

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240186

基于单芯移相变压器的差动保护配置研究

郑涛¹, 申由¹, 于佳旭¹, 眭程曦¹, 薛玉石², 张栋³

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206; 2. 国网石家庄供电公司, 河北 石家庄 050031;
3. 保定天威保变电气股份有限公司, 河北 保定 071000)

摘要: 移相变压器能够有效调控潮流, 为保障电力系统安全可靠运行, 为移相变压器配置性能优良的保护不可或缺。以某示范工程的 35 kV 单芯对称型移相变压器为研究对象, 提出相应的本体保护方案。首先, 基于基尔霍夫电流定律和电磁感应定律分析其运行特性。然后, 结合其拓扑结构, 设计了保护用电流互感器的安装位置, 构建了电平衡差动保护和磁平衡差动保护方案。此方案可覆盖单芯移相变压器内部各绕组和绕组引线相间故障以及各绕组匝间故障。最后, 基于 Matlab/Simulink 平台搭建单芯移相变压器模型, 通过设置本体内部典型故障, 验证了提出的两种差动保护配置方案的有效性。

关键词: 单芯移相变压器; 区内故障; 电平衡差动保护; 磁平衡差动保护

Differential protection configuration based on a single core phase shifting transformer

ZHENG Tao¹, SHEN You¹, YU Jiaxu¹, SUI Chengxi¹, XUE Yushi², ZHANG Dong³

(1. State Key Laboratory of New Energy Power System (North China Electric Power University), Beijing 102206, China;
2. State Grid Shijiazhuang Power Supply Company, Shijiazhuang 050031, China;
3. Baoding Tianwei Baobian Electric Co., Ltd., Baoding 071000, China)

Abstract: A phase-shifting transformer can effectively regulate the flow of electricity, and it is essential to equip it with high-performance protection devices to ensure the safe and reliable operation of the power system. Taking a 35 kV single-core symmetrical phase-shifting transformer as the research object, this paper proposes a corresponding protection scheme for the transformer. First, the operating characteristics of the transformer are analyzed based on Kirchhoff's current law and the law of electromagnetic induction. Then, based on its topological structure, the installation position of the protection current transformer is designed, and electrical and magnetic balance differential protection schemes are constructed. This scheme can cover the internal phase-to-phase faults and winding-to-winding faults of each winding and the winding lead of the single-core phase-shifting transformer. Finally, a single-core phase-shifting transformer model is built on the Matlab/Simulink platform by setting up typical faults within the transformer body, and the validity of the two differential protection configuration schemes proposed is verified.

This work is supported by the Joint Project of National Natural Science Foundation of China (No. U2166205).

Key words: single-core phase shifting transformer; internal fault; electric balance differential protection; magnetic balance differential protection

0 引言

随着电力系统的发展, 电网结构日趋复杂, 已成为包含高比例波动性新能源、多种类型负荷、不同电压等级设备、电力电子设备接入电网的交直流

混联系统, 这对电网的可靠经济运行提出了更高的要求^[1-3]。潮流调控能够有力地改善电力系统动态性能, 实现电能的高效利用。目前应用于实际工程的潮流控制器主要有两种类型——以移相变压器为代表的电磁型潮流控制器和以统一潮流控制器为代表的电力电子型潮流控制器^[4]。统一潮流控制器是目前功能最强大的潮流控制设备, 可连续、快速、独立地调节线路有功、无功功率, 但存在占地面积较

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目资助(U2166205);
国网河北省电力有限公司科技项目资助(kj2022-074)

将 CT3 安装在角接励磁绕组内部, 本示范工程具备 CT 角内安装条件。

表 1 各名称对应含义(ϕ 为 A、B、C 相别)

Table 1 Corresponding meaning of each name

(ϕ is phase A、B and C)

名称	含义
S_ϕ	输入端子
L_ϕ	输出端子
ϕ_s	调压绕组
$\phi_{s(1)}$	调压绕组(输入侧)
$\phi_{s(2)}$	调压绕组(输出侧)
ϕ_E	励磁绕组
$\dot{U}_{S\phi}$	移相变压器输入端子对地电压
$\dot{U}_{L\phi}$	移相变压器输出端子对地电压
$\dot{I}_{S\phi}$	流入调压绕组 $\phi_{s(1)}$ 非同名端的电流
$\dot{I}_{L\phi}$	流入调压绕组 $\phi_{s(2)}$ 同名端的电流
$\dot{I}_{\phi E}$	流入励磁绕组 ϕ_E 同名端的电流

1.2 移相变压器的基本原理

移相变压器种类繁多, 不同结构的移相变压器在绕组结构、接线形式、潮流控制效果等方面均有差异。本文针对单芯对称型移相变压器开展研究, “单芯型”指移相变压器的调节功能均由一台变压器完成; “对称型”指保证移相变压器输入侧、输出侧的电压(电流)幅值相同的情况下, 改变两侧电压(电流)的相位, 且电压和电流相位变化相同。移相变压器输入侧、输出侧电压(电流)相位的改变称为“移相”, 输出侧电压(电流)的相位超前于输入侧电压(电流)的相位, 称为“超前”, 输出侧电压(电流)的相位滞后于输入侧电压(电流)的相位, 称为“滞后”。移相变压器有超前和滞后两种运行方式, 可通过调节调压绕组上的极性转换器 SW, 切换运行方式。通过调节调压绕组上的若干个档位(即改变调压绕组接入系统中的匝数), 改变移相角的大小。

本文以 A 相电流相位滞后为例说明移相变压器的基本原理, B、C 相不再赘述。

单芯移相变压器基本原理结合图 2(a)来描述, 设 $\Delta \dot{I}_A$ 是从 A 相调压绕组中点 a 流向 BC 两相励磁绕组交点 A 的电流。在 a 点列写基尔霍夫电流方程可得, $\dot{I}_{SA} + \dot{I}_{LA} - \Delta \dot{I}_A = 0$; 在 A 点列写基尔霍夫电流方程可得, $\dot{I}_{CE} - \dot{I}_{BE} - \Delta \dot{I}_A = 0$ 。当移相变压器正常运行时, 结合相位关系可知 $\dot{I}_{CE} - \dot{I}_{BE} = j\sqrt{3}\dot{I}_{AE}$, 从而式(1)成立。

