

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211198

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

黄丽苏¹, 郝正航²

(1. 国网河南省电力公司直流中心, 河南 郑州 450000; 2. 贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 对称双芯移相变压器(Phase Shifting Transformer, PST)作为潮流调控设备, 能实现输电线路传输功率的调节。然而, PST接入线路后将改变线路阻抗分布、电压和电流信号, 可能导致距离保护的误动或拒动。为了消除PST接入对常规距离保护造成的影响, 根据PST对各序网故障分量的移相特性、PST序网等效阻抗以及接地、相间测量阻抗算法, 推导出PST安装位置、PST移相角、故障位置均会对距离保护产生影响。基于距离保护受PST接入的影响机理, 利用对称分量反变换、同步相量测量技术, 提出了基于相角补偿和相量测量单元(Phasor Measurement Units, PMUs)的自适应距离保护。在此基础上, 利用Matlab/Simulink搭建了PST的模型, 并通过仿真验证了PST接入对距离保护影响机理推导的正确性以及所提出的自适应距离保护改进措施的有效性, 为未来PST的深入研究和工程应用提供了理论支撑。

关键词: 移相变压器; 距离保护; 序网故障分量; 对称分量反变换; 同步相量测量技术; 自适应距离保护

Influence of a symmetrical dual core PST on distance protection and improvement measures

HUANG Lisu¹, HAO Zhenghang²

(1. State Grid Henan Electric Power Company DC Center, Zhengzhou 450000, China;
2. College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: As a piece of power flow control equipment, the symmetrical dual core phase shifting transformer (PST) can realize the control of transmission power of a transmission line. However, after the PST is connected to the line, the line impedance distribution, voltage and current signals will be changed. This may lead to misoperation or refusal of distance protection. In order to eliminate the influence of PST access on conventional distance protection, given the phase-shifting characteristics of a PST on fault components of each sequence networks, the equivalent impedance of PST sequence networks and the algorithm of grounding and phase-to-phase measurement impedance are used. It is deduced that the PST installation position, PST phase-shifting angle and fault position will affect distance protection. Based on the influence mechanism of distance protection by PST access, an adaptive distance protection based on phase angle compensation and phasor measurement units (PMUs) is proposed. This uses symmetrical component inverse transformation and synchronous phasor measurement technology. The PST model is built using Matlab/Simulink, and the correctness of the derivation of the influence mechanism of PST access on distance protection and the effectiveness of the proposed adaptive distance protection improvement measures are verified by simulation. This provides theoretical support for the in-depth research and engineering application of a PST in the future.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51567005).

Key words: phase shifting transformer; distance protection; sequence network fault component; symmetric component inverse transformation; synchronous phasor measurement technology; adaptive distance protection

0 引言

移相变压器(Phase Shifting Transformer, PST)是

一种调控潮流的电力设备^[1], 采用串联接入输电线路, 通过在输入侧电压上叠加一个补偿电压向量, 使线路中的PST两侧电压相位或幅值发生变化, 以此起到调节线路传输功率的作用。目前, 虽然PST在国内少有工程实例, 但为了实现电力系统的安全、

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51567005)

稳定、经济运行^[2-5], 鉴于 PST 在消除线路过载^[6]、改善电网输电能力^[7]、线路融冰^[8-9]等方面的显著优势, 该设备将有广阔的工程应用前景。然而, PST 接入输电线路改变了线路阻抗分布、电压和电流信号^[10], 而这些电气量信息是距离保护进行算法配置、参数整定的重要依据, 所以开展 PST 接入对距离保护的影响研究是非常有必要的。

国内外学者对于 PST 的研究主要集中在其潮流控制原理、优化选址等方面^[11-12], 很少有关于 PST 接入对继电保护影响方面的研究。文献[13-15]分析了统一潮流控制器、串补等的接入对距离保护的影响, 但这些串联潮流控制器与 PST 的结构原理不同; 文献[16-22]研究了 PST 接入对继电保护电气量信息产生的影响, 但未针对距离保护受对称双芯 PST 接入的影响机理以及改进措施进行深入探讨; 文献[23-24]提出了应用于线路距离保护的新技术, 为补偿 PST 接入对距离保护产生的影响提供了思路。本文根据 PST 序网模型和测量阻抗算法, 分析影响距离保护的因素, 并根据影响机理提出有效的改进措施, 最后进行仿真验证。

1 对称双芯 PST 的原理及建模

1.1 结构原理

机械式对称双芯 PST 因容量大、绝缘特性好、造价低而被广泛应用, 故本文围绕对称双芯 PST 开展研究, 其结构原理如图 1 所示。该 PST 由串联变压器、励磁变压器构成, 串联变压器的原边绕组(Δ 形)直接连接到线路中, 串联变压器的原边中心绕组与励磁变压器的原边绕组(Y形)相连, 串联变压器副边绕组(Δ 形)连接到励磁变压器副边绕组(Y形)上。通过改变励磁变压器绕组的极性可实现电压的超前或滞后调节, 调整励磁变压器副边绕组上的有载分接开关的分接头可实现电压相角大小的调节, 进而达到对称双芯 PST 输入与输出电压幅值相同、相位改变的目的。

1.2 序网模型

1.2.1 正序模型

对称双芯 PST 的正序网络模型可由一个变比为复数 \dot{T} 的理想变压器和等效正序阻抗 $Z_T^{(1)}$ 表示, 图 2 为 PST 正序等值电路, 其中, $\dot{T} = e^{-j\varphi}$, φ 为移相角, $\dot{U}_M^{(1)}$ 、 $\dot{U}_L^{(1)}$ 和 $i_M^{(1)}$ 、 $i_L^{(1)}$ 分别为 PST 输入、输出的正序电压和电流相量。

