

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240092

分接开关可控移相变压器保护配置及故障特征分析

孙仲民, 顾乔根, 张晓宇, 郑超, 莫品豪, 王波

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 移相变压器是一种经济型的潮流调节设备, 可提高电网运行的安全性和经济性。为了实现分接开关可控移相变压器工程化应用, 首先, 针对电流电压互感器配置情况, 提出了移相变压器的主保护配置方案, 并分析了各保护元件的保护范围。其次, 提出了基于控保协同的差动计算自适应调整策略, 可根据分接开关的实时档位实现移相变压器差动保护计算的自适应调整。接着, 给出了基于移相变压器差动平衡的各侧电流校验方法, 可用于校验电流互感器的接入极性和参数。最后, 通过仿真和实际波形, 分析了不同故障下和空充时的波形特征以及保护的适应性, 并证明了所提方法和保护配置的有效性。

关键词: 移相变压器; 继电保护; 差动保护; 保护配置; 故障特征

Protection configuration and fault characteristics analysis of a tap-changer controllable phase-shifting transformer

SUN Zhongmin, GU Qiaogen, ZHANG Xiaoyu, ZHENG Chao, MO Pinhao, WANG Bo
(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: The phase-shifting transformer is a piece of economical power flow regulation equipment. It can improve the safety and economy of power grid operation. To realize the engineering application of a tap-changer controllable phase-shifting transformer, first, a main protection configuration scheme of a phase-shifting transformer is proposed from the configuration of current and voltage transformers, and the protection range of each protection element is analyzed. Secondly, a differential adaptive adjustment strategy based on the coordination of control and protection devices is proposed. This can provide that the differential protection calculation of the phase-shifting transformer can be adjusted adaptively according to the real-time tap position of the tap-changer. Then, a current calibration method based on the differential balance of the phase-shifting transformer is presented. This can be used to verify the polarity and parameter of each current transformer. Finally, the waveform characteristics and the adaptability of protection with different fault types and no-load switch-on scenario are analyzed by simulation and real waveform, and the effectiveness of the proposed methods and protection configuration are proved.

This work is supported by the National Key R & D Program of China (No. 2021YFB2401000).

Key words: phase-shifting transformer; relay protection; differential protection; protection configuration; fault characteristics

0 引言

潮流控制设备的应用可以有效地改善潮流分布并提高电网传输能力, 是电力系统重要的调控手段^[1-2]。移相变压器(phase-shifting transformer, PST)^[3]可以灵活地调节电压相位, 实现系统有功调节, 是一种更为经济的潮流控制电力设备。移相变压器从

结构上可以分为单芯和双芯类型^[4], 根据补偿后的电气特性, 又可以分为非对称型和对称型^[5]。双芯对称型移相变压器的有载调压开关与系统隔离, 适用于高电压等级, 是目前国际上已投运的移相器工程中采用较多的一种结构^[5]。

除了调节系统潮流的作用, 文献[6]提出了应用移相变压器实现输电线路在线融冰的方法。文献[7]将移相器接入特高压交直流系统, 用于解决直流小方式受进问题和大方式送出问题。文献[8]利用了晶

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2021YFB2401000)

闸管控制的可控移相器功率快速可控的特点，将其用于提升故障后系统的阻尼水平。文献[9]则将移相变压器用于解决相位差异较大时电网合环困难的问题。

含移相器的系统在进行系统分析时通常使用简化的稳态模型，但在暂态分析、故障电流计算等情况下，需要更全面的数学模型^[10]。文献[11]推导了总阻抗与单相绕组阻抗的关系，以及正序、负序及零序阻抗的计算方法。文献[12]则基于相分量法建立了移相器的全相数学模型，可用于不同故障情况下的电气量计算。文献[13]研究了移相器接入后对不对称短路电流的影响，并提出了实用计算方法。此外，双芯对称型移相器通常使用有载分接开关调节相位，为了准确地计算移相器有载分接开关的参数，文献[14-15]基于双芯移相变压器中有载分接开关，给出了负载条件下的级电压计算方式，并分析了不同负荷条件对级电压大小的影响。

移相变压器接入电网后改变了电网结构和相间耦合关系，此时需考虑移相因素对保护的影响^[16]。此外，由于受移相变压器等效内阻抗和电压移相角的影响，含移相变压器线路的距离保护测量阻抗不能正确反映故障距离，文献[17-18]分析了移相变压器对距离保护的影响，并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[19]根据零序故障分量计算虚拟阻抗，与对称双芯移相变压器的结构结合，构成了基于虚拟阻抗的移相变压器纵联保护。

目前国内高电压等级的移相变压器投运工程较少，且移相变压器对保护影响的研究主要集中在数学模型优化和线路保护方面，针对高电压等级的移相变压器本体保护研究较少。文献[20]将方向比较元件用作移相变压器保护，但是其不能反映故障严重程度。文献[21]提出了基于数据挖掘的移相变压器保护与分类方法，但特征提取时需要高频采样以及大量的训练样例。当前移相变压器工程仍主要采用差动保护作为移相变压器本体的主保护^[22]，文献[23]简要分析了各类型移相变压器的差动保护配置情况，并以双芯对称分级控制移相变压器为对象，分析了不同差动元件的保护范围和动作特性，但缺少对保护配置的详细分析。此外，当移相变压器本体发生故障时，其故障特征和对保护影响的相关研究也较少。

针对以上分析，本文以分接开关可控双芯对称移相变压器为研究对象，研究了移相变压器的主保护配置方案及各保护元件的保护范围，提出了差动计算自适应调整策略及各侧电流校验方法，最后通过仿真计算分析了不同故障点处的故障特征，可用

于支撑实际工程设计与研究。

1 移相变压器结构和原理

1.1 含可控分接开关移相变压器结构

对称双芯移相变压器基于两台独立变压器，一台从系统获取电压，称为并联变压器，又称励磁变压器；另一台将电压叠加到线路中，称为串联变压器。典型的含可控分接开关移相变压器结构如图 1 所示。图 1 中并联变副边为调压侧，且调压侧有多个分接头。当移相变压器在线调整档位时，可通过控制装置操作分接开关接入不同分接头，来改变并联变调压侧的输出电压，进而改变串联变串联侧电压，实现相位调节功能。