$$\dot{I}_{SA} + \dot{I}_{LA} = j\sqrt{3}\dot{I}_{AE} \quad (1)$$

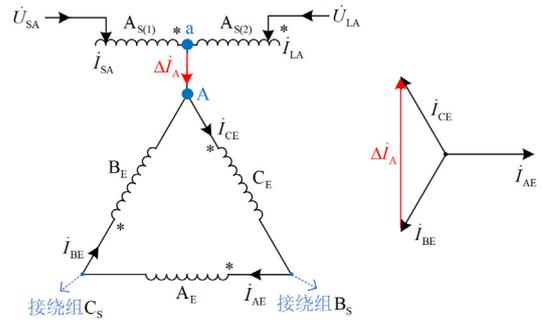
励磁绕组中的电流 \dot{I}_{AE} 与串联绕组 $A_{S(1)}$ 、 $A_{S(2)}$ 中的电流 \dot{I}_{SA} 、 \dot{I}_{LA} 相互感应。 $A_{S(1)}$ 和 $A_{S(2)}$ 的同名端以及接入系统中的匝数完全一致, 调压绕组 $A_{S(1)}$ 接入系统中的匝数与励磁绕组 A_E 匝数之比为 $k_S/2$, 同理调压绕组 $A_{S(2)}$ 与励磁绕组 A_E 的变比也为 $k_S/2$ 。三者的电流关系如式(2)所示。

$$\dot{I}_{SA} \times \frac{k_S}{2} - \dot{I}_{LA} \times \frac{k_S}{2} = \dot{I}_{AE} \quad (2)$$

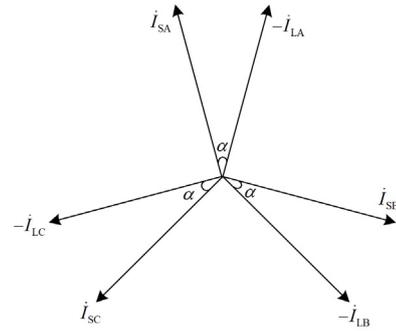
结合式(1)与式(2)可以得出 \dot{I}_{SA} 与 \dot{I}_{LA} 的关系为

$$-\dot{I}_{LA} = \frac{2 - j\sqrt{3}k_S}{2 + j\sqrt{3}k_S} \dot{I}_{SA} = e^{j\alpha} \dot{I}_{SA}, (\alpha < 0) \quad (3)$$

规定 \dot{I}_{SA} 与 \dot{I}_{LA} 的正方向均为从母线指线路。式中 α 表示移相角度, 可知 \dot{I}_{SA} 与 $-\dot{I}_{LA}$ 幅值相等, 且 $-\dot{I}_{LA}$ 滞后 \dot{I}_{SA} 的角度为 α 。具体可结合图 2(b)理解。



(a) 输入侧和输出侧电流相位的推导



(b) 三相输入侧和输出侧电流相量图

图 2 移相变压器电流滞后的工作原理

Fig. 2 Working principle of current lagging of phase-shifting transformer

电压移相与电流移相类似, 其基本原理如下: 励磁绕组 A_E 上会产生电压降 $\dot{U}_b - \dot{U}_c$, 此电压降将感应到调压绕组 A_S 上, 使输入侧电压 \dot{U}_{SA} 与输出侧电压 \dot{U}_{LA} 幅值不变、相位改变。

式中, \dot{I}_{KD2A} 、 \dot{I}_{KD2B} 、 \dot{I}_{KD2C} 分别表示流入 A、B、C 三相磁平衡差动继电器电流相量。

当正常运行和区外故障时, $\dot{I}_{KD2} = 0$; 当发生区内故障时, $\dot{I}_{KD2} \neq 0$ 。图 4 以 A 相磁平衡差动保护 KD2A 为例, 标出磁平衡差动保护需要的电流信息量。

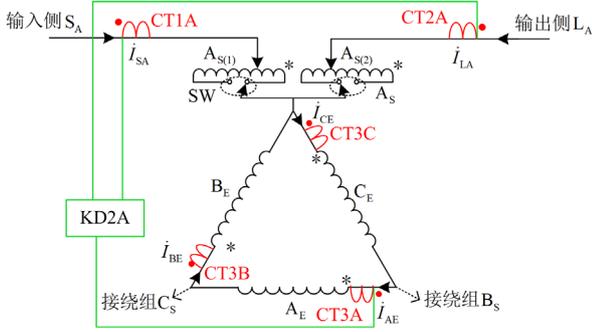


图 4 单芯移相变压器磁平衡差动保护说明

Fig. 4 Magnetic balance differential protection for single-core phase-shifting transformers

2.2.2 磁平衡差动保护的整定

为保证区内故障时磁平衡差动保护的灵敏度、区外故障时保护不误动, 磁平衡差动保护采用比率制动式差动保护。结合单芯移相变压器拓扑结构以及磁平衡差动保护 CT 的配置, 可得动作电流 I_{opA} 与制动电流 I_{resA} 取值(以 A 相为例说明), 如式(11)所示。

$$\begin{cases} I_{opA} = |\dot{I}_{KD2A}| \\ I_{resA} = \frac{1}{2} \left| k_S \frac{(\dot{I}_{SA} - \dot{I}_{LA})}{2} + \dot{I}_{AE} \right| \end{cases} \quad (11)$$

动作特性方程如式(12)所示。

$$\begin{cases} I_{op} > I_{op,0}, I_{res} < I_{res,g} \\ I_{op} > K(I_{res} - I_{res,g}) + I_{op,0}, I_{res} \geq I_{res,g} \end{cases} \quad (12)$$

式中: I_{op} 为磁平衡差动保护 KD2 的动作电流; I_{res} 为制动电流; $I_{op,0}$ 和 $I_{res,g}$ 分别为磁平衡差动保护的最小动作电流和拐点电流; K 为制动特性斜率。由式(10)、式(11)可知, 磁平衡差动保护的動作电流 I_{op} 和制动电流 I_{res} 均折算到励磁绕组侧, 故选取正常运行时流过三相励磁绕组电流的幅值 $|\dot{I}_E|$ 作为磁平衡差动保护的电流基准值。其中 $I_{op,0}$ 取 $(0.2 \sim 0.5)|\dot{I}_E|$, $I_{res,g}$ 取 $(0.6 \sim 1.1)|\dot{I}_E|$; 制动系数 K 取 $0.5 \sim 0.8$ 。