由图 2 可以看出对称双芯 PST 正序输入、输出电压、电流关系为

$$\dot{U}_L^{(1)} = \dot{U}_M^{(1)} e^{j\varphi} - i_L^{(1)} Z_T^{(1)} \quad (1)$$

$$i_L^{(1)} = i_M^{(1)} e^{j\varphi} \quad (2)$$

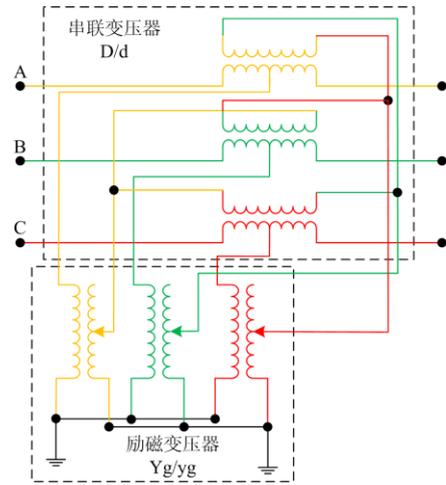


图 1 对称双芯 PST 的结构原理接线图

Fig. 1 Structure principle wiring diagram of the symmetrical dual-core PST

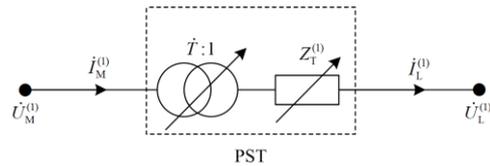


图 2 正序等值电路

Fig. 2 Positive sequence equivalent circuit

由于 PST 通过改变励磁变压器副边绕组接入电路的匝数调节档位, 故 PST 的 $Z_T^{(1)}$ 是变化的, 即

$$Z_T^{(1)} = 2Z_{A1}^{(1)} + \frac{12}{\left(\frac{2n_2}{P \cdot n_1}\right)^2 + 3} \left[Z_{EA}^{(1)} + \left(\frac{n_2}{P}\right)^2 \cdot P \cdot Z_{Ea}^{(1)} + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{n_2}{P}\right)^2 \cdot Z_a^{(1)} \right] \quad (3)$$

$$\varphi = \arctan \left(\frac{2n_2 - j\sqrt{3}P \cdot n_1}{2n_2 + j\sqrt{3}P \cdot n_1} \right) \quad (4)$$

式中: $Z_{A1}^{(1)}$ 、 $Z_a^{(1)}$ 为串联变压器原边、副边绕组的正序阻抗; n_1 为串联变压器的变比; n_2 为励磁变压器的变比; P 为励磁变压器副边绕组接入电路的匝数与总匝数之比; $Z_{EA}^{(1)}$ 、 $Z_{Ea}^{(1)}$ 为励磁变压器原边、副边绕组的正序阻抗。

1.2.2 负序模型

对称双芯 PST 的负序网络模型与正序网络模型的等值电路图基本相同, 如图 3 所示。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 $\dot{T}^* = e^{j\varphi}$ 。因串联、励磁变压器的正、负序阻抗是相等的, 故该 PST 的负序等效阻抗与正序相同。

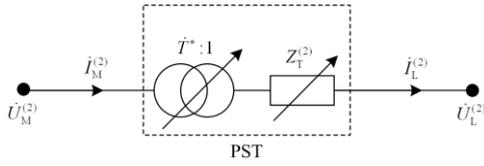


图3 负序等值电路

Fig. 3 Negative sequence equivalent circuit

由图3可知, PST 负序输入输出电压电流关系为

$$\dot{U}_L^{(2)} = \dot{U}_M^{(2)} e^{-j\varphi} - \dot{I}_L^{(2)} Z_T^{(2)} \quad (5)$$

$$\dot{I}_L^{(2)} = \dot{I}_M^{(2)} e^{-j\varphi} \quad (6)$$

1.2.3 零序模型

在零序网络中, 由于零序电压、电流的三相相位和大小均相同, 因而对称双芯 PST 的零序电路可等效为一个恒定的零序阻抗^[25], 如图4所示。

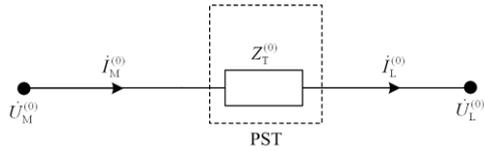


图4 零序等值电路

Fig. 4 Zero sequence equivalent circuit

由图4可知, PST 零序输入输出电压电流关系为

$$\dot{U}_L^{(0)} = \dot{U}_M^{(0)} - \dot{I}_L^{(0)} Z_T^{(0)} \quad (7)$$

$$\dot{I}_L^{(0)} = \dot{I}_M^{(0)} \quad (8)$$

根据对称双芯 PST 结构可推导出该 PST 的零序等效阻抗, 其值为

$$Z_T^{(0)} = 2Z_{A1}^{(0)} + 4n_1^2 \cdot Z_a^{(0)} \quad (9)$$

式中, $Z_{A1}^{(0)}$ 、 $Z_a^{(0)}$ 为串联变压器原边、副边绕组的零序阻抗。

1.3 距离保护的模型

距离保护是输电线路中最重要的保护之一, 其装置的核心元件为阻抗继电器。阻抗继电器采用自身位置处的电压和电流来测量线路短路点到保护安装处之间的正序阻抗, 以确定输电线路故障的位置和类型。阻抗继电器建模采用以下步骤: (1) 从 PT 和 CT 的输出经过低通滤波器后进行采样; (2) 采样值利用全周期离散傅立叶变换(FCDFT)计算信号的相量。在距离保护建模时, 利用电压、电流信号计算可得到反映接地故障的测量阻抗 Z_{AG} 、 Z_{BG} 、 Z_{CG} 和相间故障的测量阻抗 Z_{AB} 、 Z_{BC} 、 Z_{CA} 。对于接地距离保护, 以 Z_{AG} 为例:

$$Z_{AG} = \frac{\dot{U}_A}{\dot{I}_A + \left(\frac{Z_L^{(0)} - Z_L^{(1)}}{Z_L^{(1)}} \right) \cdot \dot{I}_A} \quad (10)$$

式中, $Z_L^{(1)}$ 、 $Z_L^{(0)}$ 分别为线路的正序、负序阻抗。

对于相间距离保护, 以 Z_{AB} 为例:

$$Z_{AB} = \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_B}{\dot{I}_A - \dot{I}_B} \quad (11)$$

