

# 多分支移相变压器差动保护技术研究及应用

侯 炜<sup>1</sup>, 邵铃敏<sup>2</sup>, 段胜朋<sup>1</sup>, 王栋涛<sup>1</sup>, 陈 俊<sup>1</sup>

(1. 南京南瑞继电电气有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 浙江浙能台州第二发电有限责任公司, 浙江 台州 318000)

**摘要:**分析了传统移相变压器保护方案的缺点,对移相变压器的工作原理进行了详细研究,推导了适用于各种移相变压器的电流变换关系,并提出了一种采用全角度移相、数字化采样等技术的移相变压器差动保护方案。所提差动保护方案解决了传统多分支移相变压器无法配置差动保护的问题,使得保护性能得到了极大提升,并可适用于不同类型的移相变压器。通过 RTDS 数模仿真实验,对所提方案的差动保护功能进行了实验验证。目前,基于该方案的差动保护装置已于 2017 年 3 月投运并稳定运行至今。

**关键词:**数字化保护;差动保护;继电保护;多分支移相变压器

**中图分类号:**TM 73;TM 41

**文献标识码:**A

**DOI:**10.16081/j.issn.1006-6047.2018.10.032

## 0 引言

移相变压器(简称移相变)是为整流、变频设备提供电源的特种变压器。常用移相变主要有 2 种类型:一种为主要用于冶金行业的大容量整流变压器,该类变压器输入电压等级高,采用超宽范围的分接头调压,低压侧电流大且出线空间狭小、电流互感器安装困难,不易实现阀侧电流采集<sup>[1]</sup>,所以无法配置差动保护;另一种为应用于变频设备的移相变,该类变压器的输入侧电压为 10 kV/6 kV 等级,无档位调节,但是由于低压侧绕组数量较多,且移相角度特殊,所以传统变压器差动保护移相算法无法适用于该类移相变。鉴于以上原因,现有移相变方案仍以电流速断保护及非电量保护作为其内部故障的主保护<sup>[2-3]</sup>,无法兼顾保护的快速性、可靠性和灵敏性。在电厂、冶金等工业领域,大型移相变的重要性往往高于其他普通变压器,因此研究更灵敏、可靠的保护方案有着重要的理论意义和现实意义。本文主要探讨应用于变频设备的多分支移相变差动保护方案。

## 1 多分支移相变差动保护的必要性

由西北电力设计院主编的《电力工程电气设计手册-电气二次部分》提到,针对 2 MV·A 及以上的发电厂低压厂用变压器,电流速断保护灵敏性不符合要求时,应装设纵差保护<sup>[4]</sup>。此外,输入侧电压为 10 kV/6 kV 等级的移相变,电流速断保护定值是按照躲过变压器空载合闸时的励磁涌流整定的,而这种变压器低压侧绕组较多,当低压侧绕组或出线发生短路故障时,反映到高压侧电流的变化并不明显,电流速断保护无法动作<sup>[5]</sup>,如浙江某电厂变频器移相变为低压侧 5 种移相角度的变压器,为了与变频器连接,每种角度又在物理上分了 3 个绕组,因此低压侧共计有 15 组绕组,短路阻抗为 8.66%,即使低压侧发生三相短路,高压侧电流也只有 0.77I<sub>e</sub>(I<sub>e</sub> 为

变压器额定电流),现有保护无法动作。2016 年 12 月 31 日,华东某钢厂 5.4 MW 变频器移相变低压侧 B7 单元绝缘纸存在问题导致放电,继而出现拉弧,由于保护长期无法动作导致三相绕组烧毁。因此,多分支移相变增设差动保护功能是非常有意义且必要的。

部分单位、厂家先后提出了各种移相变差动保护解决方案<sup>[6-7]</sup>,但这些方案大多都停留在理论分析状态,并未投入实用;此外,用于 10 kV 电压等级的变频器多采用 30 脉波或更多脉波的方式,前端的移相变绕组较多,目前尚未有能完成此类移相变差动保护的文献或产品介绍。