磁平衡差动保护 KD2 比率制动特性如图 5 所示。

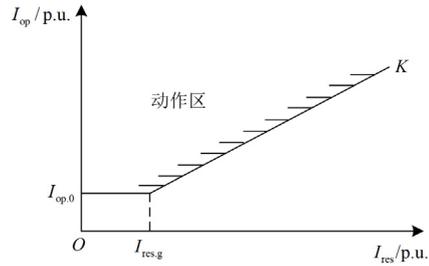


图 5 磁平衡差动保护比率制动特性

Fig. 5 Magnetic balance differential protection ratio braking characteristics

3 仿真验证

3.1 仿真模型

本文基于 35 kV 移相变压器的拓扑结构以及设备参数, 在 Matlab/Simulink 中搭建模型, 设置双端供电网络, 连接电源与移相变压器的线路等效为两个定值阻抗连接在移相变压器两端。两端电源均为 $35 \angle 0^\circ$ kV, 中性点不接地; 移相变压器两侧线路的正序阻抗均为 $0.0356 + j0.1233 \Omega$ 。仿真算例模型详见附录图 A1。移相变压器的参数如表 2 所示, 以移相变压器超前调节 10° 为例进行仿真验证。

表 2 移相变压器的参数

Table 2 Parameters of phase-shifting transformer

参数	数值
额定容量/MVA	20
额定电压/kV	35
空载移相角/ $^\circ$	-10~+10
额定频率/Hz	50
短路阻抗(移相角为 -10°)	3.7%
短路阻抗(移相角为 0°)	1.9%
短路阻抗(移相角为 $+10^\circ$)	3.7%
调相档位	-8~8

对于两种差动保护的整定, 本文根据大量仿真实验, 综合考虑变压器保护整定计算原则, 得到相关参数如表 3 所示。

在移相变压器的区内和区外分别设置典型的故障, 从理论判断和仿真验证两方面考察 KD1 和 KD2 的动作情况, 设置故障均在 $t = 0.06$ s 时发生。另外 35 kV 系统为小电流接地系统, 在仿真验证中不考虑接地故障。将各故障点的位置反映在移相变压器拓扑结构图中, 如图 6 所示。

各故障位置如表 4 所示。

表 3 两种差动保护整定的相关参数

Table 3 Relevant parameters of two differential protection tuning

保护方式	名称	参数值
电平衡差动 保护 KD1	基准电流(取输入侧电流 $ I_s $)/kA	0.479
	可靠系数 k_{rel}	1.2
	电流互感器同型系数 K_{st}	0.5
	非周期分量系数 K_{np}	1.2
	外部故障最大短路电流 $I_{k,max}$ /p.u.	10.647
磁平衡差动 保护 KD2	稳态不平衡电流 $I_{umb,max}$ /p.u.	0.639
	动作电流整定值 I_{set1} /p.u.	0.766
	基准电流(取励磁绕组电流 $ I_E $)/A	48.19
磁平衡差动 保护 KD2	制动特性斜率 K	0.8
	最小动作电流 $I_{op,0}$ /p.u.	0.2
	拐点电流 $I_{res,g}$ /p.u.	0.8

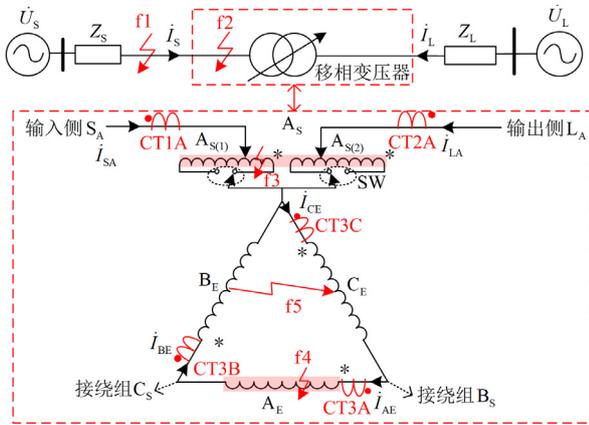


图 6 移相变压器差动保护验证测试电路及故障位置
Fig. 6 Phase-shifting transformer differential protection verification test circuit and fault location

表 4 仿真设置的故障位置

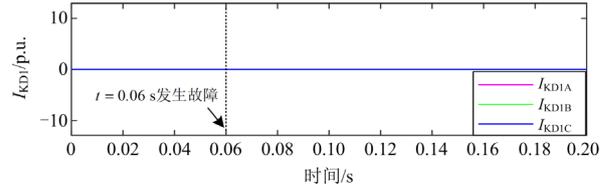
Table 4 Fault location of simulation setting

故障编号	故障位置	故障类型
f1	区外 输入侧 S_ϕ	相间短路
f2	调压绕组引线	相间短路
f3	调压绕组 A_s	匝间短路
f4	励磁绕组 A_E	匝间短路
f5	励磁绕组 B_E 、 C_E	相间短路

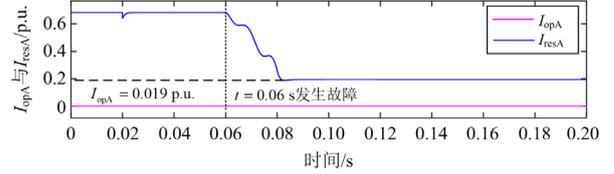
3.2 差动保护的有效性验证

3.2.1 调压绕组引线故障 f1(区外)

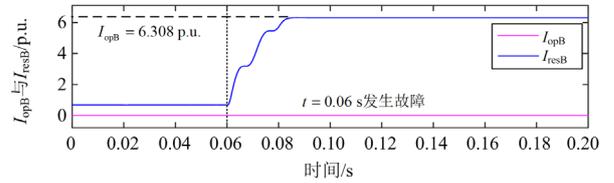
如图 7 所示,在 f1 处发生区外 BC 相间故障时,电平衡差动电流为 0;磁平衡差动保护各相制动电流均大于各相动作电流。由式(8)、式(12)判定条件可知,各相差动保护 KD1、KD2 均不动作。



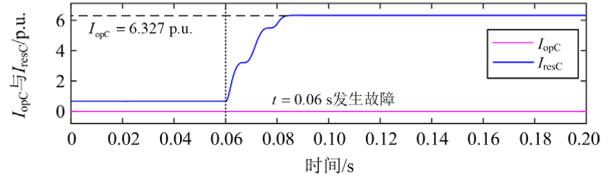
(a) f1故障三相电平衡差动电流波形



(b) f1故障A相磁平衡比率制动波形图



(c) f1故障B相磁平衡比率制动波形图



(d) f1故障C相磁平衡比率制动波形图

图 7 f1 故障仿真波形图

Fig. 7 Simulation waveform diagram of f1

3.2.2 调压绕组引线故障 f2(区内)