2 对称双芯 PST 对距离保护影响机理分析

将对称双芯 PST 接入如图5所示线路。

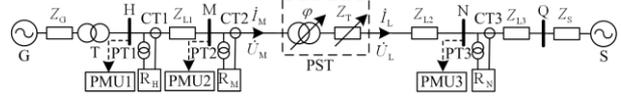


图5 含对称双芯 PST 的系统接线图

Fig. 5 System wiring diagram with symmetrical dual-core PST

在图5中, 若在 PST 的左侧或右侧线路中发生故障时, 对应的故障正、负、零序网络分别如图6—图8所示。

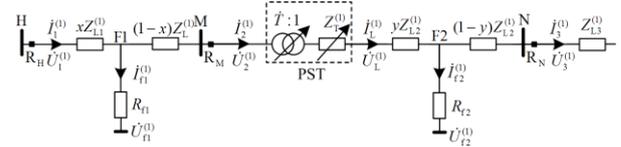


图6 故障正序网络

Fig. 6 Fault positive sequence network

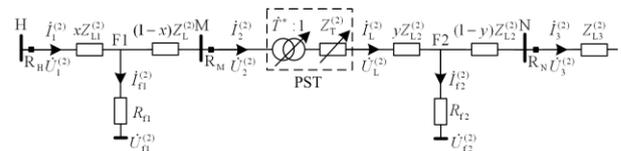


图7 故障负序网络

Fig. 7 Fault negative sequence network

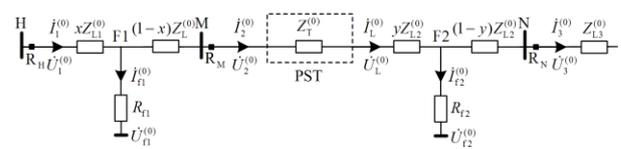


图8 故障零序网络

Fig. 8 Fault zero sequence network

从图6—图8的故障序网分量可以看出, 以线路 HM 的 H 侧保护 R_H 为例, 当 PST 左侧线路发生故障 F1 时, R_H 中 A 相正序电压 ($\dot{U}_{1A}^{(1)}$) 为

$$\dot{U}_{1A}^{(1)} = \dot{I}_{1A}^{(1)} \cdot xZ_{L1}^{(1)} + \dot{I}_{F1A}^{(1)} \cdot R_{F1A} + \dot{U}_{F1A}^{(1)} \quad (12)$$

式中, x 为线路 HM 中故障 F1 发生处距 H 侧长度占线路总长度的百分比。

同理, $\dot{U}_{1A}^{(2)}$ 、 $\dot{U}_{1A}^{(0)}$ 表达式与式(12)相同, 只是上标分别变成 2 和 0, 则此处 A 相电压 \dot{U}_{1A} 为

$$\begin{aligned} \dot{U}_{1A} &= \dot{U}_{1A}^{(1)} + \dot{U}_{1A}^{(2)} + \dot{U}_{1A}^{(0)} = \\ & \dot{i}_{1A}^{(1)} \cdot xZ_{L1}^{(1)} + \dot{i}_{1A}^{(2)} \cdot xZ_{L1}^{(2)} + \dot{i}_{1A}^{(0)} \cdot xZ_{L1}^{(0)} + \\ & (\dot{i}_{f1A}^{(1)} + \dot{i}_{f1A}^{(2)} + \dot{i}_{f1A}^{(0)}) \cdot R_{f1} + \dot{U}_{f1A}^{(1)} + \dot{U}_{f1A}^{(2)} + \dot{U}_{f1A}^{(0)} = \\ & \dot{i}_{1A} \cdot xZ_{L1}^{(1)} + \dot{i}_{1A}^{(0)} \cdot (xZ_{L1}^{(0)} - xZ_{L1}^{(1)}) + \dot{i}_{f1A} \cdot R_{f1} + \dot{U}_{f1A} \end{aligned} \quad (13)$$

若 F1 为 A 相接地故障, 则 $\dot{U}_{f1A} = 0$, 由式(10)

可得 R_H 测量阻抗为

$$\begin{aligned} Z_{AG} &= \frac{\dot{U}_{1A}}{\dot{i}_{1A} + \left(\frac{Z_{L1}^{(0)} - Z_{L1}^{(1)}}{Z_{L1}^{(1)}} \right) \cdot \dot{i}_{1A}^{(0)}} = \\ & xZ_{L1}^{(1)} + \frac{\dot{i}_{f1A}^{(1)} + \dot{i}_{f1A}^{(2)} + \dot{i}_{f1A}^{(0)}}{\dot{i}_{1A} + \left(\frac{Z_{L1}^{(0)} - Z_{L1}^{(1)}}{Z_{L1}^{(1)}} \right) \cdot \dot{i}_{1A}^{(0)}} \cdot R_{f1} \end{aligned} \quad (14)$$

同理, 若 F1 为 AB 相间故障, R_H 测量阻抗为

$$Z_{AB} = xZ_{L1}^{(1)} + \frac{\dot{i}_{f1A}^{(1)} + \dot{i}_{f1A}^{(2)} - \dot{i}_{f1B}^{(1)} - \dot{i}_{f1B}^{(2)}}{\dot{i}_{1A} - \dot{i}_{1B}} \cdot R_{f1} \quad (15)$$

从式(14)和式(15)可以看出, 当故障发生在 PST 左侧时, 对于接地和相间故障, R_H 均能准确计算其测量阻抗, 即此时距离保护不受 PST 接入影响。

当 PST 右侧线路发生故障 F2 时, $\dot{U}_{1A}^{(1)}$ 为

$$\begin{aligned} \dot{U}_{1A}^{(1)} &= \dot{i}_{1A}^{(1)} \cdot Z_{L1}^{(1)} + \dot{U}_{2A}^{(1)} - \dot{U}_{2A}^{(1)} \cdot e^{j\varphi} + \dot{i}_{2A}^{(1)} \cdot e^{j\varphi} \cdot Z_T^{(1)} + \\ & \dot{i}_{1A}^{(1)} \cdot yZ_{L2}^{(1)} + \dot{i}_{f2A}^{(1)} \cdot R_{f2} + \dot{U}_{f2A}^{(1)} \end{aligned} \quad (16)$$

式中, y 为线路 MN 中故障 F2 发生处距 M 侧长度占线路总长度的百分比。

由式(1)、式(2)可知

$$\dot{U}_{2A}^{(1)} = \dot{U}_{1A}^{(1)} - \dot{i}_{1A}^{(1)} \cdot Z_{L1}^{(1)} \quad (17)$$

$$\dot{i}_{1A}^{(1)} = \dot{i}_{2A}^{(1)} \cdot e^{j\varphi} = \dot{i}_{1A}^{(1)} \cdot e^{j\varphi} \quad (18)$$

