, R4 检测到的故障电流与重新整定的保护动作值。此时故障电流低于 I 段定值, 需要靠 II 段保护进行动作, II 段保护有足够的灵敏度。

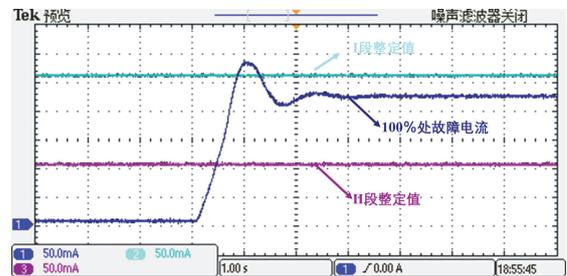


图 23 线路 DE 末端发生三相短路故障时 R4 的 II 段保护整定结果

Fig. 23 Setting results for phase II protection of R4 during a three-phase short circuit fault at the end of line DE

RTLab 实验进一步验证了本文所提的整定方程的准确性。

6 结论

本文为解决经 SAPST 合环后保护装置拒动、误动, 保护灵敏度降低等问题, 分析了 SAPST 的接入对传统电流保护的影响, 提出了 SAPST 合环网络的自适应电流保护方案, 并采用 PSCAD 搭建仿真模型及 RTlab 半实物仿真平台验证了方案的正确性。主要结论如下所述。

1) 合环过程中, 受 SAPST 等效阻抗及输出电压电流的影响, 保护测量电流会随合环过程和挡位调节而发生改变; 针对合环过程中各个阶段发生故障的情况, 本文根据复合序分量关系分别提出对于新增保护装置和合环点下游保护装置的 I 段保护方案, 具有较高的灵敏度和可靠性。

2) 合环后 SAPST 支路会对保护装置的 II 段保护灵敏度产生影响, 根据 SAPST 挡位调整分支系数构建 II 段保护方案, 所提保护方案能够解决经 SAPST 合环后线路保护适应性下降的问题。

3) 针对合环过程整定值需要不断更新的问题, 根据合环网络未合环、阶段一、阶段三 3 种状态设置保护方案切换判据, 并以此为基础提出 SAPST 合环网络保护方案, 为 SAPST 的工程应用奠定了理论基础。

参考文献

[1] 梁海深, 王康丽, 宋红宇, 等. 配电网柔性度对分布式发电消纳的影响规律和机理分析[J]. 中国电力, 2024, 57(10): 36-45.
LIANG Haishen, WANG Kangli, SONG Hongyu, et al. Influence rules and mechanism analysis of distribution network flexibility degree on distributed generator accommodation[J]. Electric Power, 2024, 57(10): 36-45.

[2] 杨德昌, 吴燕, HRVOJE P, 等. 考虑可平移负荷和智能软开关的主动配电网故障恢复方法[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(1): 183-192.
YANG Dechang, WU Yan, HRVOJE P, et al. Fault recovery of active distribution network considering translatable load and soft open point[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(1): 183-192.

[3] 李群, 张宁宇, 王新宝, 等. 电力潮流灵活控制技术应用综述[J]. 电力工程技术, 2023, 42(1): 50-60.
LI Qun, ZHANG Ningyu, WANG Xinbao, et al. Review on application of flexible power flow control technology[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(1): 50-60.

[4] 杨用春, 唐健雄, 牛超群, 等. 基于 IPST 的合环装置

三相不对称下耦合特性及控制策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(14): 158-168.
YANG Yongchun, TANG Jianxiong, NIU Chaoqun, et al. Coupling characteristic and control strategy for loop closing device based on improved phase shifting transformer under three-phase asymmetry condition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(14): 158-168.

[5] 黄丽苏, 郝正航. 对称双芯移相器的接入对距离保护的影响及改进措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 134-142.
HUANG Lisu, HAO Zhenghang. Influence of a symmetrical dual core PST on distance protection and improvement measures[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 134-142.

[6] KASZTENNY B, ROSOLOWSKI E. Modeling and protection of hexagonal phase-shifting transformers - part II: protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(3): 1351-1358.

[7] 陈镇生, 李晓华, 罗一杰, 等. 针对含有移相变压器线路的距离保护策略[J]. 电网技术, 2022, 46(12): 4591-4599.
CHEN Zhensheng, LI Xiaohua, LUO Yijie, et al. Distance protection strategies for lines containing phase shifting transformers[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4591-4599.

[8] 冯喜春, 张骥, 于佳旭, 等. 移相变压器接入对距离保护影响及其抑制方案研究[J/OL]. 电网技术: 1-13 [2025-03-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.tm.20240628.1039.002.html>.
FENG Xichun, ZHANG Ji, YU Jiayu, et al. Research on the impact and suppression scheme of distance protection after phase shifting transformer connected[J/OL]. Power System Technology: 1-13[2025-03-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.tm.20240628.1039.002.html>.

[9] 黄丽苏, 郝正航, 肖迎群, 等. 融冰移相器的接入对线路纵联保护的影响分析[J]. 电力科学与工程, 2021, 37(6): 70-78.
HUANG Lisu, HAO Zhenghang, XIAO Yingqun, et al. Analysis of the influence of ice-melting phase shifting transformer access on line longitudinal protection[J]. Electric Power Science and Engineering, 2021, 37(6): 70-78.

