

# 典型移相变压器差动保护配置对比分析

张晓宇, 顾乔根, 文继锋, 莫品豪, 郑超  
(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏南京 211102)

**摘要:**根据应用场合的不同,移相变压器有多种结构,不同结构和接线方式其差动保护配置也各有不同。从保护配置角度出发,总结了移相变压器的几种基本类型;以移相变压器常用的2种基本差动原理为基础,提出了针对几种典型移相变压器的保护配置;通过RTDS建模仿真实验,讨论了不同差动保护的保护区、所反映的故障类型及相互配合关系。

**关键词:**移相变压器;磁平衡差动保护;电平衡差动保护;并联变压器;串联变压器

中图分类号:TM403.5

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2015)01-0036-04

移相变压器通过向输电线路中串入横向或纵向的电压,改变设备安装点电压的幅值与相位,从而控制输电线路稳态潮流和电压<sup>[1]</sup>。随着电力系统的发展,电网结构日趋复杂,已成为包含多种类型电源、多种类型负荷、不同电压等级设备、交直流混联的庞大系统,这对电网的可靠经济运行提出了更高的要求<sup>[2]</sup>。移相变压器作为一种控制输电潮流的有效手段,能避免过负荷和欠负荷情况,提高现有输电线路的输送容量,降低输电成本。新型移相变压器还能提高系统的动态和暂态稳定性能,提高系统的电压稳定性等<sup>[3]</sup>。在国外超高压电网中已得到广泛应用。目前在利用移相变压器解决系统暂态和动态方面,如提高暂态稳定性,减轻导致联络线失步的穿越潮流,抑制故障后线路功率突增所造成的开关过负荷及阻尼振荡,已有相关研究<sup>[4]</sup>。但我国尚未大规模采用移相变压器技术,对其本体保护的研究也较少。从移相变压器的结构出发,给出不同移相变压器的差动保护配置方案,并通过RTDS仿真分析各差动保护的保护区和反映的故障类型。

## 1 移相变压器的基本接线形式

移相变压器种类繁多,一次结构复杂多样,因此二次保护配置也需随一次接线方式的不同而有所不同。

### 1.1 移相变压器基本原理

移相变压器的结构、控制方式上虽然有很大差别,但其调节线路潮流的原理是一致的。其基本原理是对输入电压注入一个与之成一定角度的电压分量,使输出电压相角发生偏移<sup>[5]</sup>。在变压器的一次侧(电源)和二次侧(负荷)之间产生一个相位移,从而达到控制潮流的目的。

对于连接两端交流系统的输电线路(如图1所示),其传输功率的大小可用下式来表示<sup>[4]</sup>:

$$P_{SL} = \frac{U_S U_L}{L_{SL}} \sin(\delta_S - \delta_L) \quad (1)$$

式中: $P_{SL}$ 为节点S流向节点L的有功功率; $U_S, U_L, \delta_S, \delta_L$ 分别为节点S和节点L的母线电压幅值和相位; $X_{SL}$ 为联络线路的等效电抗值。可见,线路上传输的有功功率主要由节点电压、相角和线路阻抗决定,通过控制输电线路的电压、阻抗以及相角就可以改变线路传输的功率。

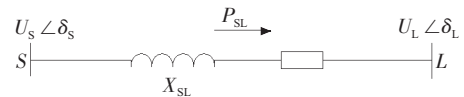


图1 安装移相变压器前的传输功率

在线路S侧安装了移相变压器后忽略线路电阻,安装移相变压器后线路有功功率为:

$$P_{SL} = \frac{U'_S U_L}{X_{SL}} \sin(\delta_S - \delta_L + \Delta\delta) \quad (2)$$

式中: $U'_S$ 为移相变压器补偿后的电压; $\Delta\delta$ 为移相变压器补偿相角。移相变压器的补偿电压改变了线路电压的幅值和相角,以此调节线路潮流。