1) 电平衡差动保护

图 8(a)是调压绕组引线 f2 处发生 BC 两相短路时的电平衡差动电流波形图,可知 $I_{KD1A} = 0$, KD1A 不动作。 $I_{KD1B} = -I_{KD1C} \neq 0$,符合理论上发生相间故障时故障相电流的约束关系,由式(8)判定,BC 相电平衡差动电流大于整定值,满足动作条件, KD1B、KD1C 均可靠动作。

2) 磁平衡差动保护

由图 8(b)可知, A 相处于正常运行状态, $I_{KD2A} = 0$, KD2A 不动作。 $I_{KD2B} = -I_{KD2C} \neq 0$,需依据式(12)判断 KD2B、KD2C 是否动作。

图 8(c)和图 8(d)表示 BC 两相比率制动的波形图,经判断, $I_{opB} > K(I_{resB} - I_{res,g}) + I_{op,0}$, $I_{resB} > I_{res,g}$, $I_{opC} > K(I_{resC} - I_{res,g}) + I_{op,0}$, $I_{resC} > I_{res,g}$,故 KD2B、KD2C 均可靠动作。

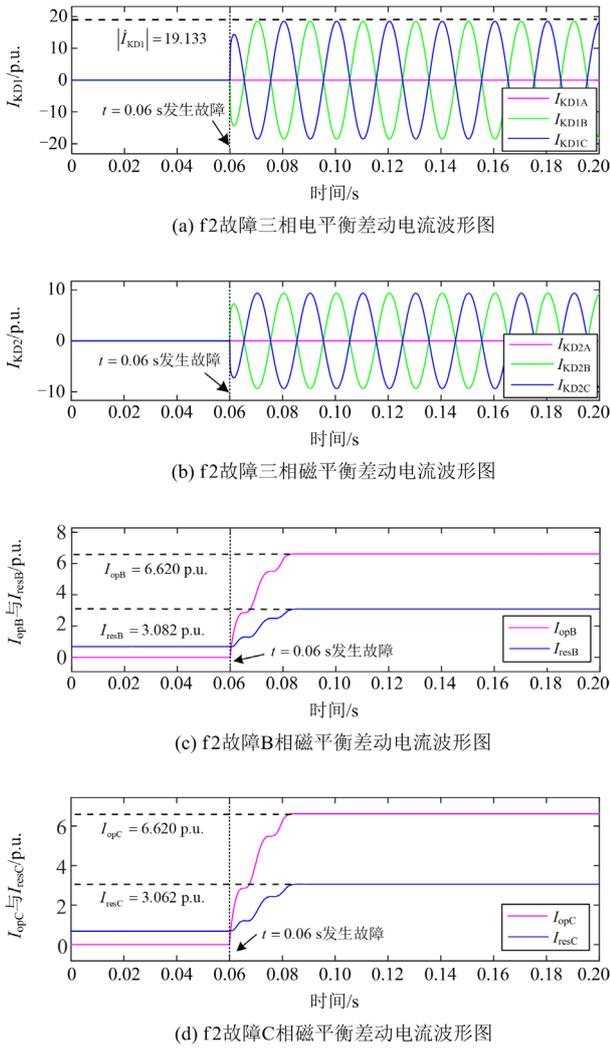


图 8 f2 故障仿真波形图

Fig. 8 Simulation waveform diagram of f2

3.2.3 调压绕组匝间故障 f3(区内)

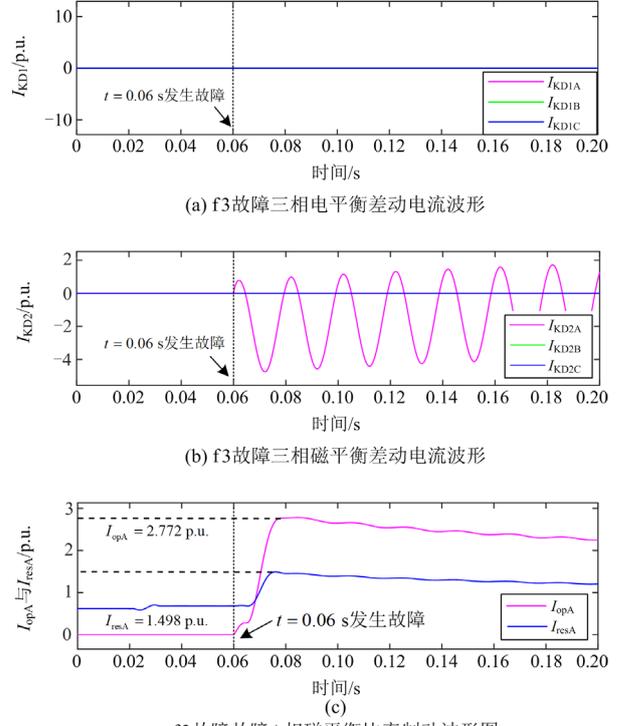
1) 电平衡差动保护

图 9(a)为调压绕组 A_s 发生 50%匝间 ($A_{s(1)}$ 100%匝间)故障时, 电平衡差动电流的波形图。当发生匝间故障时, 故障电流仍然满足基尔霍夫电流定律, $\dot{I}_{KD1} = 0$, KD1A 不动作。

2) 磁平衡差动保护

图 9(b)为调压绕组 A_s 发生 50%匝间 ($A_{s(1)}$ 100%匝间)故障时, 磁平衡差动电流的波形图。由于故障发生在 A 相, $\dot{I}_{KD2A} \neq 0$, 需依据式(12)判断 KD2A 是否可靠动作。非故障相 BC 相磁通依旧平衡, 故 $\dot{I}_{KD2B} = \dot{I}_{KD2C} = 0$, $I_{opB} = I_{opC} = 0$, 故 KD2B、KD2C 不动作。