将式(17)、式(18)代入式(16)整理得

$$\dot{U}_{1A}^{(1)} = \dot{i}_{1A}^{(1)} \cdot (Z_{L1}^{(1)} + Z_T^{(1)} + yZ_{L2}^{(1)}) + \frac{\dot{i}_{f2A}^{(1)} \cdot R_{f2} + \dot{U}_{f2A}^{(1)}}{e^{j\varphi}} \quad (19)$$

因此, 可推导出 \dot{U}_{1A} :

$$\begin{aligned} \dot{U}_{1A} &= \dot{U}_{1A}^{(1)} + \dot{U}_{1A}^{(2)} + \dot{U}_{1A}^{(0)} = \\ & \dot{i}_{1A}^{(1)} \cdot (Z_{L1}^{(1)} + Z_T^{(1)} + yZ_{L2}^{(1)}) + \dot{i}_{1A}^{(2)} \cdot (Z_{L1}^{(2)} + Z_T^{(2)} + yZ_{L2}^{(2)}) + \\ & \dot{i}_{1A}^{(0)} \cdot (Z_{L1}^{(0)} + Z_T^{(0)} + yZ_{L2}^{(0)}) + (\dot{i}_{f2A}^{(1)} \cdot R_{f2} + \dot{U}_{f2A}^{(1)}) \cdot e^{-j\varphi} + \\ & (\dot{i}_{f2A}^{(2)} \cdot R_{f2} + \dot{U}_{f2A}^{(2)}) \cdot e^{j\varphi} + \dot{i}_{f2A}^{(0)} \cdot R_{f2} + \dot{U}_{f2A}^{(0)} \end{aligned} \quad (20)$$

若 F2 为 A 相接地故障, 则 R_H 测量阻抗为

$$Z_{AG} = \frac{\dot{U}_{1A}}{\dot{i}_{1A} + \left(\frac{Z_{L1}^{(0)} - Z_{L1}^{(1)}}{Z_{L1}^{(1)}} \right) \cdot \dot{i}_{1A}^{(0)}} =$$

$$\begin{aligned} & \frac{Z_{L1}^{(1)} + yZ_{L2}^{(1)} + \frac{\dot{i}_{f2A}^{(1)} \cdot e^{-j\varphi} + \dot{i}_{f2A}^{(2)} \cdot e^{j\varphi} + \dot{i}_{f2A}^{(0)}}{\dot{i}_{1A} + \left(\frac{Z_{L1}^{(0)} - Z_{L1}^{(1)}}{Z_{L1}^{(1)}} \right) \cdot \dot{i}_{1A}^{(0)}} \cdot R_{f1} + \\ & \frac{\dot{i}_{1A}^{(1)} \cdot Z_T^{(1)} + \dot{i}_{1A}^{(2)} \cdot Z_T^{(2)} + \dot{i}_{1A}^{(0)} \cdot Z_T^{(0)}}{\dot{i}_{1A} + \left(\frac{Z_{L1}^{(0)} - Z_{L1}^{(1)}}{Z_{L1}^{(1)}} \right) \cdot \dot{i}_{1A}^{(0)}} \end{aligned} \quad (21)$$

同理, 若 F2 为 AB 相间故障, R_H 测量阻抗为

$$\begin{aligned} Z_{AB} &= Z_{L1}^{(1)} + yZ_{L2}^{(1)} + \\ & \frac{(\dot{i}_{f1A}^{(1)} - \dot{i}_{f1B}^{(1)}) \cdot e^{-j\varphi} + (\dot{i}_{f1A}^{(2)} - \dot{i}_{f1B}^{(2)}) \cdot e^{j\varphi}}{\dot{i}_{1A} - \dot{i}_{1B}} \cdot R_{f1} + Z_T^{(1)} \end{aligned} \quad (22)$$

由式(21)和式(22)可以看出, 当故障发生在 PST 右侧时, 对于接地或相间故障, R_H 的测量阻抗与 PST 等效阻抗、 φ 均有关, 并且该等效阻抗和 φ 不是恒定值而是随 PST 档位改变而变化的, 故此时 R_H 无法正确测量保护至故障点的距离, 保护逻辑控制算法失效, PST 接入会对距离保护产生影响。

对于线路 MN 的 M 侧保护 R_M , 由于 R_M 相对 PST 的位置与 R_H 相同, 所以 PST 的接入对 R_M 的影响情况与 R_H 相同, 而 PST 在线路 NQ 的 N 侧保护 R_N 的保护范围之外, 故 PST 的接入不会对 R_N 产生影响。

3 改进措施的提出

通过分析 PST 接入对距离保护测量阻抗的影响机理可知, PST 的安装位置和 φ 、故障位置等都会影响阻抗继电器的测量阻抗计算。然而, 距离保护作为线路中重要的后备保护, 必须采取有效的改进措施消除 PST 接入对其的不利影响, 以防止距离保护误动或拒动。在图 5 中: 对于 F1, R_H 不受影响, 则仍采用原来的测量阻抗算法; 而对于 F2, R_H 测量阻抗会受 PST 接入影响。为保证 R_H 正常工作, 将 PST 等效电路的可变阻抗和串联电压视为可变电压源, 即

$$\Delta \dot{U}_T = \dot{U}_2 - \dot{U}_L \quad (23)$$

对于 F2, 阻抗继电器采用 PST 右侧电压、电流信号时, 可正常工作, 则利用电路的等式变换, 将 R_H 处电压、电流信号换成 PST 右侧电压、电流信号, 以 A 相接地故障为例, 推导过程如下:

$$Z_{AG,L} = \frac{\dot{U}_{LA}}{\dot{i}_{LA} + \left(\frac{Z_{L2}^{(0)} - Z_{L2}^{(1)}}{Z_{L2}^{(1)}} \right) \cdot \dot{i}_{LA}^{(0)}} = Z_{set} - Z_{L1}^{(1)} \quad (24)$$

式中, Z_{set} 为 R_H 的整定值。

$$\dot{U}_{LA} = \dot{U}_{IA} - \dot{I}_{IA} \cdot Z_{L1} - \Delta \dot{U}_{TA} \quad (25)$$