### 1.2 非对称型和对称型

从补偿后的电气特性来看,移相变压器可分为非对称型和对称型2种。

非对称型移相变压器的输出电压与输入电压相比,相角和幅值均发生变化。励磁绕组E1的电压取自串联绕组B的一侧(如图2所示)。

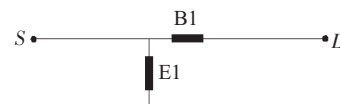


图2 非对称型移相变压器

对称型移相变压器的输出电压与输入电压相比,仅相角改变,幅值不变。励磁绕组E1电压取自2个串联绕组B1和B2的中间位置(如图3所示)。

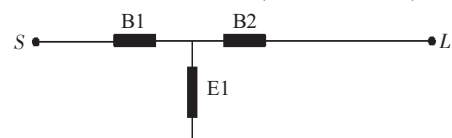


图3 对称型移相变压器

### 1.3 单芯和双芯

从一次结构上看,移相变压器可分为单芯和双芯2种类型。

单芯移相变压器是基于1台三相变压器,用适当的接线方式实现移相。串联绕组的副边和线路直接连接(如图4所示)。

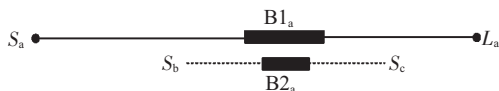


图4 单芯移相变压器

双芯移相变压器基于2台独立变压器,1台并联变压器(ET)用于调节从系统中抽取电压的大小。另1台串联变压器(BT)用于将该电压注入线路中(如图5所示)。

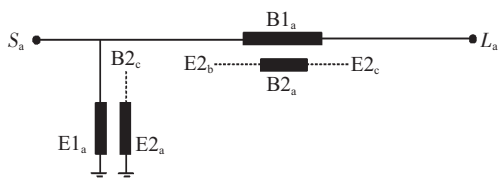


图5 双芯移相变压器

### 1.4 连续控制型和分级控制型

从调压方式上看,移相变压器可分为连续控制型和分级控制型2种。

连续控制移相变压器通过调节同一绕组的分接头等方式实现补偿电压幅值的连续调节(如图6所示)。

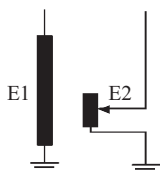


图6 连续控制移相变压器

分级控制型移相变压器的调压方式是将变压器副边绕组分成n个级差绕组(每个绕组的匝比根据需求可以相同或不同),通过控制系统控制投入不同的绕组,使输入电压逐级变化,从而离散的改变补偿电压大小(如图7所示)。

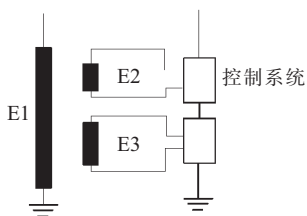


图7 分级控制移相变压器

## 2 移相变差动保护基本类型

应用于移相变压器的差动保护主要有2种不同的基本原理。在此基础上,不同的一次接线和电压互感器(TA)配置产生了不同的差动保护配置方案。

### 2.1 磁平衡差动

磁平衡也叫做磁通平衡或安匝平衡,是普通变压器差动保护的理论基础。对于Y/Y接线两圈变,其差流计算公式为:

$$I_d = KI_1 + I_2 \quad (3)$$

式中: $I_d$ 为差流; $I_1, I_2$ 分别为2圈变2个绕组的一次电流; $K$ 为变压器的匝比即原副边的额定电压比。移相变压器通常由1个或2个变压器组成,每个变压器都可构成一个磁平衡差动模型,从而反映变压器内部故障。由于匝间故障破坏了磁通的平衡,因此磁平衡差动可以反映匝间故障。

### 2.2 电平衡差动

电平衡差动是基于基尔霍夫第一定律的差动保护。对于T接的导线,其差流计算公式为:

$$I_d = I_1 + I_2 + I_3 \quad (4)$$

式中: $I_1, I_2, I_3$ 分别为T接导线三侧的一次电流。移相变压器绕组通过一定的接线方式达到移相的目的,各绕组间除了磁路连接外还有直接的电路连接,因此可以配置这种基于基尔霍夫第一定律的差动保护。由于匝间故障时绕组的输入电流仍然等于输出电流,因此电平衡差动不反映匝间故障。