图 9(c)为 A 相比率制动的波形图, $I_{opA} > K(I_{resA} - I_{res.g}) + I_{op.0}$, $I_{resA} > I_{res.g}$, 经判断, KD2A 可靠动作。



f3故障故障A相磁平衡比率制动波形图

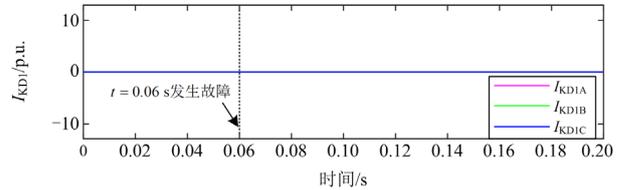
图 9 f3 故障仿真波形图

Fig. 9 Simulation waveform diagram of f3

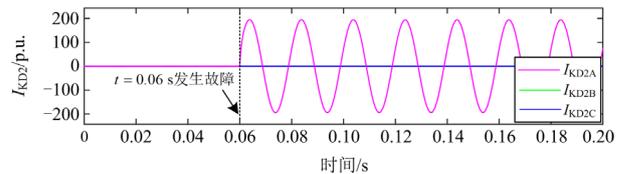
3.2.4 励磁绕组匝间故障 f4(区内)

1) 电平衡差动保护

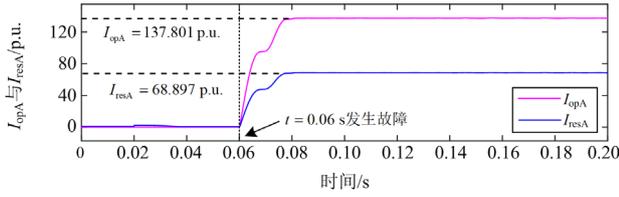
图 10(a)为励磁绕组 A_E 发生 100%匝间故障时, 电平衡差动电流波形图。当发生匝间故障时, 故障电流仍然满足基尔霍夫电流定律, $\dot{I}_{KD1} = 0$, KD1A 不动作。



(a) f4故障三相电平衡差动电流波形



(b) f4故障三相磁平衡差动电流波形



(c) f4故障A相磁平衡比率制动波形

图 10 f4(励磁绕组 A_E100%匝间故障)故障仿真波形图
Fig. 10 Simulation waveform diagram of f4
(A_E occurs 100% interturn fault)

2) 磁平衡差动保护

图 10(b)为励磁绕组 A_E 发生 100%匝间故障时, 磁平衡差动电流波形图。故障发生在 A 相, $\dot{I}_{KD2A} \neq 0$, 仍需依据式(12)判断 KD2A 是否可靠动作。非故障相磁通依旧平衡, $\dot{I}_{KD2B} = \dot{I}_{KD2C} = 0$, $I_{opB} = I_{opC} = 0$, 故 KD2B、KD2C 不动作。

图 10(c)中, $I_{opA} > K(I_{resA} - I_{res.g}) + I_{op.0}$, $I_{resA} > I_{res.g}$, KD2A 可靠动作。

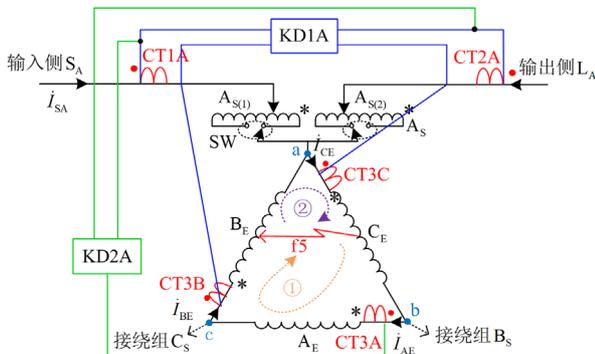
3.2.5 励磁绕组相间故障 f5(区内)

1) 电平衡差动保护

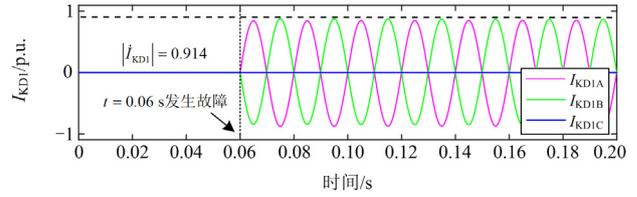
发生 f5 故障, 在角接三相励磁绕组内形成两个故障环流①和②, 如图 11(a)所示, CT3A 和 CT3B 同处于故障环流①, 故在 \dot{I}_{AE} 和 \dot{I}_{BE} 上叠加的故障电流相等, 因此在 c 点处列写的基尔霍夫电流方程依旧成立, $\dot{I}_{KD1C} = 0$, KD1C 不动作; 同理可分析 $\dot{I}_{KD1A} \neq 0$, $\dot{I}_{KD1B} \neq 0$, 进一步由式(8)判定 KD1A、KD1B 能够可靠动作。图 11(b)表示 f5 处发生励磁绕组 B_E、C_E 相间故障时电平衡差动电流波形。

2) 磁平衡差动保护

图 12(a)表示 f5 处发生励磁绕组 B_E、C_E 相间故障时磁平衡差动电流波形。由图 12(b)可知, 在发生故障后, $\dot{I}_{KD2A} = 0$, 故 KD2A 不动作。 $\dot{I}_{KD2B} = -\dot{I}_{KD2C} \neq 0$, 需依据式(12)判断 KD2B、KD2C 是否可靠动作。



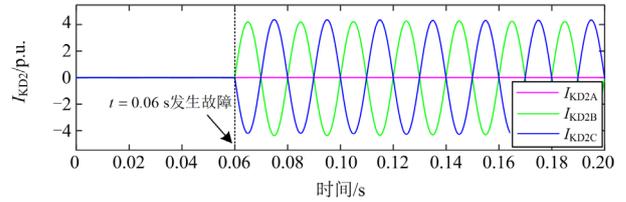
(a) f5故障电平衡差动保护动作情况分析



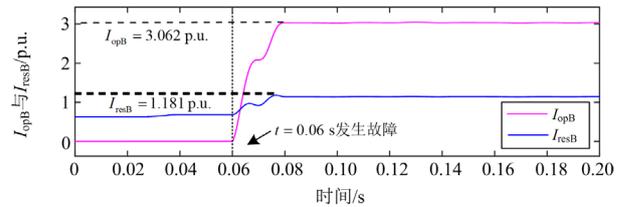
(b) f5故障三相电平衡差动电流的波形

图 11 f5 故障电平衡差动仿真波形图

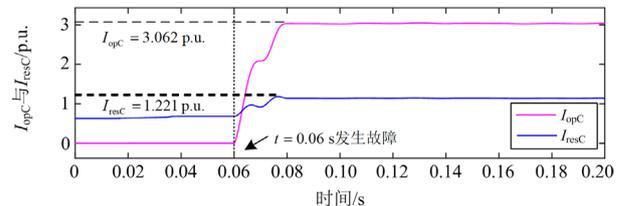
Fig. 11 Electrical balance differential simulation waveform diagram of f5