根据 PST 的移相特性, 写成矩阵形式得

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{LA}^{(1)} \\ \dot{I}_{LA}^{(2)} \\ \dot{I}_{LA}^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{j\varphi} & 0 & 0 \\ 0 & e^{-j\varphi} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{IA}^{(1)} \\ \dot{I}_{IA}^{(2)} \\ \dot{I}_{IA}^{(0)} \end{bmatrix} \quad (26)$$

由对称分量反变换可得

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{LA} \\ \dot{I}_{LB} \\ \dot{I}_{LC} \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} \dot{I}_{LA}^{(1)} \\ \dot{I}_{LA}^{(2)} \\ \dot{I}_{LA}^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{LA}^{(1)} \\ \dot{I}_{LA}^{(2)} \\ \dot{I}_{LA}^{(0)} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{IA} \\ \dot{I}_{IB} \\ \dot{I}_{IC} \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} \dot{I}_{IA}^{(1)} \\ \dot{I}_{IA}^{(2)} \\ \dot{I}_{IA}^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{IA}^{(1)} \\ \dot{I}_{IA}^{(2)} \\ \dot{I}_{IA}^{(0)} \end{bmatrix} \quad (28)$$

式中: $a = e^{j120^\circ} = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ$; $a^2 = e^{j240^\circ} = \cos 240^\circ + j \sin 240^\circ$ 。

将式(26)左乘对称分量反变换矩阵 S , 根据式(27)、式(28)得

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{LA} \\ \dot{I}_{LB} \\ \dot{I}_{LC} \end{bmatrix} = S \cdot \begin{bmatrix} e^{j\varphi} & 0 & 0 \\ 0 & e^{-j\varphi} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot S^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_{IA} \\ \dot{I}_{IB} \\ \dot{I}_{IC} \end{bmatrix} = K(\varphi) \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_{IA} \\ \dot{I}_{IB} \\ \dot{I}_{IC} \end{bmatrix} \quad (29)$$

其中, 通过计算可得矩阵 $K(\varphi)$:

$$K(\varphi) = \frac{1}{3} \times \begin{bmatrix} 2\cos(\varphi)+1 & 2\cos(\varphi+120^\circ)+1 & 2\cos(\varphi-120^\circ)+1 \\ 2\cos(\varphi-120^\circ)+1 & 2\cos(\varphi)+1 & 2\cos(\varphi+120^\circ)+1 \\ 2\cos(\varphi+120^\circ)+1 & 2\cos(\varphi-120^\circ)+1 & 2\cos(\varphi)+1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1(\varphi) \\ K_2(\varphi) \\ K_3(\varphi) \end{bmatrix} \quad (30)$$

为了书写方便, 将 R_H 的电流信号简写为 $I_1 = [\dot{I}_{IA} \ \dot{I}_{IB} \ \dot{I}_{IC}]^T$ 。

由式(24)、式(25)、式(29)可得修正后的 R_H 测量阻抗算法:

$$Z'_{AG} = \frac{\dot{U}_{LA}}{\dot{I}_{LA} + \left(\frac{Z_{L2}^{(0)} - Z_{L2}^{(1)}}{Z_{L2}^{(1)}} \right) \cdot \dot{I}_{LA}^{(0)}} + Z_{L1}^{(1)} = \frac{\dot{U}_{IA} - \dot{I}_{IA} \cdot Z_{L1} - \Delta \dot{U}_{TA}}{K_1(\varphi) \cdot I_1 + \left(\frac{Z_{L1}^{(0)} - Z_{L1}^{(1)}}{Z_{L1}^{(1)}} \right) \cdot \dot{I}_{IA}^{(0)}} + Z_{L1}^{(1)} \quad (31)$$

F2 为 AB 相间故障时, 同理可得修正后的 R_H 测量阻抗算法:

$$Z'_{AB} = \frac{\dot{U}_{IA} - \dot{I}_{IA} \cdot Z_{L1} - \Delta \dot{U}_{TA} - \dot{U}_{IB} + \dot{I}_{IB} \cdot Z_{L1} + \Delta \dot{U}_{TB}}{K_1(\varphi) \cdot I_1 - K_2(\varphi) \cdot I_1} + Z_{L1}^{(1)} \quad (32)$$

由式(31)和式(32)可以看出, 加入 PST 后, 若故障发生在 F2 处时, 为保证 R_H 正确动作, 其测量阻抗计算需加入 PST 的档位信息 P 进行修正。

为了正确区分故障位置 F1 和 F2, 采用有功功率方向法进行辨别。该方法通过检测 PST 左侧电压、电流信号来识别对应有功功率的方向。若流经 PST 的有功功率 P_{PST} 为从左向右, 记作 $P_{PST} > 0$, 则故障位置为 F2; 反之, $P_{PST} \leq 0$, 故障位置为 F1。此时 R_H 的动作逻辑关系如图 9 所示。

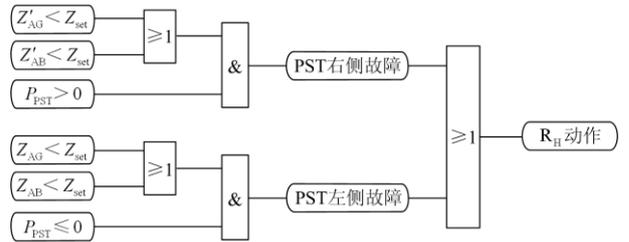


图 9 动作逻辑关系

Fig. 9 Action logic relation

在计算 P_{PST} 、 $\Delta \dot{U}_T$ 时, 需采集 PST 两侧的电压、电流信号, 若在仿真平台中可以直接测量获得, 但在实际工程中, 线路中的距离保护采用的是单端电气量, 无法直接获取线路中 PST 两侧电气量信息。基于此, 可利用相量测量单元(Phasor Measurement Units, PMUs)获得该处电压、电流信号^[26]。PMU 通过相量形式在传输系统的选定点上测量电流和电压信号, 利用高精度时间同步比较相距较远的不同位置的测量值, 并得出有关系统状态和动态事件。因 PMU 中电压、电流相量的计算算法与阻抗继电器算法完全相同, 故 PMU 能够用于含 PST 线路的距离保护中。