### 2.3 不同类型移相变压器的差动配置原则

移相变压器的差动保护配置与其一次结构关系非常紧密,不同类型的移相变压器需配置不同形式的差动保护。对称型和不对称型的移相变压器区别在于励磁电压选取位置不同。此外非对称型串联绕组只有1个,对称型串联绕组有2个。二者区别不大,对称型由于有2个绕组,保护实现略微复杂。

单芯移相变压器和双芯移相变压器在结构上有本质不同。单芯移相变压器只有1个变压器,因此只配置1个磁平衡原理差动保护。双芯移相变压器由2个变压器组成,可以根据条件配置2个磁平衡差动保护。由于接线方式不同,二者都可以配置电平衡原理差动,但电平衡差动保护的覆盖范围并不一样。单芯移相变压器根据TA安装位置,可保护变压器的原边或同时保护变压器的原副边;双芯移相变压器一般可保护串联变的一次绕组和并联变的一次绕组。

连续控制型和分级控制型移相变压器主要差别在磁平衡差动保护。连续控制型移相变压器中的并联变压器由于其原副边变比可变化幅度非常大,很难配置普通的变压器差动保护。而分级控制型移相变压器每个绕组的匝数是固定的,如每个绕组均安装有TA,可对并联变压器配置磁平衡差动保护。

## 3 差动保护配置方案

差动保护配置同移相变压器一次结构和TA配置

都有密切相关。下面以 3 种典型的移相变压器为例,分析不同移相变压器的保护配置。除接线特殊的移相变压器外,其他类型的移相变压器基本可参照此 3 种类型进行配置。下面的分析基于典型的 TA 配置,根据应用场合、制造工艺、生产厂家的不同,TA 安装的位置和数量会有所差别,对应的保护配置及保护范围也需进行相应调整。

### 3.1 单芯对称型移相变压器

单芯对称型移相变压器为比较常见的移相变压器,结构简单,造价相对较低,其接线方式如图 8 所示。

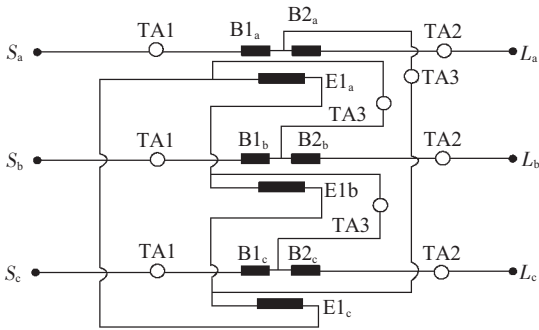


图 8 单芯对称移相变压器接线

单芯移相变压器差动保护配置简单,一般只配置电平衡差动,部分故障需要依靠后备保护及瓦斯保护反映,具体配置:使用 TA1、TA2、TA3;保护范围为串联绕组 B1 和 B2 及其之间引线。

### 3.2 双芯不对称连续控制型移相变压器

双芯不对称连续控制移相变压器具备双芯移相变压器的优点,同时调压方式相对简单,无需复杂的控制回路,其接线方式如图 9 所示。

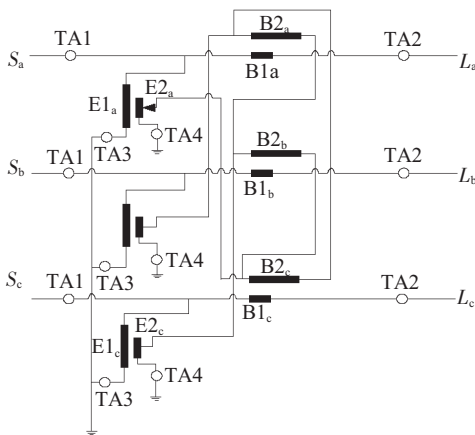


图 9 双芯不对称连续控制移相变压器接线

由于电压连续控制,只有串联变配置了磁平衡差动保护,其保护原理和 Y/D 接线的两圈变类似。同时配置电平衡差动,保护 2 个变压器的一次绕组,差动保护配置<sup>[6]</sup>如表 1 所示。