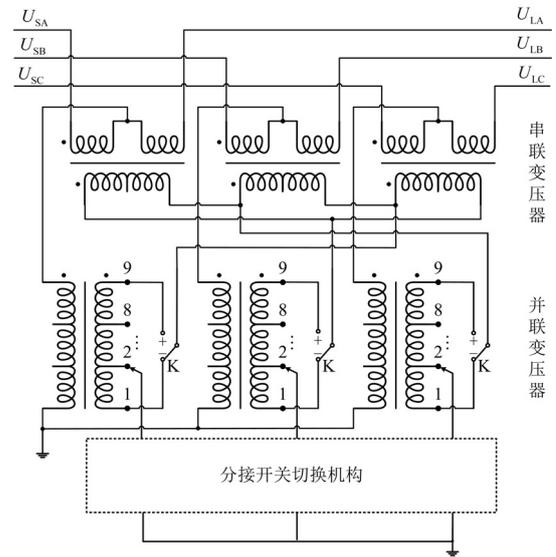


图 1 含可控分接开关的对称双芯移相变压器结构

Fig. 1 Symmetrical two-core phase-shifting transformer structure including controllable tap-changer

1.2 移相变压器基本原理

对称双芯移相变压器通过调节并联变副边电压来实现移相功能^[14]。图 2 为对称双芯移相变压器各侧电压相位图，其中， \dot{U}_{E1A} 、 \dot{U}_{E1B} 、 \dot{U}_{E1C} 分别为串联变串联侧绕组中点的三相电压，同时也是并联变原边三相电压， \dot{U}_{E2A} 、 \dot{U}_{E2B} 、 \dot{U}_{E2C} 分别为并联变副边三相电压。由于串联变角侧 A 相绕组电压为并联变副边 B、C 相线电压 \dot{U}_{E2BC} ，因此可得串联变串联侧绕组端电压 $\Delta\dot{U}_A$ 与 \dot{U}_{E1A} 的夹角为 90° 。记 \dot{U}_{SA} 为串联变 S 端电压， \dot{U}_{LA} 为串联变 L 端电压，可得 $|\dot{U}_{SA}| = |\dot{U}_{LA}|$ ，且两者的夹角 θ 即为移相变压器的空载移相角。

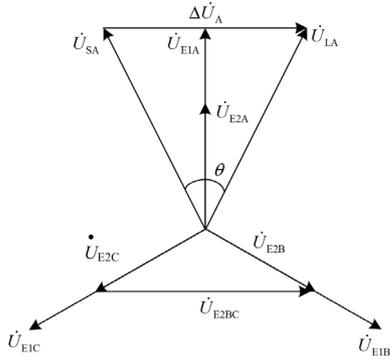


图 2 对称双芯移相变压器电压相位图

Fig. 2 Voltage phase diagram of symmetrical two-core phase-shifting transformer

2 移相变压器保护配置

2.1 电流电压互感器配置方案

移相变压器用于保护的电流互感器(current transformer, CT)及电压互感器(potential transformer, PT)配置如图 3 所示。其中 B1 和 B2 分别为串联变串联侧首端和尾端单相绕组, B3 为串联变角侧单相绕组, E1 和 E2 分别为并联变原边和副边单相绕组。

图 3 中各侧 CT 和 PT 的详细说明如表 1 所示。

2.2 差动保护动作原理

基于变压器磁平衡原理的纵差及分相差动保护可反映变压器各侧 CT 之间的相间故障、接地故障及匝间故障, 其动作方程^[24], 如式(1)所示。

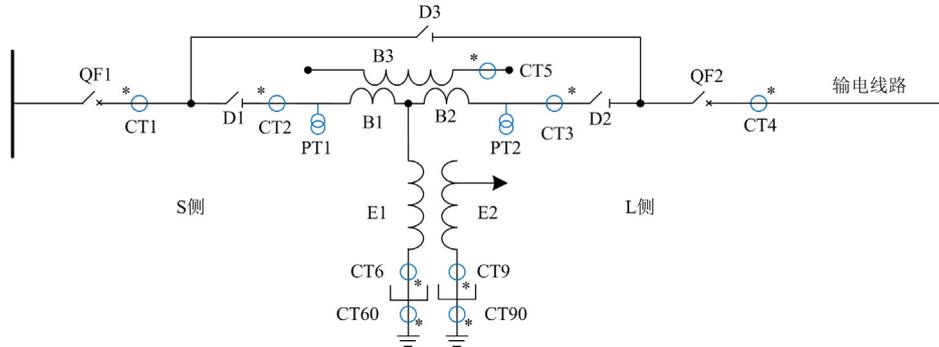


图 3 对称双芯移相变压器的互感器配置

Fig. 3 Instrument transformer configuration of the symmetrical two-core phase-shifting transformer

表 1 电流及电压互感器说明

Table 1 Description of current transformers and potential transformers

CT/PT	说明
CT1	进线开关 CT
CT2	串联变首端 CT
CT3	串联变尾端 CT
CT4	出线开关 CT
CT5	串联变角侧套管 CT
CT6	并联变原边 CT
CT9	并联变副边 CT
CT60	并联变原边外接零序 CT
CT90	并联变副边外接零序 CT
PT1	串联变首端电压 PT
PT2	串联变尾端电压 PT

$$\begin{cases} I_d > 0.2I_r + I_{cdqd} \\ I_d > K_{bl}(I_r - 0.5I_e) + 0.1I_e + I_{cdqd} \\ I_d > 0.75(I_r - 6I_e) + 5.5K_{bl}I_e + 0.1I_e + I_{cdqd} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $I_d = \left| \sum_{i=1}^{N_d} \dot{I}_i \right|$ 为差动电流, N_d 为用于差动计算的电流总数, \dot{I}_i 为变压器各分支调整后电流; $I_r = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_d} |\dot{I}_i|$ 为制动电流; I_e 为变压器归算侧的额定电流; I_{cdqd} 为差动启动定值; K_{bl} 为比率制动系数。

基于电流基尔霍夫定律的绕组差动保护可以反映绕组间各种相间故障、接地故障, 常用于直流输电系统中的换流变保护, 其动作方程可参考零序比率差动的动作方程^[24], 表示为

$$\begin{cases} I_{fd} > I_{fcdqd} \\ I_{fd} > K_{fbl}(I_{fr} - 0.5I_n) + I_{fcdqd} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $I_{fd} = \left| \sum_{i=1}^{N_f} \dot{I}_{fi} \right|$ 为绕组差差动电流, $I_{fr} = \max \{ |\dot{I}_{fi}| \}$ 为绕组差制动电流, \dot{I}_{fi} 为绕组各侧电流, N_f 为用于绕组差计算的电流总数; I_{fcdqd} 为绕组差启动定值; I_n 为 CT 二次额定电流; K_{fbl} 为绕组差比率制动系数。

2.3 主保护配置及保护范围

主保护类型与对应的 CT 配置如表 2 所示。其中，串联变纵差的保护范围以 CT2、CT3 和 CT9 为边界，包含串联变和并联变的副边绕组；串联变分相差的保护范围以 CT2、CT3 和 CT5 为边界，不包含串联变角侧出线。并联变纵差的保护范围以 CT6 和 CT9 为边界，包含并联变绕组部分，其中并联变绕组和串联变绕组间的引线不在保护范围内。移相变压器的纵差及分相差动保护范围如图 4 所示。