本文提出了一种新型的移相变差动保护方案,详细介绍了保护原理、实现及在现场的实际使用情况。

## 2 移相变差动保护原理及数字化组网技术

### 2.1 高压变频器结构

高压变频电动机凭借其优越的性能在大型发电厂得到了越来越广泛的应用,高压变频器是其核心元件。高压变频器由移相变压器柜、功率单元柜和控制单元柜组成。功率单元柜实现整流、逆变和变频,然后再进行叠加。由于功率单元柜整流环节多采用 6 脉波整流,谐波含量高、功率因数低,因此通过移相变的移相使得移相变二次绕组的同名端线电压之间有 1 个移相角,从而提高脉波数,有效消除各个功率单元对电网的谐波污染。

移相绕组的移相方式有曲折式、六边形式和延边三角形式,高压变频器的移相变由于脉波数较多,一般采用低压侧延边三角接线方式。

根据变频器中功率单元数目和电压等级的不同,移相变输出的绕组数和移相角度也不同,具体如表 1 所示,高压变频器结构示意图如图 1 所示。

### 2.2 移相变延边三角形移相技术

根据绕组的连接方式,移相变分为顺延和逆延 2 种<sup>[8-9]</sup>,即变压器低压侧线电压的相位领先或滞后高压侧线电压角度  $\theta$ 。

表 1 移相绕组数与移相角的关系  
Table 1 Relationship between phase-shifting winding number and phase-shifting angle

移相绕组数	移相角度/(°)
3	0, ±20
4	±7.5, ±22.5
5	0, ±12, ±24
6	±5, ±15, ±25
8	±3.75, ±11.25, ±18.75, ±26.25

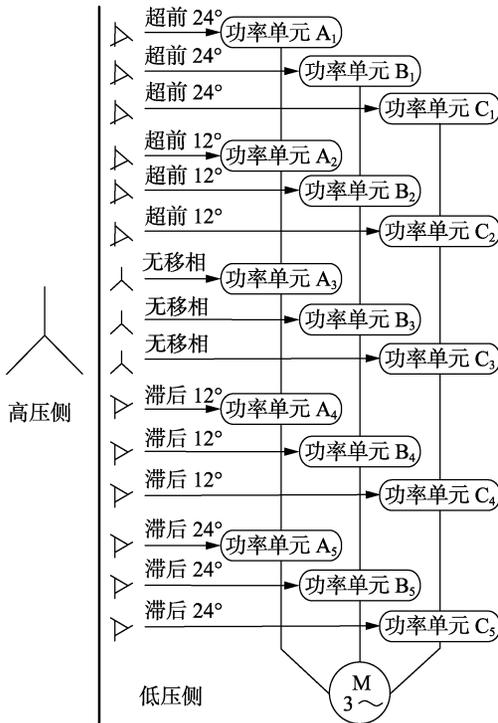


图 1 高压变频器组件示意图

Fig.1 Schematic diagram of high-voltage inverter

2.2.1 顺延移相变

顺延移相变低压侧线电压超前高压侧线电压角度为  $\theta$ , 高压侧绕组匝数为  $N_1$ , 低压侧主绕组的匝数为  $N_2$ , 移相绕组匝数为  $N_3$ 。顺延移相变绕组接线图和电压相量图分别如图 2 和图 3 所示。

根据图 2 和图 3, 由三角形变换原理, 可推导顺延移相变的绕组比和移相角的关系为:

$$\begin{cases} \frac{N_3}{N} = \frac{\sin(30^\circ - \theta)}{\sin 120^\circ} \\ \frac{N_2 + N_3}{N} = \frac{\sin(30^\circ + \theta)}{\sin 120^\circ} \\ \frac{N_2}{N} = \frac{\sin(30^\circ + \theta) - \sin(30^\circ - \theta)}{\sin 120^\circ} = \frac{\sqrt{3} \sin \theta}{\sin 120^\circ} \end{cases} \quad (1)$$