(a) f5故障三相磁平衡差动电流的波形



(b) f5故障B相磁平衡比率制动波形图



(c) f5故障C相磁平衡差动电流波形图

图 12 f5 故障磁平衡差动仿真波形图

Fig. 12 Magnetic balance differential simulation waveform diagram of f5

图 12(b)和图 12(c)分别表示 BC 两相比率制动的波形图, $I_{opB} > K(I_{resB} - I_{res.g}) + I_{op.0}$, $I_{resB} > I_{res.g}$, $I_{opC} > K(I_{resC} - I_{res.g}) + I_{op.0}$, $I_{resC} > I_{res.g}$, 故 KD2B、KD2C 可靠动作。

通过在不同位置设置不同的故障类型, 可以清晰得知: 在发生区外故障时, 电平衡差动保护 KD1 和磁平衡差动保护 KD2 均不误动。在发生区内相间故障时, KD1 和 KD2 均能够可靠动作; 在发生区内匝间故障时, KD1 不误动, KD2 可靠动作。不同故障位置下的保护动作情况如表 5 所示。

表 5 不同故障下保护的動作情况(均分析 A 相差动保护動作情况)

Table 5 Protection action when a fault occurs (analysis of phase A differential protection action)

故障区域	故障类型	电平衡差动保护 KD1			磁平衡差动保护 KD2			
		差动电流 $I_{KD1}/p.u.$	动作阈值/p.u.	动作情况	$I_{op}/p.u.$	$I_{res}/p.u.$	动作情况	
无故障	—	0	0.766	×	0	0.950	×	
区外故障	输入侧 f1	三相短路	0	0.766	×	0	7.280	×
		AB 两相短路	0	0.766	×	0	6.303	×
区内故障	调压绕组引线 f2	三相短路	21.503	0.766	√	7.379	3.782	√
		AB 两相短路	19.334	0.766	√	6.620	3.082	√
	A 相调压绕组 f3	匝间 100%	0	0.766	×	3.161	1.617	√
		匝间 50%	0	0.766	×	2.772	1.498	√
		匝间 25%	0	0.766	×	1.617	0.898	√
	A 相励磁绕组 f4	匝间 12.5%	0	0.766	×	0.904	0.528	√
		匝间 100%	0	0.766	×	137.801	69.253	√
		匝间 50%	0	0.766	×	8.237	4.303	√
		匝间 25%	0	0.766	×	3.122	1.795	√
	励磁绕组相间 f5	匝间 8%	0	0.766	×	0.957	0.600	√
BC 两相 相间短路		0.914 (B 相)	0.766 (B 相)	√	3.062 (B 相)	1.181 (B 相)	√	

注：“√”表示保护动作，“×”表示保护不动作。

3.3 相间故障时差动保护的動作情况

由 3.2.5 节可知, 在发生励磁绕组相间故障 f5 时, 由于三相励磁绕组角形连接, 故存在发生相间故障

时, 电平衡差动保护 KD1 相别不对应的特殊情况。结合调压绕组相间故障 f2 和励磁绕组相间故障 f5, 统一说明发生相间故障时保护動作情况, 如表 6 所示。

表 6 相间故障时差动保护的動作情况

Table 6 Action of differential protection in case of interphase fault

故障区域	故障类型	电平衡差动保护 KD1			磁平衡差动保护 KD2		
		KD1A	KD1B	KD1C	KD2A	KD2B	KD2C
区内故障	AB 两相短路	√	√	×	√	√	×
	调压绕组相间 f2	×	√	√	×	√	√
	CA 两相短路	√	×	√	√	×	√
	AB 两相短路	√	×	√	√	√	×
	励磁绕组相间 f5	√	√	×	×	√	√
	CA 两相短路	×	√	√	√	×	√

注：“√”表示保护动作，“×”表示保护不动作。

3.4 差动保护的保護配置说明

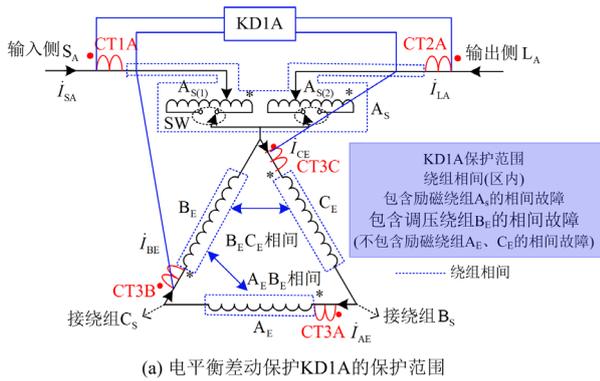
单芯对称型移相变压器本体配置一组电平衡差动保护 KD1 和一组比率制动式磁平衡差动保护 KD2, 各差动保护的保護范围如表 7 所示。

3.2.2 节和 3.2.5 节说明了发生相间故障时差动保护的動作情况; 3.2.3 节和 3.2.4 节说明了发生匝间故障时差动保护的動作情况。结合图 6 中设置的 f1—f5 相间、匝间故障, 图 13(a)具体说明 KD1A 的保護范围; 图 13(b)具体说明 KD2A 的保護范围。

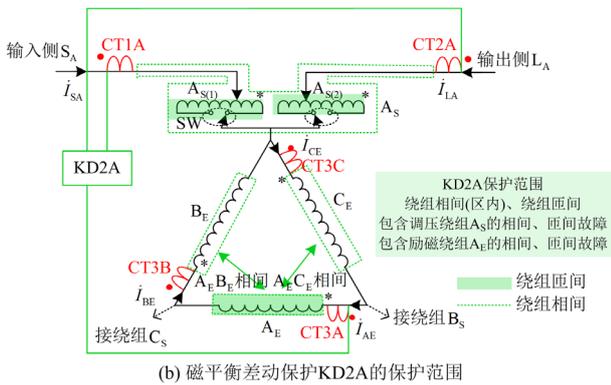
表 7 各差动保护的保護范围(A 相为例)

Table 7 Protection range of each differential protection (Phase A for example)

差动保护	使用 CT	保護范围
电平衡差动 保护 KD1A	CT1A、CT2A CT3B、CT3C	调压绕组 A_S 引线相间(区内); 含励磁绕组 B_E 相间
磁平衡差动 保护 KD2A	CT1A、CT2A、 CT3A	调压绕组 A_S 引线相间(区内); 调压绕组 A_S 、励磁绕组 A_E 匝间含励磁绕组 A_E 相间