表 2 保护类型与 CT 配置

Table 2 Protection type and the CT configuration

保护类型	CT 配置
串联变纵差	CT2、CT3 和 CT9
串联变分相差	CT2、CT3 和 CT5
并联变纵差	CT6 和 CT9
绕组差	CT2、CT3 和 CT6
绕组大差	CT1、CT4 和 CT6

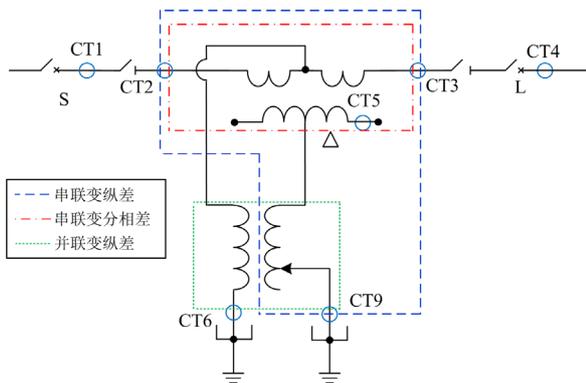


图 4 移相变压器纵差及分相差动保护范围

Fig. 4 Differential protection and phase-segregated current differential protection range of the PST

绕组差动的保护范围以 CT2、CT3 和 CT6 为边界，包含串联变串联侧绕组和并联变原边绕组。绕组大差差动的保护范围以 CT1、CT4 和 CT6 为边界，在绕组差的基础上包含了 CT1 和 CT2、CT3 和 CT4 之间的区域。配置绕组大差差动，一方面可以配合绕组差定位故障具体位置，另一方面在移相变压器退出的情况下，使 CT1 和 CT4 之间仍有主保护。移相变压器绕组差动保护范围如图 5 所示。

3 差动计算自适应调整及电流校验方法

3.1 基于控保协同的差动计算自适应调整策略

针对常见的带分接头的变压器，当分接开关偏移额定电压档位运行时，由于继电保护装置中额定电压参数不能自适应调整，会导致差动保护计算时产生不平衡电流。这种分接头偏移范围小，调档产

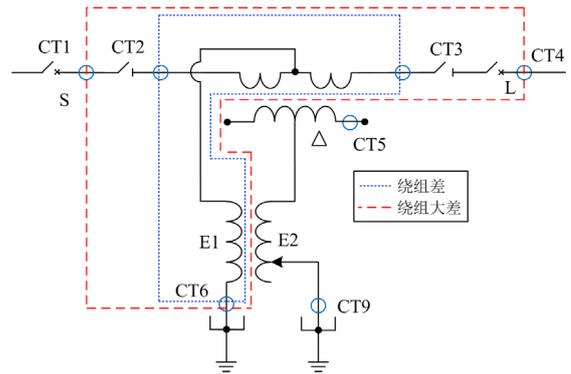


图 5 移相变压器绕组差动保护范围

Fig. 5 Winding differential protection range of the PST

生的差流幅值也较小，通常可利用差动启动定值和比例制动特性防止保护误动作。而移相变压器中的并联调压变压器，可以从中间档调整至正反极性满档位。因此若采用固定的额定电压参数时，不同档位下差动保护计算的差动电流偏差很大，比率制动特性不能可靠地制动保护，使变压器保护有误动风险，此时需要基于控保协同来实现差动保护的自适应调整。

保护装置通过与控制装置的通信，可实时获取移相变压器中并联变调档侧分接开关运行档位及档位状态信息。设当前档位为 m 档， $m \in [1, 2M - 1]$ ，且 m 为整数，其中 M 为中间档位，即运行至 M 档时，调档侧输出电压为零。令并联变原边钟点数为 12，则当 m 小于 M 时运行至反向档位，此时相当于调档侧钟点数为 6，当 m 大于 M 时运行至正向档位，此时相当于调档侧钟点数为 12。

计算调档侧 m 档下额定电压系数 k_m 为

$$k_m = \frac{U_{\text{tap}_m}}{U_{\text{tap}}} \quad (3)$$

式中： U_{tap_m} 为调档侧 m 档时的额定电压； U_{tap} 为调档侧在 $2M - 1$ 档下的额定电压。当 $m = M$ ，即在在中间档位时，调档侧额定电压 $U_{\text{tap}_m} = 0 \text{ kV}$ 。

计算并联变各侧在 $2M - 1$ 档下的额定电流分别为 I_{pri} 和 I_{tap} ，且各侧的平衡系数分别 K_{pri} 和 K_{tap} 。

计算并联变副边 m 档位下的校正平衡系数 K_{tap_m} 为

$$K_{\text{tap}_m} = \text{sgn}(m - M) \cdot k_m \cdot K_{\text{tap}} \quad (4)$$

其中：当 $m > M$ 时， $\text{sgn}(m - M) = 1$ ；当 $m < M$ 时， $\text{sgn}(m - M) = -1$ ；当 $m = M$ 时， $\text{sgn}(m - M) = 0$ 。

当并联变分接开关运行至 m 档时，非调压侧平衡系数仍为 K_{pri} ，调压侧平衡系数采用的校正平衡

系数为 $K_{\text{tap}, m}$, 由此可以计算当前 m 档位下调压变压器各侧校正后的调整电流, 再利用校正后的调整电流进行差动保护计算。

考虑到调档过程中可能出现接收档位和实际档位不一致的情况, 需要在并联变纵差的基础上增加一个不灵敏段纵差, 设置一个较高的启动值, 并适当调高制动特性曲线的斜率。当保护装置接收到正在调档的信号时, 并联变纵差可切换为不灵敏段, 防止保护误动作。串联变纵差及分相差不受调档影响, 按常规方式计算即可; 基于电平衡原理的绕组差也同样不受调档影响。

此外, 当保护装置接收的档位信号品质异常时, 会立即闭锁并联变差动保护, 并发出档位信息异常告警报文, 同时保护装置将档位信息异常发送至控制装置, 控制装置接收到保护装置的档位信息异常或者通信链路异常时, 会立刻闭锁移相变压器的调档功能, 并控制移相变压器逐步退出运行。

3.2 基于差动平衡的电流校验方法

为了分析对称双芯移相变压器各电流关系, 绘制简化的移相变压器三相结构, 如图 6 所示。以 A 相为例, 图 6 中: i_{SA} 和 i_{LA} 分别为移相变压器串联变串联侧 S 端和 L 端的电流; i_{S2A} 为串联变角侧电流; i_{P1A} 为并联变原边电流; i_{P2A} 为并联变副边电流; n_{SA} 、 n_{LA} 和 n_{S2A} 分别为串联变串联侧 S 端、L 端以及角侧绕组匝数; n_{P1A} 和 n_{P2A} 分别为并联变原、副边绕组匝数。