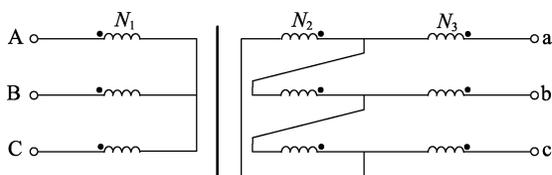


图 2 顺延移相变绕组连接图

Fig.2 Wiring diagram of clockwise phase-shifting transformer

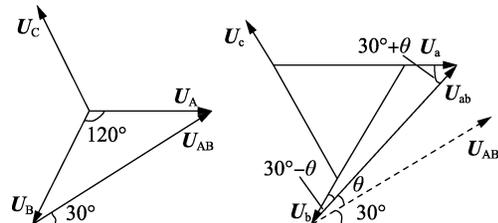


图 3 顺延移相变电压相量图

Fig.3 Voltage phasor diagram of clockwise phase-shifting transformer

其中,  $N = U_2 N_1 / U_1$ ,  $U_1$ 、 $U_2$  分别为高、低压侧额定电压。

下面验证特殊情况: 当  $\theta = 0^\circ$  时, 低压侧接线方式为 Y 接线,  $N_2 = 0$ ,  $N_3 / N$  为相电压和线电压比值的  $1/\sqrt{3}$ , 这与将  $\theta = 0^\circ$  直接代入式 (1) 计算得到的结果相同。

2.2.2 逆延移相变

逆延移相变低压侧线电压滞后高压侧线电压的角度为  $\theta$ , 逆延移相变的绕组接线图和电压相量图分别如图 4 和图 5 所示。

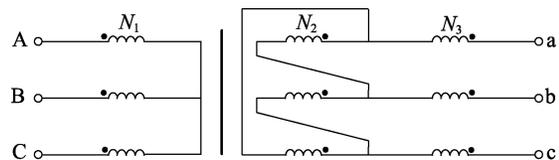


图 4 逆延移相变绕组连接图

Fig.4 Wiring diagram of anticlockwise phase-shifting transformer

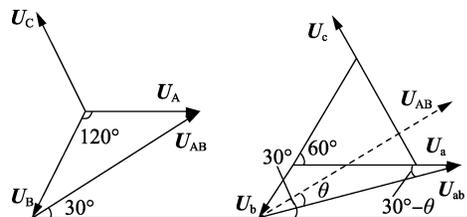


图 5 逆延移相变电压相量图

Fig.5 Voltage phasor diagram of anticlockwise phase-shifting transformer

由图 4 和图 5 可推导逆延移相变的绕组比和移相角的关系同式 (1)。

2.3 全角度移相算法

对于常规变压器的差动保护, 高压侧电流和低压侧电流存在角度差, 但角度差为  $m \times 30^\circ$  ( $m = 0, 1, \dots, 11$ ), 通过 Y 侧各相电流的相量差即可进行转换。

但是移相变中, 高压侧电流和低压侧各侧电流同样存在角度差, 而且角度差多变, 无法通过简单的  $Y \rightarrow \Delta$  变换或  $\Delta \rightarrow Y$  变换来进行角度变换, 所以需要移相变结构进行分析, 找出新的电流变换关系。

与常规变压器相比, 移相变最大的不同是低压侧每相由主绕组和移相绕组组成, 因此磁路中的磁通也由主绕组和移相绕组共同形成。从磁通平衡的

角度看,高压侧电流产生的磁通应该与低压侧主绕组和移相绕组产生的磁通相同,根据磁平衡关系,可推导移相变低压侧电流变换关系为:

$$\begin{bmatrix} I'_{an} \\ I'_{bn} \\ I'_{cn} \end{bmatrix} = M_n \begin{bmatrix} I_{an} \\ I_{bn} \\ I_{cn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,  $I_{an}$ 、 $I_{bn}$ 、 $I_{cn}$  为低压侧各绕组电流互感器实测电流;  $n$  为低压侧移相绕组数,对于图 1 所示的 30 脉波移相变,  $n=5$ ; 矩阵  $M_n$  为低压侧  $n$  绕组电流变换矩阵,可通过式(1)对低压侧电流进行移相变换;  $I'_{an}$ 、 $I'_{bn}$ 、 $I'_{cn}$  为将低压侧电流进行反向移相角度变换后的电流值。