(a) 电平衡差动保护KD1A的保护范围



(b) 磁平衡差动保护KD2A的保护范围

图 13 各差动保护的保护区

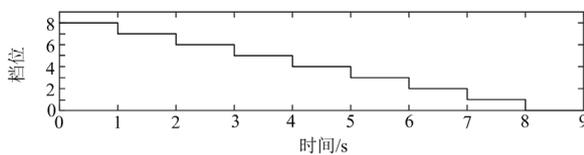
Fig. 13 Protection range of each differential protection

4 单芯移相变压器本体保护的的特殊问题

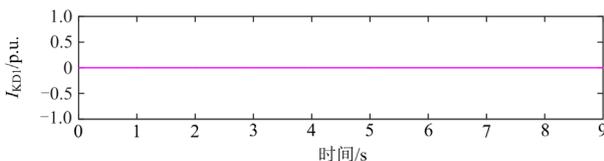
4.1 档位调节对本体保护的影响

考虑到移相变压器需要根据电力系统实际运行状态调节移相角度，本文进一步研究了在正常运行状态下，进行档位切换时本体保护是否误动这一问题。仿真设置每间隔 1 s，档位递减，即从正 8 档（超前 10°），连续调节到 0 档。0 档运行即调压绕组不接入系统中，移相变压器移相角度为 0°。具体仿真结果见图 14。

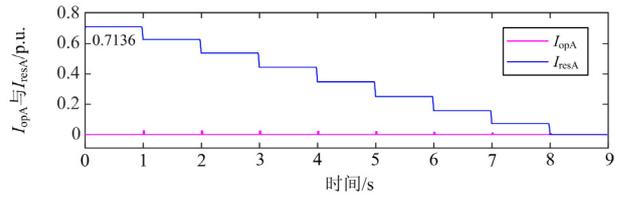
从图 14 中可以直观看出：间隔 1 s 进行档位切换时，从 8 档调节到 0 档过程中，始终存在 $i_{KD1} = 0$ ，



(a) 档位调节



(b) 电平衡差动保护KD1动作情况



(c) 磁平衡差动保护KD2动作情况

图 14 本体保护动作情况

Fig. 14 Action of the body protection

故 KD1 不误动；磁平衡差动保护制动电流大于动作电流，即 $I_{resA} > I_{opA}$ ，故 KD2 不会误动，故档位调节过程不会造成差动保护误动。

4.2 空载合闸时励磁涌流对本体保护的影响

图 15 分析了移相变压器空载合闸时励磁涌流对本体保护的影响。控制移相变压器输出侧 L_A 、 L_B 、 L_C 空载，即断路器 QF2 断开。输入侧 S_A 、 S_B 、 S_C 在 $t = 0.06$ s 时刻断路器 QF1 合闸，设置合闸角为 0°。在空载合闸时三相调压绕组中点 a、b、c 仍然满足基尔霍夫电流定律，故励磁涌流不会导致 KD1 误动；由于移相变压器输出侧空载，故不再满足磁平衡差动方程式(9)，即空载合闸时产生的不平衡电流会导致 KD2 误动。图 16 是空载合闸时三相励磁涌流部分波形，表 8 为三相励磁涌流谐波含量分析。对励磁涌流进行傅里叶分解可知：A 相励磁涌流为对称性励磁涌流，涌流幅值小；B、C 两相励磁涌流中含有大量的非周期分量，使波形偏于时间轴的一侧，同时含有大量二次谐波，出现波形间断现象。

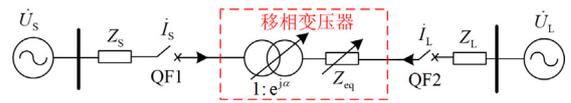
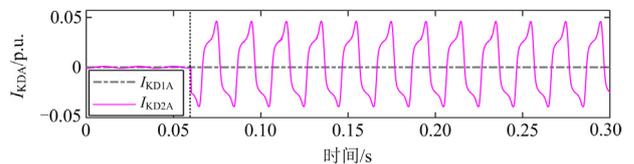
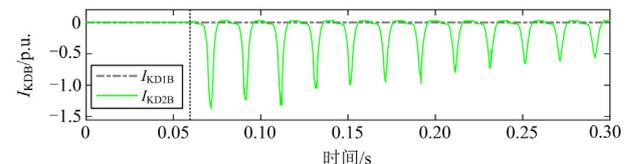


图 15 空载合闸示意图

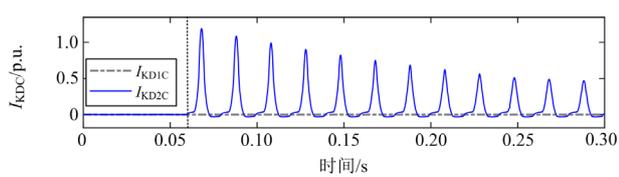
Fig. 15 No-load closing diagram



(a) A相励磁涌流



(b) B相励磁涌流



(c) C相励磁涌流

图 16 合闸角为 0° 时三相励磁涌流Fig. 16 Three-phase inrush current with a closing angle of 0°

表 8 励磁涌流谐波含量

Table 8 Harmonic content of excitation inrush current

谐波含量	直流/基波	二次谐波/基波	三次谐波/基波	%
A 相	3.70	4.12	31.14	
B 相	55.61	72.12	45.14	
C 相	53.63	70.20	45.38	

仿真结果表明, 当空载合闸后, 三相电平衡差动保护不会误动, 三相磁平衡差动保护均误动。由于励磁涌流很大, 因此, 若采用抬高动作电流来躲过其影响, 势必极大地降低了差动保护内部故障时的灵敏度。为此工程中常采用二次谐波制动等方法克服励磁涌流对差动保护的影响^[23], 这对于移相变

附录 A

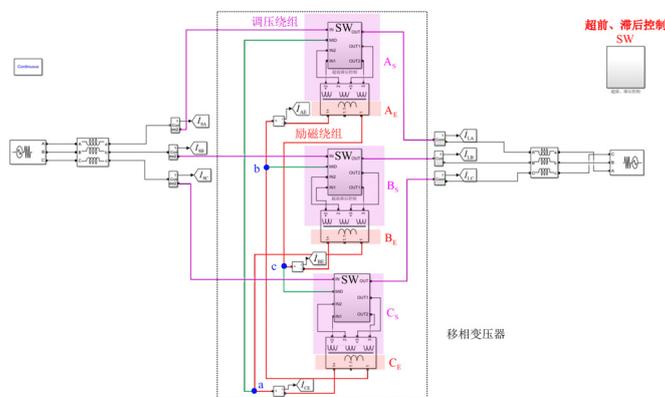


图 A1 仿真模型

Fig. A1 Simulation model

参考文献

- [1] 王增平, 林一峰, 王彤, 等. 电力系统继电保护与安全控制面临的挑战与应对措施[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 10-20.
WANG Zengping, LIN Yifeng, WANG Tong, et al. Challenges and countermeasures to power system relay protection and safety control[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 10-20.
- [2] 郝文斌, 孟志高, 张勇, 等. 新型电力系统下多分布式电源接入配电网承载力评估方法研究[J]. 电力系统保

护与控制, 2023, 51(14): 23-33.