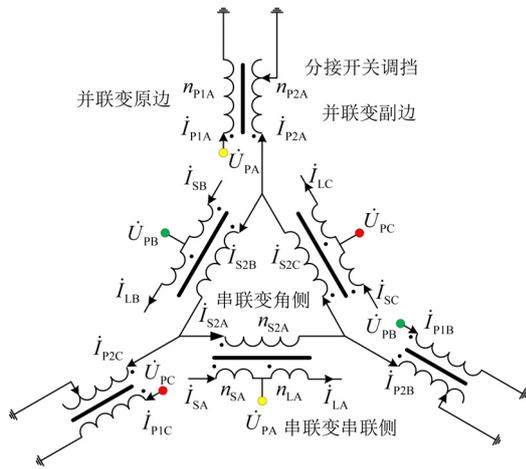


图 6 对称双芯移相变压器三相结构图

Fig. 6 Three-phase structure diagram of symmetrical two-core phase-shifting transformer

当并联变调档侧分接开关不为中间档位时, 由磁动势平衡可得式(5)和式(6)。

$$n_{\text{SA}} i_{\text{SA}} + n_{\text{LA}} i_{\text{LA}} + n_{\text{S2A}} i_{\text{S2A}} = 0 \quad (5)$$

$$n_{\text{P1A}} i_{\text{P1A}} + n_{\text{P2A}} i_{\text{P2A}} = 0 \quad (6)$$

由基尔霍夫电流定律可得式(7)和式(8)。

$$i_{\text{SA}} - i_{\text{LA}} = i_{\text{P1A}} \quad (7)$$

$$i_{\text{P2A}} = \sqrt{3} i_{\text{S2A}} e^{j\frac{\pi}{2}} \quad (8)$$

由于 $n_{\text{SA}} = n_{\text{LA}}$, 则串联变、并联变的绕组匝数与额定电压的关系如式(9)所示。

$$\begin{cases} \frac{n_{\text{SA}}}{n_{\text{S2A}}} = \frac{U_{\text{S1}}}{2\sqrt{3}U_{\text{S2}}} \\ \frac{n_{\text{P1A}}}{n_{\text{P2A}}} = \frac{U_{\text{P1}}}{U_{\text{P2}}} \end{cases} \quad (9)$$

式中: U_{S1} 、 U_{S2} 分别为串联变串联侧和角侧绕组额定电压; U_{P1} 、 U_{P2} 分别为并联变原边和副边额定电压。并联变副边实际投入额定电压 U_{P2} 受档位控制。

联立式(5)一式(9)可求解任一电流和其他电流的关系, 以已知 i_{SA} 为例, 各侧电流和 i_{SA} 的关系如式(10)所示。

$$M \mathbf{I}_x = \mathbf{I} \quad (10)$$

$$\text{式中: } M = \begin{bmatrix} n_1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & n_2 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\sqrt{3}e^{j\frac{\pi}{2}} & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{I}_x = \begin{bmatrix} i_{\text{LA}} \\ i_{\text{S2A}} \\ i_{\text{P1A}} \\ i_{\text{P2A}} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} -n_1 i_{\text{SA}} \\ 0 \\ i_{\text{SA}} \\ 0 \end{bmatrix}; \quad n_1 = \frac{U_{\text{S1}}}{2\sqrt{3}U_{\text{S2}}}; \quad n_2 = \frac{U_{\text{P1}}}{U_{\text{P2}}}.$$

最后, 移相变压器各侧电流 \mathbf{I}_x 表示为

$$\mathbf{I}_x = M^{-1} \mathbf{I} \quad (11)$$

考虑到 CT 的变比和极性, 由式(11)计算移相变压器各侧二次电流相量时, 需要除以 CT 变比, 如果 CT 极性和图 6 标注的电流方向相反, 需要将计算结果反相。

由于实际工程中移相变压器结构相对复杂, 且配置的 CT 较多, 增加了 CT 二次回路极性反接以及 CT 变比参数整定错误的的可能性, 因此可利用式(11)所示的电流校验方法, 在进行小电流通流试验时校验移相变压器各侧一、二次电流是否符合设计要求, 防止升流后因 CT 接入异常而导致的差动保护误动作。

4 仿真分析

根据实际工程参数搭建了基于控保协同的 RTDS 仿真平台, 系统主接线如图 7 所示, 其中 CT

安装位置和极性和图 3 一致。

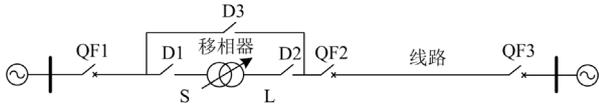


图 7 含移相变压器的电力系统仿真主接线图

Fig. 7 Power system simulation main wiring diagram with PST

通过刀闸 D1、D2 和 D3 可以决定移相器是否投入，当 D1 和 D2 合上且 D3 分开时，移相器投入；当开关 D1 和 D2 分开且 D3 合上时，移相器退出。仿真模型中移相变压器的一次设备主要参数见表 3。

表 3 移相变压器一次设备参数

Table 3 Primary equipment parameters of the PST

设备参数	整定值
串联变额定容量/MVA	15.404
串联变绕组额定电压/kV	16.106
串联变角侧绕组额定电压/kV	10.718
并联变额定容量/MVA	15.359
并联变原边额定电压/kV	114.714
并联变副边额定电压/kV	10.718
中间档位	9
最小档位	1
最大档位	17