[10] 郭家鹏, 郝正航, 班国邦. 基于零序故障分量的对称双芯移相变压器保护研究[J]. 电力科学与工程, 2020, 36(11): 22-30.
GUO Jiapeng, HAO Zhenghang, BAN Guobang. Research on protection of symmetric double-core phase-shifting transformer based on zero sequence fault components[J]. Electric Power Science and Engineering, 2020, 36(11): 22-30.

- [11] SOLAK K, REBIZANT W, SCHIEL L. Modeling and analysis of the single-core phase shifting transformer and its differential protection[C]// 2015 Modern Electric Power Systems (MEPS), July 6-9, 2015, Wroclaw, Poland: 1-7.
- [12] SOLAK K, REBIZANT W, SCHIEL L. Differential protection of single-core symmetrical phase shifting transformers[C]// 2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), May 20-22, 2015, Kouty nad Desnou, Czech: 221-226.
- [13] NI Pinghao, ZHANG Jianguo, LIANG Junming, et al. A study of the effect of phase shifting transformers on line longitudinal differential protection[C]// 2023 3rd International Conference on Energy, Power and Electrical Engineering (EPEE), September 15-17, 2023, Wuhan, China: 654-660.
- [14] 余梦泽, 李峰, 李作红, 等. 移相变压器原理、拓扑、应用及发展[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56(10): 1224-1237.
YU Mengze, LI Feng, LI Zuohong, et al. Principle, topology, application and development of phase-shifting transformer[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2023, 56(10): 1224-1237.
- [15] 郑涛, 申由, 于佳旭, 等. 基于单芯移相变压器的差动保护配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(14): 59-70.
ZHENG Tao, SHEN You, YU Jiaxun, et al. Differential protection configuration based on a single core phase shifting transformer[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(14): 59-70.
- [16] 梅佳骏, 邹丹丹, 余梦泽, 等. 新型单心式独立型移相变压器及其调节特性研究[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(4): 105-110.
MEI Jiajun, ZOU Dandan, YU Mengze, et al. Study on novel single-core independent phase-shifting transformer and regulation performance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(4): 105-110.
- [17] 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. Modeling of two-core symmetrical discrete thyristor controlled phase shifting transformer[J]. Shaanxi Electric Power, 2014, 42(11): 61-67.
- [18] 郭家鹏, 郝正航, 陈卓, 等. 对称双芯移相变压器阻抗计算及仿真建模研究[J]. 高压电器, 2022, 58(4): 80-86.
GUO Jiapeng, HAO Zhenghang, CHEN Zhuo, et al. Research on impedance calculation and simulation modeling of symmetrical two-core phase-shifting transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(4): 80-86.
- [19] JIN Weigang, LIU Hangya, ZHANG Weizhe, et al. Power flow regulation effect and parameter design method of phase-shifting transformer[J]. Energies, 2024, 17(7).
- [20] BA A O, PENG Tao, LEFEBVRE S. Rotary power-flow controller for dynamic performance evaluation—part I: RPF model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 1406-1416.
- [21] ALBRECHTOWICZ P, ROZEGNAŁ B, SZCZEPANIK J, et al. Application of phase-shifting transformer with longitudinal and transverse voltage regulation[J]. Energies, 2023, 16(12).
- [22] 李景丽, 王子鉴, 任俊跃, 等. 基于主网和馈线多负荷等值的配电网合环倒切可行性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(7): 107-116.
LI Jingli, WANG Zijian, REN Junyue, et al. Feasibility analysis of loop closing operation in a distribution network based on the main network and feeder load equivalent model[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(7): 107-116.
- [23] 许守东, 王建, 李铭益, 等. 极端气象灾害下考虑 MESS 主动调控的配电网故障恢复策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(12): 45-57.
XU Shoudong, WANG Jian, LI Mingyi, et al. Distribution network fault recovery strategy considering active control of an MESS in extreme weather[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(12): 45-57.
- [24] UZUBI U U, DANIEL N, NNAEMEKA U, et al. Adaptive overcurrent protection scheme coordination in presence of distributed generation using radial basis neural network[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(1): 1-18.
- [25] 全蕾, 詹红霞, 张勇, 等. 考虑多 DG 接入的配电网自适应电流主保护方案[J]. 智慧电力, 2021, 49(8): 63-69.
QUAN Lei, ZHAN Hongxia, ZHANG Yong, et al. Adaptive current main protection scheme of distribution network accessed with multiple distributed generations[J]. Smart Power, 2021, 49(8): 63-69.

收稿日期: 2024-08-02; 修回日期: 2025-03-03

作者简介:

赵耀(1987—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力设备故障诊断与监测、配电网态势感知和风电功率预测; E-mail: nihaozhaoyao@163.com

高泽华(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: vonclay11@163.com

李东东(1976—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为风力发电与电力系统稳定控制、智能用电。E-mail: shiepldd@163.com

(编辑 张颖)