### 3.3 双芯对称分级控制型移相变压器

双芯对称分级控制型移相变压器结构复杂,需要独立的控制系统进行电压调节,其结构如图 10 所示。

表 1 双芯不对称连续控制移相变压器差动配置

差动名称	使用 TA	保护范围
电平衡差动	TA1、TA2、TA3	串联变绕组 B1, 并联绕组 E1 及其之间引线
串联变磁平衡差动	TA1、TA2、TA4	串联变绕组 B1、B2, 并联绕组 E2 及其之间引线

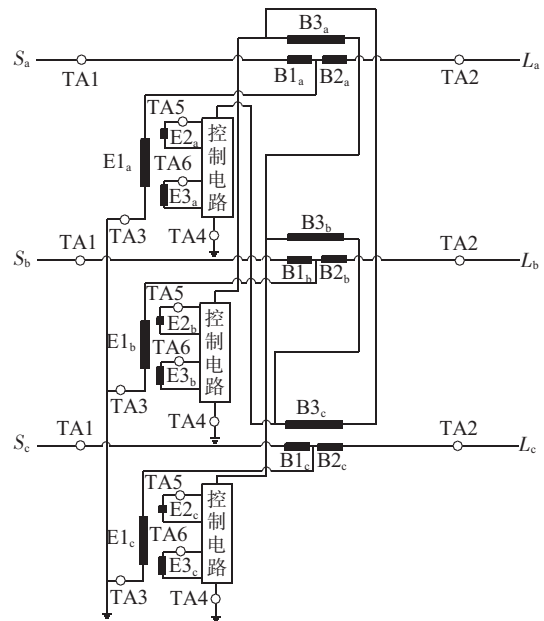


图 10 双芯对称分级控制型移相变压器接线

双芯对称分级控制型移相变压器中的串联变和并联变均可配置独立的磁平衡差动保护。并联变压器保护原理同 Y/Y/Y 接线的变压器类似,串联变压器保护原理同 Y/Y/D 接线的变压器类似。此外还可配置电平衡差动,用于保护两个变压器的一次绕组,差动保护配置如表 2 所示。

表 2 双芯对称分级控制移相变压器差动配置

差动名称	使用 TA	保护范围
电平衡差动	TA1、TA2、TA3	串联变绕组 B1、B2, 并联绕组 E1 及其之间引线
串联变磁平衡差动	TA1、TA2、TA4	串联变绕组 B1、B2, 并联绕组 E2、E3 及其之间引线
并联变磁平衡差动	TA3、TA5、TA6	并联变绕组 E1、E2、E3 及其之间引线

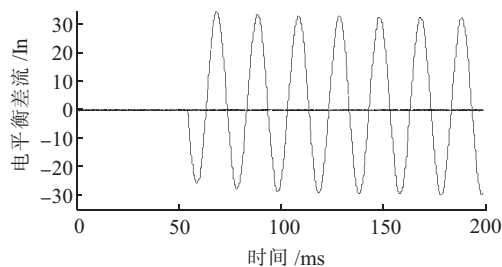
## 4 仿真分析

以最复杂的双芯对称分级控制型移相变压器为研究对象建立 RTDS 仿真模型,分析不同差动的保护范围和动作特性。

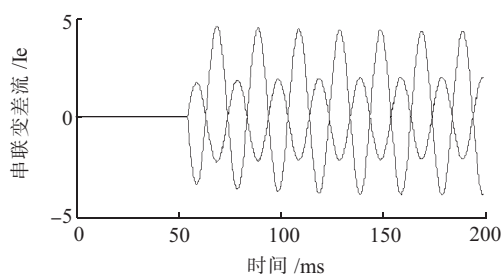
线路首端 TA1 区内发生 A 相接地故障,电平衡差动和串联变磁平衡差动均可反映该故障,波形如图 11 所示。