PMU 接收来自 PT 和 CT 的电压、电流信号, 通过远程信号系统将其传输到系统保护中心(The System Protection Center, SPC)后, 利用全球定位系统协调 SPC 中的信号, 计算 P_{PST} 、 $\Delta \dot{U}_T$ 并将其发送给相应的继电器, 用于阻抗继电器的工作。PMU 中相量的计算算法以及传输过程如图 10 所示。

4 仿真验证

对称双芯 PST 的参数如表 1 所示。其中: φ 为 0° 时, PST 等效阻抗值最小; φ 为最大值 $\pm 30^\circ$ 时, PST 等效阻抗值最大。

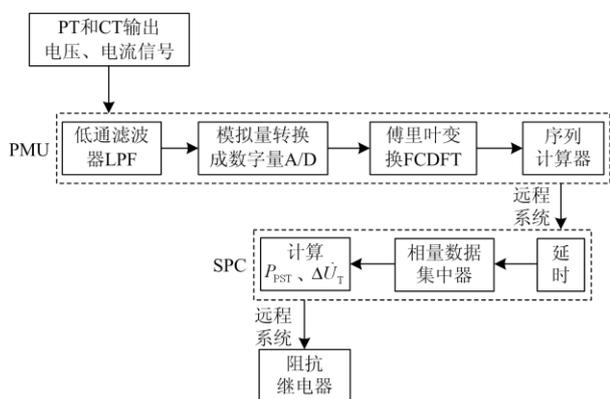


图 10 PMU 中相量的计算算法及传输过程

Fig. 10 Calculation algorithm and transmission process of phasor in PMU

表 1 对称双芯 PST 的参数一览表

Table 1 Parameters list of symmetrical dual-core PST

名称	参数值	单位
额定电压	220	kV
容量	478	MVA
空载 φ	0~±30	°
等效阻抗	7.61~12.22	Ω

由于 Matlab/Simulink 模型库里没有现成的 PST 模块, 则需根据 PST 结构原理及参数搭建其仿真模型并验证。PST 档位为最大超前角 ($\varphi = +30^\circ$) 时, PST 母线侧和线路侧的电压、电流、有功功率信息如图 11 所示。

由图 11 可以看出, PST 两侧的电压幅值几乎不变, 并且两侧电压、电流相位差均约为 $+30^\circ$ 。根据

PST 的等效电路可知, 该元件两侧幅值的微小变化和相位误差都是由 PST 的等效阻抗引起的, 故搭建的 PST 模型正确有效。

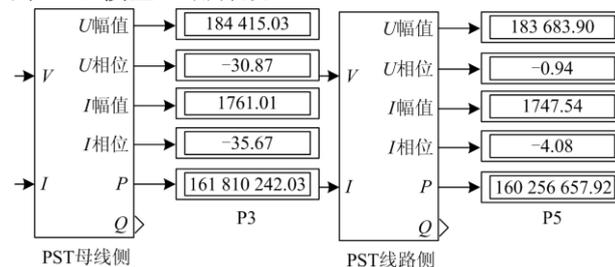


图 11 PST 母线侧和线路侧的电气量信息

Fig. 11 Electrical quantity information of PST bus side and line side

图 5 系统对应的输电线路参数如表 2 所示。

根据表 2 和图 5, 利用 Matlab/Simulink 搭建对应的仿真模型如图 12 所示。

表 2 系统的输电线路参数

Table 2 Transmission line parameters of the system

项目	参数	单位
电压等级	220	kV
正序电阻	0.1	Ω/km
正序感抗	0.4	Ω/km
正序并联容抗	0.530 52	$\text{M}\Omega/\text{km}$
零序电阻	0.5	Ω/km
零序感抗	1.2	Ω/km
零序并联容抗	0.786 3	$\text{M}\Omega/\text{km}$
线路长度	HM: 100 MN: 100 NQ: 100	km

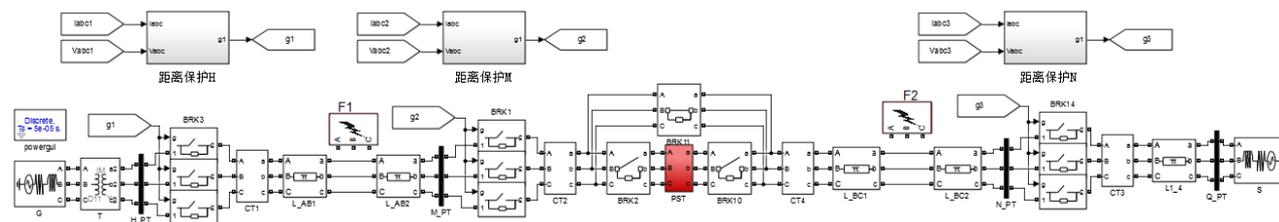
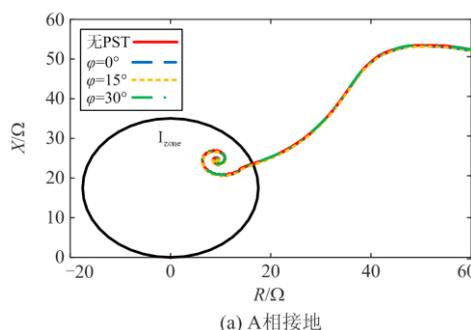


图 12 含 PST 系统的仿真模型

Fig. 12 Simulation model of system with PST

基于表 2 线路参数和距离保护的整定原理, 计算得到 R_H 和 R_M 距离 I、II、III 段的整定范围 (I_{zone} 、 II_{zone} 、 III_{zone}) 分别为 85 km、148 km、200 km。考虑保护各段的灵敏性要求, 对于 PST 的不同 φ 值, 在距离 R_H 80 km (F1) 和 125 km (F2) 处分别设置 A 相接地 (a)、AB 相间短路 (b) 故障进行仿真, 得到 R_H 测量阻抗如图 13、图 14 所示。