图 7 中对称双芯移相变压器三相结构及故障位置如图 8 所示。

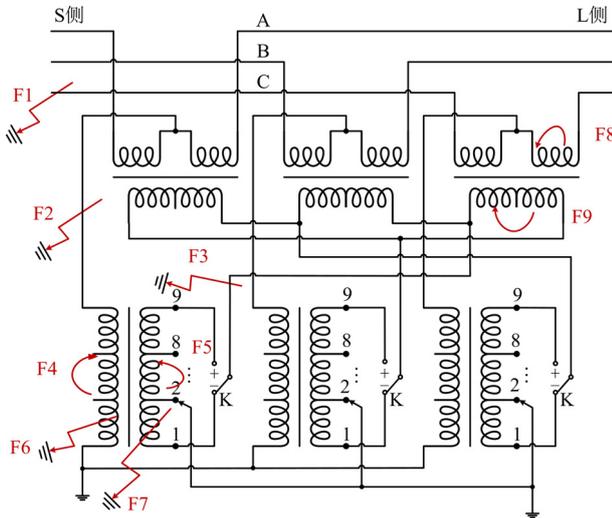


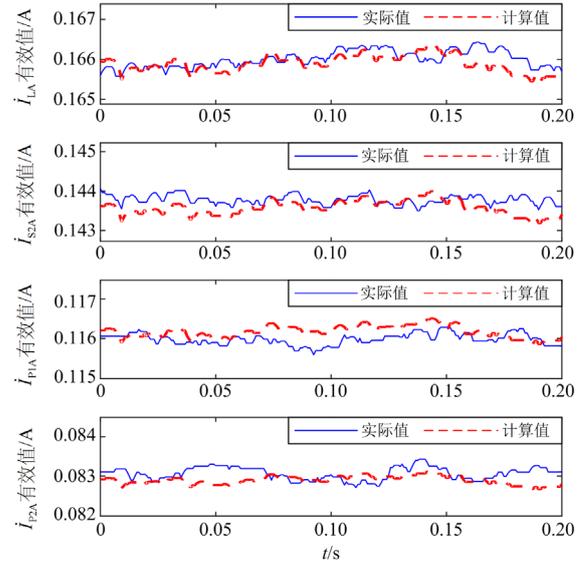
图 8 对称双芯移相变压器三相结构图及故障位置

Fig. 8 Three-phase structure diagram of symmetrical two-core phase-shifting transformer and the fault location

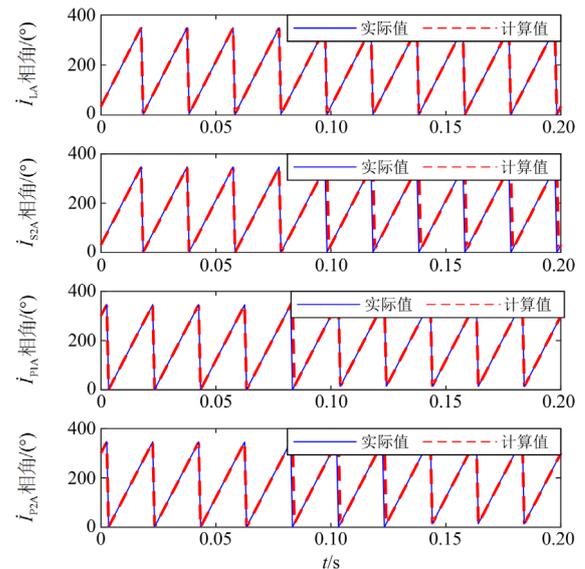
4.1 电流相量校验

以串联变压器首端 A 相电流 \dot{I}_{SA} 为基准量，由式(11)计算得到移相变压器其他各侧 CT 二次电流

相量和实际二次电流相量的比较结果，如图 9 所示。



(a) 二次电流有效值



(b) 二次电流相角

图 9 电流相量校验结果

Fig. 9 Current phasor validation results

由图 9 可知，实际采集电流和计算结果一致，可以认为 CT 的参数及接入极性与设计一致，也验证了基于差动平衡的电流校验方法的有效性。

4.2 差动电流计算比较

设移相变压器运行至 1 档时为基准档位，采用基准档位下固定的一次设备参数计算并联变纵差差流(方法一)，同时利用所提差动自适应调整方法计算并联变纵差差流(方法二)。不同档位下两种方法计算的并联变 A 相差流波形如图 10 所示。

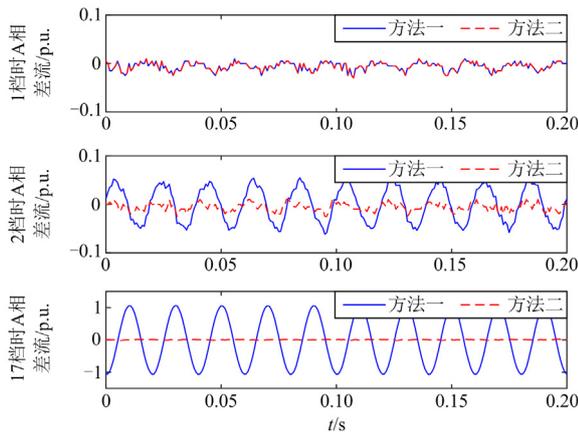


图 10 不同档位下并联变差流计算结果比较

Fig. 10 Comparison of differential current calculation results of parallel transformer at different tap positions

由图 10 可知, 当档位为 1 档时, 两种方法计算的差流非常小且结果相同。当档位调整至 2 档时, 在正常运行工况下方法一计算出的差流幅值增大至 0.05 p.u., 且运行档位与 1 档越远, 其计算得到的差流越大, 纵差保护越可能误动。采用差动自适应调整方法计算的差流在移相变压器正常运行时可始终保持在一个较低值。

4.3 区内金属性故障

当移相变压器在图 8 所示的 F1、F2 和 F3 处发生故障时, 并联变两侧尾端 CT 可采集各侧绕组电流, 且并联变正常传变, 因此并联变纵差无差流。当 F1 处故障时, 串联变首端 CT 采集的是 S 侧电源流过故障点的电流, 并非首端绕组电流, 使基于磁平衡原理的串联变纵差和分相差产生差流。同时, 由于主要的故障电流均流入故障点, 使基于电平衡原理的绕组差也会产生差流。当 F2 处故障时, 绕组差同样会产生差流, 但是串联变各侧 CT 采集电流均为绕组电流, 对纵差和分相差动而言, 故障电流为穿越性电流。当 F3 处故障时, 并联变副边尾端 CT 采集电流不等于串联变角侧流出电流, 使得串联变纵差不能平衡。

模拟 F1 处发生 A 相接地故障时移相变压器各侧电流波形, 如图 11 所示。图 11 中串联变串联侧首、尾端绕组流过较大的故障电流, 导致角侧套管 A 相电流增大, 进而使并联变原、副边的 B、C 相电流增大。由前文分析可知, F1 处故障点在串联变纵差、串联变分相差、绕组差以及绕组大差的保护范围内, 进一步计算得到各个差动保护的差流波形如图 12 所示。由图 12 可知, 当 F1 处发生 A 相接地故障时, 由于存在较大的故障电流, 串联变纵差、