5 结论

移相变压器发生故障会对电力系统供电可靠性和安全稳定运行带来严重影响, 本文根据单芯对称型移相变压器特殊的拓扑结构与电流关系, 设计保护用 CT 的安装位置, 结合其运行特性, 构建单芯对称型移相变压器本体差动保护方案, 并通过仿真验证所配置差动保护方案的有效性, 所得结论如下。

1) 基于基尔霍夫电流定律分析单芯移相变压器输入侧、输出侧调压绕组与励磁绕组的电流关系, 配置电平衡差动保护 KD1。

2) 基于磁通平衡关系分析单芯移相变压器输入侧、输出侧调压绕组与励磁绕组的电流关系, 并针对绕组匝间故障, 配置磁平衡差动保护 KD2。

本文所配置的两组差动保护相配合, 可覆盖单芯移相变压器所有内部故障, 为单芯移相变压器的主保护配置提供了参考方案。同时研究了单芯移相变压器档位调节以及励磁涌流对本体保护的影响。后续可开展后备保护研究工作及动态模拟测试进一步验证方案的正确性。

护与控制, 2023, 51(14): 23-33.

- HAO Wenbin, MENG Zhigao, ZHANG Yong, et al. Carrying capacity evaluation of multiple distributed power supply access to the distribution network with the background of a new power system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 23-33.
- [3] CAI G, ZHOU S, LIU C, et al. Hierarchical under frequency load shedding scheme for inter-connected power systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(2): 556-567.
- [4] 袁佳歆, 许顺凯, 余梦泽, 等. 一种配电网多线路混合式

- 统一潮流控制器[J]. 电力工程技术, 2023, 42(1): 2-10.
- YUAN Jiabin, XU Shunkai, YU Mengze, et al. A multi-line hybrid unified power flow controller for distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(1): 2-10.
- [5] 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. et al. Review on application of flexible power flow control technology[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(1): 50-60.
- [6] 黄丽芬, 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 Lishu, 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.
- [7] IEEE guide for the application of protective relaying for phase-shifting transformers: IEEE Std C37. 245 — 2018[S].
- [8] HUI H, YU C N, SURENDRAN R, et al. Wind generation scheduling and coordination in ERCOT Nodal market[C] // Power and Energy Society General Meeting, July 22-26, 2012, San Diego, CA, USA: 1-8.
- [9] VERBOOMEN J, SPAAN F J C M, SCHAVEMAKER P H, et al. Method for calculating total transfer capacity by optimising phase shifting transformer settings[C] // CIGRE 2008, 2008, Paris, France: 1-7.
- [10] SMOLOVIK S V, BRILINSKIY A S, CHUDNY V S, et al. Phase-shifting transformer as short-circuit current-limiting device[C] // 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), February 1-3, 2017, St. Petersburg and Moscow, Russia: 1585-1589.
- [11] 沈涛. 移相变压器在电力系统中的应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- SHEN Tao. Application research of phase-shifting transformer in power system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [12] 万延康, 韩松, 杨涛. 移相变压器研究与应用[J]. 贵州电力技术, 2017, 20(3): 88-92, 25.
- WAN Yankang, HAN Song, YANG Tao. Research and application of phase-shifting transformer[J]. Guizhou Electric Power Technology, 2017, 20(3): 88-92, 25.
- [13] EL HRAÏECH A, BEN-KILANI K, ELLEUCH M. Control of parallel EHV interconnection lines using phase shifting transformers[C] // 2014 IEEE 11th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD14), February 11-14, 2014, Barcelona, Spain: 1-7.
- [14] KUNNUTHOTTIYIL N S, SWARUP K S. Optimal utilization of transmission capacity in Indian grid by placement of phase shifting transformer using combinational algorithm[C] // 2019 8th International Conference on Power Systems (ICPS), 2019, Jaipur, India: 1-6.
- [15] SIDEA D, EREMIA M, TOMA L, et al. Optimal placement of phase-shifting transformer for active power flow control using genetic algorithms[J]. University Politehnica of Bucharest Scientific Bulletin, Series C, 2018, 80(1): 205-216.
- [16] BOSNEAGA V, SUSLOV V. Investigation of supply phase failure in phase-shifting transformer with hexagon scheme and regulating autotransformer[C] // 2021 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN), 2021, Iasi, Romania: 1-6.
- [17] FEENEY C, ZHANG J, DUFFY M. AC winding loss of phase-shifted coupled windings[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(2): 1472-1478.
- [18] 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 differential protection configuration of typical phase shifting transformers[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(1): 36-39.
- [19] 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.
- [20] BHASKER S K, BERA P K, KUMAR V, et al. Differential protection of indirect symmetrical phase shift transformer and internal faults classification using wavelet and ANN[C] // TENCON 2015 — 2015 IEEE Region 10 Conference, November 1-4, 2015, Macao, China: 1-6.
- [21] 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 symmetrical dual-core phase-shifting transformer based on zero sequence fault component[J]. Electric Power Science and Engineering, 2020, 36(11): 22-30.
- [22] THOMPSON M J, MILLER H, BURGER J. AEP experience with protection of three delta/hex phase angle regulating transformers[C] // 2007 Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources, 2007, Clemson, SC, USA: 96-105.
- [23] 黄少锋. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.

收稿日期: 2024-02-21; 修回日期: 2024-05-08

作者简介:

郑涛(1975—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: zhengtao_sf@126.com

申由(2001—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护与控制。E-mail: 2404233887@qq.com

(编辑 张颖)