(a) A相接地

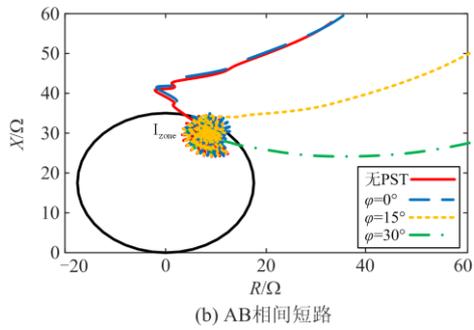
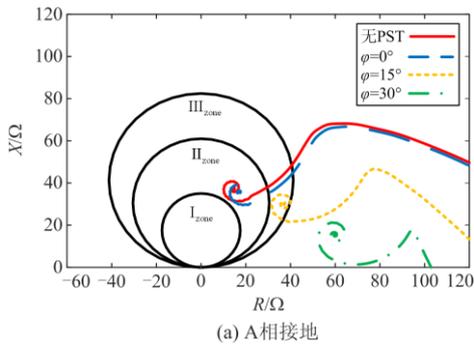
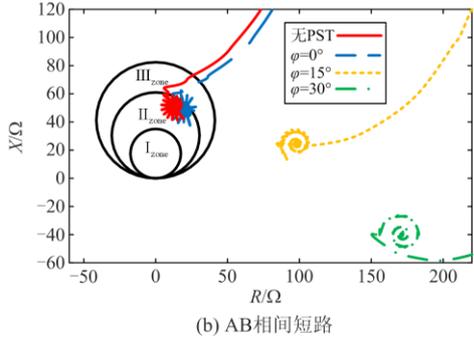


图 13 距离 R_H 80 km 处 R_H 测量阻抗

Fig. 13 Measured impedance of R_H at a distance of 80 km away from R_H



(a) A相接地



(b) AB相间短路

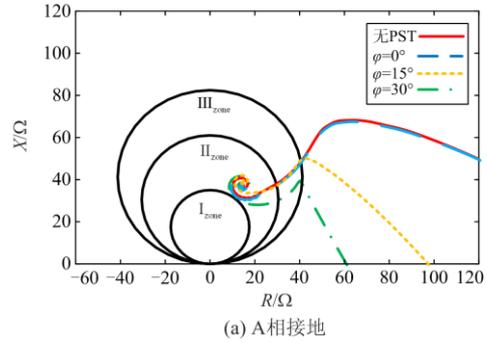
图 14 距离 R_H 125 km 处 R_H 测量阻抗

Fig. 14 Measured impedance of R_H at a distance of 125 km away from R_H

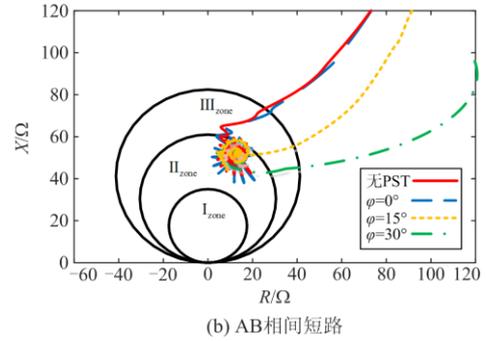
由图 13 和图 14 可以看出:对于 PST 左侧(距 R_H 80 km)的接地或相间短路故障,在 PST 接入前后 R_H 测量阻抗是相同的,则 PST 的接入以及 φ 不会对 R_H 测量阻抗产生影响;而对于 PST 右侧(距 R_H 125 km)的接地或相间短路故障, PST 接入会使 R_H 测量阻抗发生变化,并且变化程度与 PST 的 φ 有关。经过以上仿真分析,验证了 PST 接入对距离保护影响机理推导的正确性。

加入改进措施后,对距离 R_H 125 km 处发生的接地、相间短路故障进行仿真,此时得到 R_H 测量

阻抗如图 15 所示。



(a) A相接地



(b) AB相间短路

图 15 加入改进措施后距离 R_H 125 km 处 R_H 测量阻抗

Fig. 15 Measured impedance of R_H at 125 km away from R_H after adding improvement measures

从图 15 可以看出,在 PST 加入后,经过改进的 R_H 测量阻抗与未接入 PST 时几乎相同。

在不同 φ 值时,在改进措施前、后 R_H 和 R_M 的保护范围如表 3 所示。

表 3 改进措施前后 R_H 和 R_M 的保护范围

Table 3 Protection range of R_H and R_M before and after improvement measures

		无 PST	$\varphi = 0^\circ$	$\varphi = 15^\circ$	$\varphi = 30^\circ$	
R_H 保护范围/km	I _{zone}	改进前	85.00	85.00	85.00	
		改进后	85.00	85.00	85.00	
	II _{zone}	改进前	148.00	129.54	123.95	118.36
		改进后	148.00	147.56	146.52	145.38
III _{zone}	改进前	200.00	181.54	175.95	170.36	
	改进后	200.00	199.1	198.2	197.72	
R_M 保护范围/km	I _{zone}	改进前	85.00	66.54	60.95	55.36
		改进后	85.00	84.46	84.14	82.79
	II _{zone}	改进前	148.00	129.54	123.95	118.36
		改进后	148.00	146.88	145.08	143.86
	III _{zone}	改进前	200.00	181.54	175.95	170.36
		改进后	200.00	197.60	195.41	194.28

由表 3 可以看出,在 PST 不同 φ 时,通过改进措施前后 R_H 和 R_M 三段保护范围的对比可知,改进后的保护范围均在未接入 PST 时保护范围的 3% 以

内, 则加入 PST 后的距离保护特性得到较大改善, 改进措施正确有效。

5 结论

本文基于 PST 的序网模型和距离保护接地、相间测量阻抗算法, 推导了 PST 接入对距离保护的影响机理。研究表明: 由于 PST 自身存在阻抗以及对电压、电流信号的移相特性, PST 的加入会对距离保护产生影响, 并且距离保护元件受 PST 安装位置、PST 的 φ 、故障位置的影响。因此, 根据影响机理提出了基于相角补偿和 PMU 的自适应距离保护。本文关于 PST 接入对距离保护的影响以及提出的改进措施为未来 PST 的深入研究和工程应用提供了理论支撑, 但还有待于实际工程的检验。