串联变分相差、绕组差、绕组大差均可产生较大差流, 在此工况下, 不同档位对保护灵敏度的影响不大。

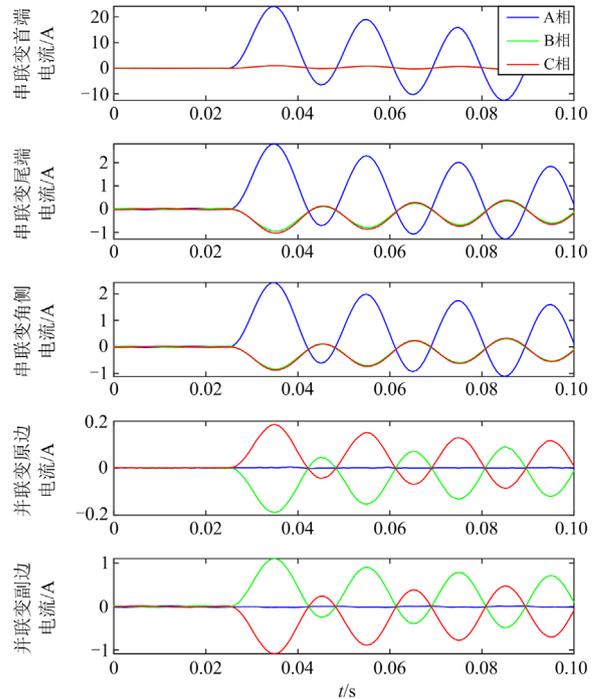


图 11 F1 处发生 A 相接地故障时电流波形

Fig. 11 Current waveforms of phase A grounding fault at F1

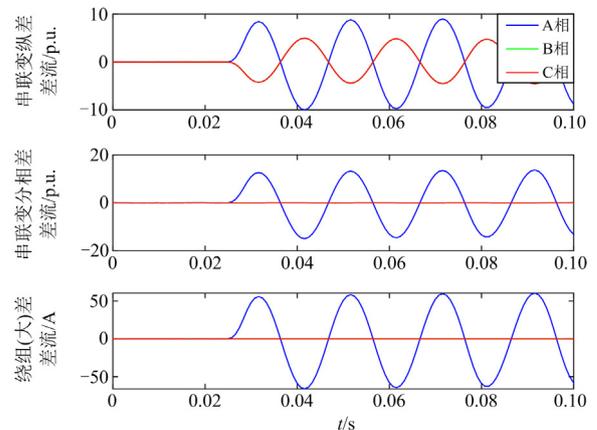


图 12 F1 处发生 A 相接地故障时差流波形

Fig. 12 Differential current waveforms of phase A grounding fault at F1

4.4 匝间故障

变压器本体故障通常是从匝间故障发展起来, 因此针对匝间故障, 保护需要具有足够的灵敏度和适应性。以并联变原边在 F4 处发生小匝间短路故障为例, 由于并联变容量较小, 其原边额定电压又为系统网侧额定电压, 因此原边额定电流较小。当发生匝间短路时, 其内部环流受电压影响变得很大,

使得并联变原边产生一个远大于额定电流的感应电流，导致计算得到的并联变纵差差流较大，纵差差动灵敏性较高。

模拟并联变原边在 F4 处发生 A 相 3% 匝间短路故障时，并联变各侧电流波形及并联变差流波形如图 13 所示。由图 13 可知，当并联变发生匝间短路时，并联变纵差差流很大，差动保护能够可靠动作。

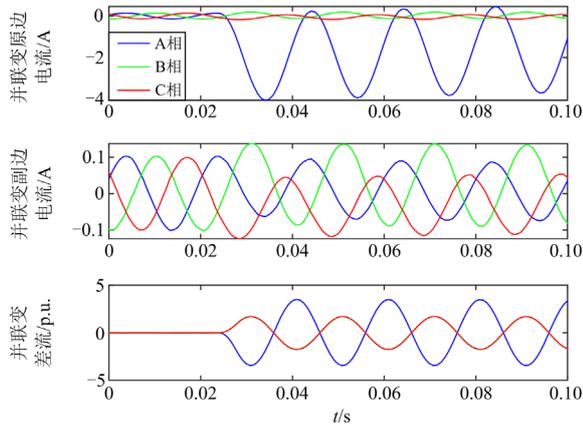


图 13 F4 处发生 A 相匝间短路故障时电流波形
Fig. 13 Current waveforms of phase A inter-turn short circuit fault at F4

当串联变发生匝间短路时，其故障电流受运行档位影响，当运行档位接近中间档位时，串联绕组的端间电压较小，此时若发生小匝间短路故障，差流也相对较小。

当移相变压器分接开关运行至 8 档时，模拟串联变在 F8 处发生 A 相 3% 匝间短路故障，得到串联变各侧电流波形及差流，如图 14 所示。图 14 中的串联变纵差差流较小，且故障期间串联变分相差差流有效值明显大于串联变纵差差流，因此采用不滤除零序分量的分相差可以更好地反映邻近中间档位时的串联变小匝间短路故障。

4.5 匝地故障

由于并联变原副边的 CT 安装在绕组接地端，当发生匝对地短路故障时，并联变故障侧 CT 采集电流为匝对地短路环流与故障侧绕组流过电流的复合电流。以并联变原边绕组匝地故障为例，由于短路环流很大，根据磁动势平衡原理，并联变原边绕组会产生一个较大的电流来抵消环流造成的磁动势。因此串联变首端和尾端电流流向并联变原边的和电流变大，且方向与并联变原边 CT 采集电流同向。由于差回路 CT 只采集短路环内的复合电流，因此基于磁平衡原理的并联变纵差保护会计算出较大差流，可以较好地反映该匝地故障。同时，由于是接地故障，因此绕组差和绕组大差也会有较大差流。

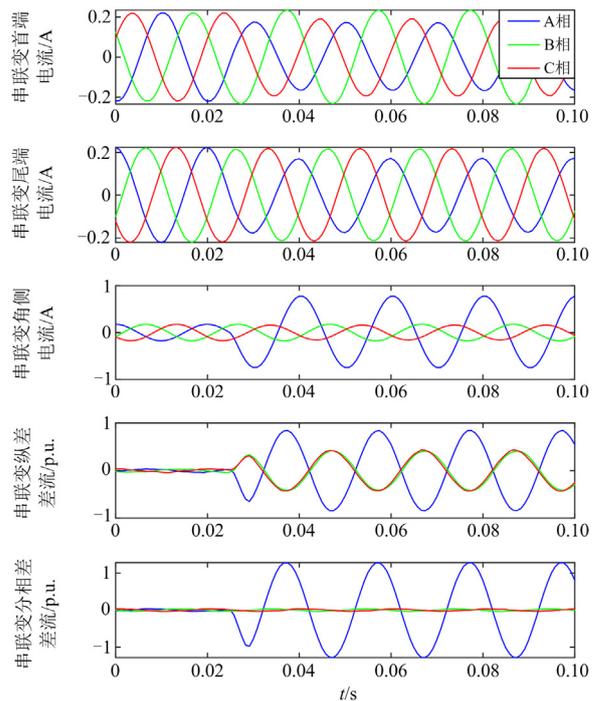
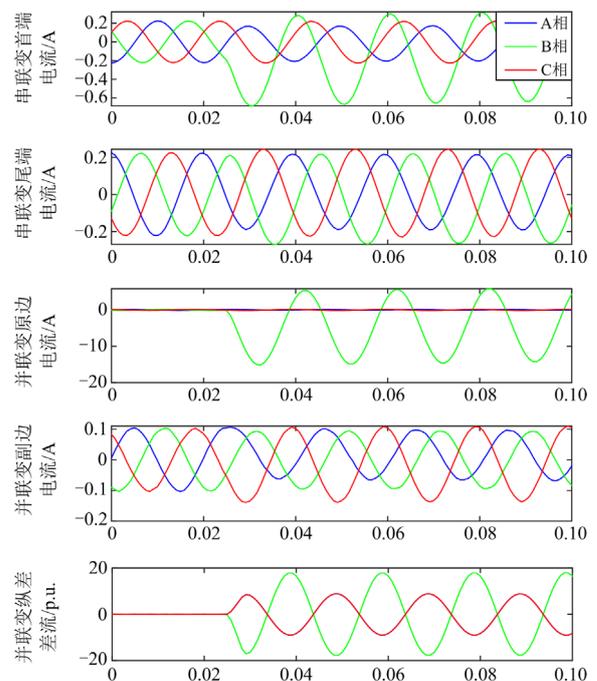