并联变压器绕组 E2 发生 100% 匝间故障,并联变磁平衡差动可反映该故障,波形如图 12 所示。

串联变绕组 B3 发生 15% 匝间故障,串联变磁平衡差动可反映该故障,波形如图 13 所示。



(a) 电平衡差流



(b) 串联变差流

图 11 线路首端故障时各差动差流波形

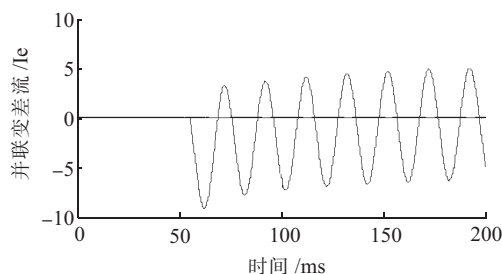


图 12 并联变绕组 E2 匝间故障时各差动差流波形

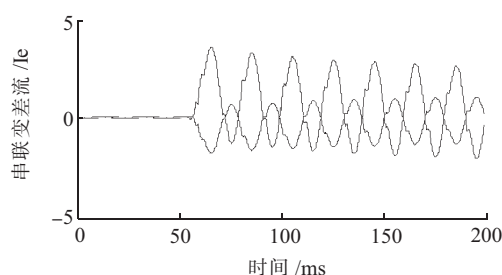


图 13 串联变绕组 B3 匝间故障时各差动差流波形

从以上波形可看出,3 个差动有各自的保护范围,并且反映不同的故障类型。各差动相互配合,共同构成了完整的移相变压器差动保护。

## Comparative Analysis of the Differential Protection Between Typical Phase Shifting Transformers

ZHANG Xiaoyu, GUQiaogen, WEN Jifeng, MO Pinhao, ZHENG Chao  
(Nanjing Nari-Relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** There are many kinds of phase shifting transformer (PST) because of the wide variety of applications. Therefore, the differential protection of the PST are different. This paper analyzes the differential protection of PST and sum up the typical type of it. Based on two fundamental differential protection principles, this paper proposes a series of differential protection configuration for typical PST. The protection scope, fault type and matching relation of different protection are analyzed base on theoretical analysis and RTDS simulation. d RTDS simulation.

**Key words:** phase shifting transformer; magnetic balance differential protection; current balance differential protection; parallel transformer; series transformer

## 5 结束语

从保护角度出发,对移相变压器进行了分类研究,提出了典型移相变压器的差动保护配置方案。通过理论分析和仿真实验验证了各差动保护范围和配合关系。需要指出的是,根据不同工程应用,TA 配置会有所不同,因此各保护的实际控制范围可能会有所变化。同时文中讨论范围之外的一些特殊接线的移相变压器,由于其结构通常非常复杂,还有待进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 郑彬,项祖涛,班练庚,等. 特高压静止移相变压器应用的电磁暂态研究[C]//第四届电能质量及柔性输电技术研讨会.呼和浩特,2012:445-449.
- [2] 朱峰. 电压注入式移相变压器建模研究[J]. 电网与清洁能源,2012,28(2):7-10.
- [3] 赵学强,郭明星. 华东电网安装移相变压器的研究[J]. 华东电力,2006,34(11):34-37.
- [4] 于弘洋,周飞,杨增辉. 可控移相变压器主电路参数设计及稳态特性分析[J]. 中国电力,2013,46(11):36-41.
- [5] 赵学强. 采用移相变压器技术提高华东 500 kV 电网输送能力的研究[C]//上海市电机工程学会 2006 年学术年会. 郑州,2006:103-106.
- [6] GAJIE Z, PODBOJ M, TRAVEN B, et al. When Existing Recommendations For PST Protection Can Let You Down[C]// 11th IET International Conference on Devvelopments in Power System Protection 2012. 2012:218-224.
- [7] 袁宇波,李鹏,黄浩声. 变压器差动保护误动原因分析及对策综述[J]. 江苏电机工程,2013,32(6):8-11.

### 作者简介:

- 张晓宇(1981),男,吉林吉林市人,工程师,从事电力系统继电保护研发工作;  
顾乔根(1986),男,江苏南通人,工程师,从事电力系统继电保护研发工作;  
文继锋(1978),男,江西萍乡人,高级工程师,从事电力系统继电保护研发工作;  
莫品豪(1985),男,广西贵港人,工程师,从事电力系统继电保护研发工作;  
郑超(1987),男,黑龙江绥化人,工程师,从事电力系统继电保护研发工作。