参考文献

- [1] IMDADULLAH, AMRR S M, ASGHAR M, et al. A comprehensive review of power flow controllers in interconnected power system networks[J]. IEEE Access, 2020, 8: 18036-18063.
- [2] 黄国栋, 许丹, 崔晖, 等. 互联电网安全约束经济调度场景构建方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 136-143.
HUANG Guodong, XU Dan, CUI Hui, et al. Scenario construction method of security-constrained economic dispatch for an interconnected power grid[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 136-143.
- [3] 李群, 张宁宇, 高山, 等. 电网移相器 RTDS 建模及应用场景分析[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 53-58.
LI Qun, ZHANG Ningyu, GAO Shan, et al. Modeling and application scenario analysis of power phase shift transformer based on RTDS[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 53-58.
- [4] 孙淑琴, 颜文丽, 吴晨悦, 等. 基于原-对偶内点法的输电断面有功安全校正控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 75-85.
SUN Shuqin, YAN Wenli, WU Chenyue, et al. Active power flow safety correction control method of transmission sections based on a primal-dual interior point method[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 75-85.
- [5] 段翔兮, 邹琬, 李熠, 等. 基于数据驱动代理模型的城市输电网运行品质调节控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 65-73.
DUAN Xiangxi, ZOU Wan, LI Yi, et al. Data driven surrogate model-based operation quality control strategy of an urban transmission network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 65-73.
- [6] 吴熙, 王亮, 陈曦, 等. UPFC 与 IPFC 提升系统输电能力比较研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(9): 128-134.
WU Xi, WANG Liang, CHEN Xi, et al. Comparative research on UPFC and IPFC enhancing transmission capability of a power system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9): 128-134.
- [7] 杨昊, 杨健. 基于移相器的多电压等级潮流断面输电能力优化方法研究[J]. 陕西电力, 2017, 45(5): 42-47.
YANG Hao, YANG Jian. Optimization of transmission capability of multi voltage power flow section based on phase shifter[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(5): 42-47.
- [8] CLOUTIER R, BERGERON A, BROCHU J. On-load network deicer specification for a large transmission network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1947-1955.
- [9] 杨旗, 班国邦, 谢百明, 等. 移相变压器应用于输电线路在线融冰方法与仿真研究[J]. 电网技术, 2021, 45(8): 3349-3355.
YANG Qi, BAN Guobang, XIE Baiming, et al. Deicing method and simulation of phase-shifting transformer for on-load transmission lines[J]. Power System Technology, 2021, 45(8): 3349-3355.
- [10] 周飞, 于弘洋, 方万良, 等. 分级投切可控移相器稳态相量建模与分析[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3184-3189.
ZHOU Fei, YU Hongyang, FANG Wanliang, et al. Steady state phasor modeling and analysis of hierarchically switched thyristor controlled phase shift transformer[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3184-3189.
- [11] 田翠华, 游奕弘, 费雯丽, 等. 基于新型移相变压器的单电源配电网潮流优化[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(12): 52-59.
TIAN Cuihua, YOU Yihong, FEI Wenli, et al. Power flow optimization of single power supply loop distribution network based on novel phase shifting transformer[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(12): 52-59.
- [12] THWALA M S, NNACHI A F, MOLOI K, et al. The effect of a phase shift transformer for power flow control[C] // 2019 Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA), January 28-30, 2019, Bloemfontein, South Africa: 425-430.
- [13] 李锋, 樊艳芳, 王晓飞, 等. 限流串抗器接入电网对继电保护的影响及整定原则研究[J]. 电力系统保护与控制

- 制, 2017, 45(17): 118-123.
- LI Feng, FAN Yanfang, WANG Xiaofei, et al. Influence of current limiting series reactor connected to the power grid on relay protection and research on the principle of the corresponding setting[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 118-123.
- [14] 谢华, 潘磊, 赵青春, 等. 统一潮流控制器与串补对线路保护影响的比较分析[J]. 电力工程技术, 2017, 36(4): 137-142.
- XIE Hua, PAN Lei, ZHAO Qingchun, et al. Comparative analysis of the influence of unified power flow controller and series compensation on line protection[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(4): 137-142.
- [15] 郑涛, 汤哲, 张滋行, 等. 统一潮流控制器对继电保护的影响及对策研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 171-178.
- ZHENG Tao, TANG Zhe, ZHANG Zixing, et al. Review of the influence of unified power flow controller on relay protection and countermeasures[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 171-178.
- [16] 曹路, 付俊波, 唐陇军, 等. 可控移相器对系统不对称短路电流的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24): 1-7.
- CAO Lu, FU Junbo, TANG Longjun, et al. Study on the influence of TCPST on asymmetric short circuit current[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24): 1-7.
- [17] 陈新, 姚旭, 康小宁. 双芯对称离散型可控移相器对纵联保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 121-125.
- CHEN Xin, YAO Xu, KANG Xiaoning. Research on the effects of TCPS on pilot protection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24): 121-125.
- [18] GHORBANI A. An adaptive distance protection scheme in the presence of phase shifting transformer[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 129: 170-177.
- [19] GHORBANI A, ARABLU M. Ground distance relay compensation in the presence of delta-hexagonal phase shifting transformer[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(15): 2091-2098.
- [20] 张晓宇, 顾乔根, 文继锋, 等. 典型移相变压器差动保护配置对比分析[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(1): 36-39.
- ZHANG Xiaoyu, GU Qiaogen, WEN Jifeng, et al. Comparative analysis of the differential protection between typical phase shifting transformers[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(1): 36-39.
- [21] EL-GHANY H, SOLIMAN I A, AZMY A M. A reliable differential protection algorithm for delta hexagonal phase-shifting transformers[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 127(3).
- [22] SOLIMAN I A, EL-GHANY H A, AZMY A M. A robust differential protection technique for single core delta-hexagonal phase-shifting transformers[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 109: 207-216.
- [23] GHORBANI A, EBRAHIMI S Y, GHORBANI M. Active power based distance protection scheme in the presence of series compensators[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1): 57-69.
- [24] MALLIKARJUNA B, SHANMUKESH P, ANMOL D, et al. PMU based adaptive zone settings of distance relays for protection of multi-terminal transmission lines[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 126-140.
- [25] 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.
- [26] ABASI M, SAFFARIAN A, JOORABIAN M, et al. Fault classification and fault area detection in GUPFC-compensated double-circuit transmission lines based on the analysis of active and reactive powers measured by PMUs[J]. Measurement, 2020, 169(3).

收稿日期: 2021-08-31; 修回日期: 2021-11-08

作者简介:

黄丽芬(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 2580601370@qq.com

郝正航(1972—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为智能电网及其仿真技术。E-mail: haozhenghang@163.com

(编辑 魏小丽)