图 14 F8 处发生 A 相匝间短路故障时电流及差流波形
Fig. 14 Current waveforms and differential waveforms of phase A inter-turn short circuit fault at F8

当移相变压器分接开关运行至 1 档时，模拟串联变在 F6 处发生 B 相 20% 匝地短路故障，移相变压器各侧电流波形及并联变纵差和绕组差的差流波形如图 15 所示，仿真结果与分析一致。



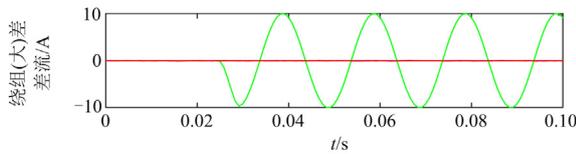


图 15 F6 处发生 B 相匝地短路故障时电流及差流波形
Fig. 15 Current waveforms and differential waveforms of phase B turn-to-ground short-circuit fault at F6

4.6 故障位置与动作元件

不同故障位置与保护动作元件的对应关系见表 4。发生故障时可通过分析保护动作元件, 推断故障发生位置, 便于运维人员迅速进行故障检修。此外, 表 4 所列的动作元件只是说明故障位置与动作元件的关系, 动作元件是否能够动作主要由故障特征决定, 只有当故障特征满足相关差动保护动作方程及动作判据时, 相应的保护才能正常动作。

表 4 故障位置与保护动作元件对应关系
Table 4 Fault locations and the corresponding protective action elements

故障位置	相关动作元件
F1	串联变纵差、串联变分相差、 绕组差动、绕组大差差动
F2	绕组差、绕组大差
F3	串联变纵差
F4	并联变纵差
F5	并联变纵差
F6	并联变纵差、绕组差动、 绕组大差差动
F7	并联变纵差、串联变纵差
F8	串联变分相差、串联变纵差
F9	串联变分相差、串联变纵差

4.7 空充分析

变压器空充时其铁芯磁链与合闸侧端间电压、合闸前铁芯剩磁以及合闸回路的电阻和电感相关^[25]。假设铁芯材料、剩磁以及合闸回路相差不大, 合闸侧的端间电压越高, 其稳态磁链幅值和铁芯磁密越大, 越容易产生励磁涌流^[26], 实际情况通常更加复杂。算例中的对称双芯移相变压器实际是由两台额定容量接近的变压器通过特殊接线方式构成, 因此同样存在空充励磁涌流的问题。由于空载合闸时并联变原边电压为系统侧电压, 其额定电压为 114.714 kV, 串联变端间电压受移相角限制不超过其额定电压 16.106 kV, 因此空充时并联变的铁芯通常比串联变的铁芯更易饱和, 其励磁涌流也会更严重。

实际移相变压器工程中, 保持 QF2 断开并合上

串联变首端开关 QF1 时, 移相变压器各侧电流波形如图 16 所示。移相变压器空充时, 并联变副边和串联变的角侧存在回路, 因此除了串联变压器断路器未合的一侧无电流, 其他各侧均流过电流。

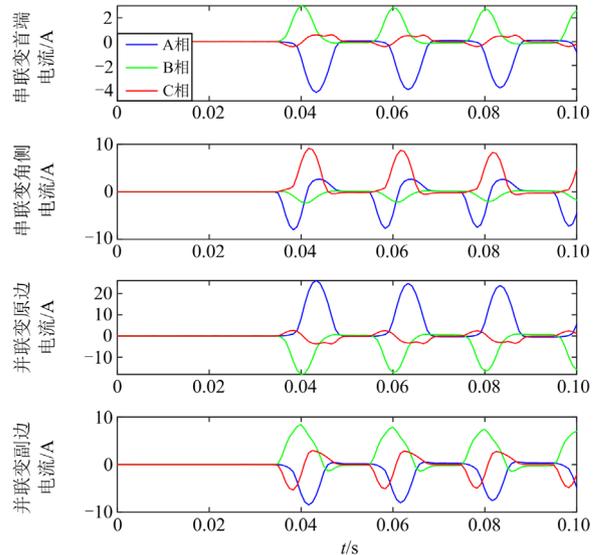
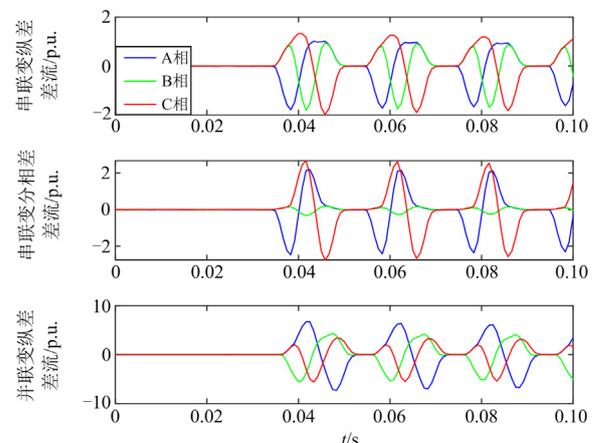


图 16 移相变压器空充励磁涌流波形

Fig. 16 Magnetizing inrush current waveforms of energizing the unloaded PST

由于空充时尾端 QF2 断开, 因此串联变尾端电流为零。由图 16 可知, 空充时串联变首端和并联变原边串联, 两处电流的一次值大小相等方向相反, 且具有明显的间断角特征, 表明移相变压器发生了励磁涌流现象。移相变压器空充时各差动保护的差流如图 17(a) 所示, 串联变纵差和并联变纵差均存在差流, 表明两台变压器铁芯均有不同程度的饱和。相较而言, 并联变纵差差流较大, 其铁芯饱和程度较高, 因此励磁涌流主要由并联变充电产生。



(a) 移相变压器空充时各差动保护差流

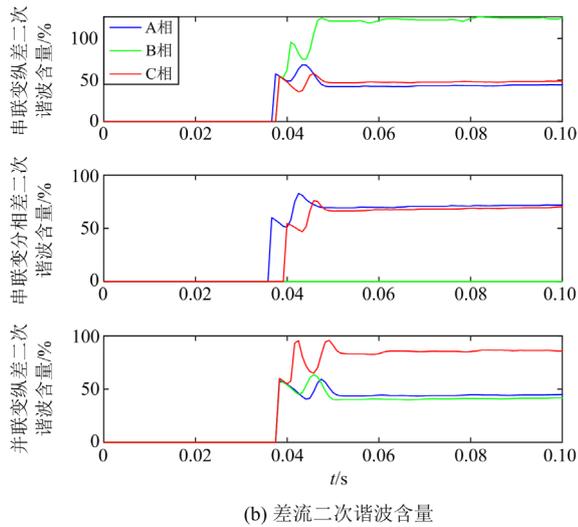


图 17 移相变压器空充差流及二次谐波含量

Fig. 17 Differential current waveforms and its secondary harmonic content

分析各差动保护中差流的二次谐波含量,如图 17(b)所示,差流畸变严重,二次谐波含量均在 40% 以上,因此目前常见的二次谐波制动方法可适用于移相变压器的空充情形。

5 结论

面向实际工程应用,针对分接开关可控移相变压器,提出了互感器及保护配置方案,并分析了故障特征,主要结论如下:

- 1) 所提保护配置方案的保护范围覆盖了全部移相变压器区内,保护的交叉配置有助于故障定位分析;
- 2) 提出了基于控保协同的差动计算自适应调整策略,使得移相变压器的分接开关在线调档时差动保护计算可自适应调整;
- 3) 采用基于差动平衡的电流校验计算方法,可对实际工程进行带电校验,提高了运行的可靠性;
- 4) 通过仿真和工程实际波形分析了各类故障下和空充时移相变压器各侧电流及差流特征,不仅验证了保护配置的正确性,还为工程化应用提供了思路。

参考文献

- [1] 裘鹏,唐爱红,徐华,等. 分布式潮流控制器控制保护策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 130-138. QIU Peng, TANG Aihong, XU Hua, et al. A control and protection strategy for a distributed power flow controller[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 130-138.
- [2] 张成泉,邹贵彬,张烁,等. 适用于多端柔性直流电网的潮流控制器[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(20): 32-40.

- ZHANG Chengquan, ZOU Guibin, ZHANG Shuo, et al. A current flow controller suitable for MTDC grids[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20): 32-40.
- [3] 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.
- [4] LIANG G, WANG L, GAO F, et al. A new maximum step voltage calculation method of on-load tap-changer for symmetrical two-core phase-shifting transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(6): 2718-2725.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 卫鹏,周前,朱鑫要,等. 可控移相器对特高压交直流接入受端电网影响研究[J]. 中国电力, 2018, 51(7): 7-12. WEI Peng, ZHOU Qian, ZHU Xinyao, et al. Research on impact of TCPST on receiving-end power grid with UHVAC and UHVDC accessing[J]. Electric Power, 2018, 51(7): 7-12.
- [8] 付俊波,常宝立,曹路,等. 可控移相器附加阻尼控制器设计研究[J]. 浙江电力, 2019, 38(11): 52-57. FU Junbo, CHANG Baoli, CAO Lu, et al. Design and research for TCPST additional damping controller[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(11): 52-57.
- [9] 杨用春,唐健雄,牛超群,等. 基于移相变压器的灵活合环控制装置及控制策略研究[J]. 华北电力大学学报, 2022, 49(1): 48-57. YANG Yongchun, TANG Jianxiong, NIU Chaoqun, et al. Research on flexible loop-closing control device and control strategy based on phase shifting transformer[J]. Journal of North China Electric Power University, 2022, 49(1): 48-57.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 李晓华, 陈镇生, 罗一杰, 等. 基于全绕组拓扑结构的移相变压器建模及应用[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(12): 101-106.
LI Xiaohua, CHEN Zhensheng, LUO Yijie, et al. Modeling and application of phase-shifting transformer based on full winding topology structure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(12): 101-106.
- [13] 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.
- [14] 刘欣, 梁贵书, 王利桐, 等. 双芯移相变压器中有载分接开关技术参数确定方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 838-844.
LIU Xin, LIANG Guishu, WANG Litong, et al. Calculation method for technical parameters of on-load tap changer in phase shifting transformer[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 838-844.
- [15] 高飞, 刘欣, 王利桐, 等. 对称双芯移相变压器中有载分接开关最大级电压计算方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 2110-2119.
GAO Fei, LIU Xin, WANG Litong, et al. Study on the maximum step voltage calculation method of on-load tap changer in symmetrical two-core phase shifting transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 2110-2119.
- [16] 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.
- [17] 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): 4591-4597.
CHEN Zhensheng, LI Xiaohua, LUO Yijie, et al. Distance protection strategies for lines containing phase shifting transformers[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4591-4597.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] KHAN U N, SIDHU T S. A phase-shifting transformer protection technique based on directional comparison approach[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5): 2315-2323.
- [21] BERA P K, ISIK C. A data mining based protection and classification of transients for two-core symmetric phase angle regulators[J]. IEEE Access, 2021, 9: 72937-72948.
- [22] GAJIC Z. Use of standard 87T differential protection for special three-phase power transformers—part I: theory[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1035-1040.
- [23] 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.
- [24] 陈松林, 李海英, 乔勇, 等. RCS-978 变压器成套保护装置[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(22): 52-56.
CHEN Songlin, LI Haiying, QIAO Yong, et al. RCS-978 digital transformer protection set[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(22): 52-56.
- [25] 郑玉平, 何大瑞, 潘书燕. 变压器铁芯饱和统一模型建立及其判别方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(24): 118-124.
ZHENG Yuping, HE Darui, PAN Shuyan. Unified model development and identification method of transformer core saturation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(24): 118-124.
- [26] 姚东晓, 邓茂军, 倪传坤, 等. 变压器多侧励磁涌流产生机理及对差动快速动作区影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 36-41.
YAO Dongxiao, DENG Maojun, NI Chuankun, et al. Transformer's multi-side inrush current generation mechanism and its influence on the differential protection's fast action zone[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 36-41.

收稿日期: 2024-01-11; 修回日期: 2024-02-27

作者简介:

孙仲民(1989—), 男, 通信作者, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护与智能运维; E-mail: sunzm@nrec.com

顾乔根(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: guqg@nrec.com

张晓宇(1981—), 男, 硕士, 研究员级高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: zhangxiaoyu@nrec.com

(编辑 许威)