$I'_{an}$ 、 $I'_{bn}$ 、 $I'_{cn}$  与高压侧电流  $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$  满足传统的 YD11 或 YD1 转换关系,可以通过传统的差动保护算法进行计算。

### 2.4 数字化组网方式

移相变差动保护实现的另外一个难点是移相变低压侧绕组数多,需采集的电流多。在大型发电厂高压变频器中移相变压器柜和功率单元柜一般并列布置,且移相变低压侧绕组数目较多,以图 1 所示的高压变频器为例,每个功率单元输入为 A、B、C 三相,因此低压侧需采集的电流数目共 15 组 45 路。若采用常规电流采集方式,所需电缆较多,存在大量屏柜间连线,现场实施不方便。同时常规的保护装置无法接入如此多路的电流。

本文通过增加合并单元装置,现场就地化采集移相变低压侧各个绕组电流,然后通过 IEC61850-9-2 等协议将采集到的模拟量信号发送到移相变保护装置,高压侧电流采用常规采集方式,由差动保护装置直接采集。移相变差动电流采集方式见图 6<sup>[10]</sup>。

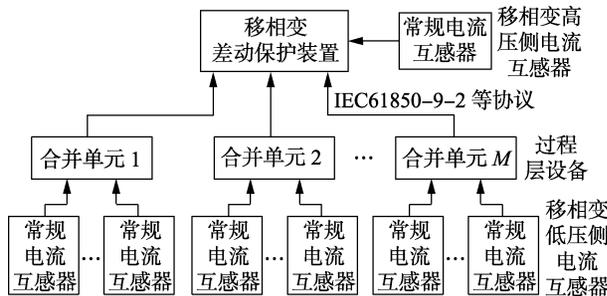


图 6 移相变差动电流采集方式示意图

Fig.6 Schematic diagram of differential current acquisition mode for phase-shifting transformer

采用合并单元就地化采集移相变压器低压侧电流,除了能够简化接线、减少电缆数量外,还可根据移相变低压侧绕组数量灵活配置合并单元数目,使各种不同场合下的移相变差动保护配置方案更灵活。

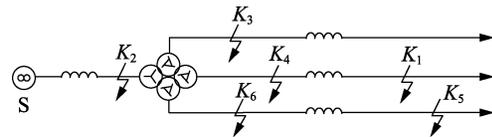
另外需要注意的是,移相变低压侧电流由合并单元采集,通过 IEC61850-9-2 协议发送到移相变

差动保护装置,而移相变高压侧电流由差动保护装置直接采集,因此需考虑各侧电流数据是否同步,由差动保护装置对各侧数据进行同步插值处理。若选择 IEC61850-9-2 协议,则采用点对点方式,传输延时固定;若采用组网方式,则会增加过程层交换机,传输延时无法固定,合并单元装置和差动保护装置必须采用全球定位系统时钟信号源实现数据同步。

## 3 仿真试验验证

### 3.1 模型主接线及参数

为充分验证移相变差动保护的性能,采用实时数字仿真系统 (RTDS) 进行仿真验证,建立移相变差动保护数模试验模型,系统接线如图 7 所示。利用本文移相算法后,移相变差动保护的相关整定原则可以参照常规变压器保护,模型参数及差动保护整定值如表 2 所示(主变高压侧额定电流为 1A)。



3.8 MV·A, 11 kV/1.2 kV

图 7 移相变差动保护 RTDS 试验系统图

Fig.7 RTDS test system diagram of phase-shifting transformer

表 2 RTDS 试验模型参数

Table 2 Parameters of RTDS testing model

序号	参数	参数设置
1	变压器容量	3.8 MV·A
2	电压等级	11 kV/1.2 kV
3	高压侧变比	200 A/1 A
4	低压侧变比	800 A/1 A
5	接线方式	高压侧 Y 接线, 低压侧延边
6	移相角度	6°、-6°、-18°
7	差动电流启动值	0.2I <sub>e</sub>
8	差动速断保护定值	4I <sub>e</sub>
9	比率差动保护制动系数	0.3
10	比率差动保护制动系数 II	1
11	比率差动保护拐点定值	2I <sub>e</sub>
12	比率差动保护拐点定值 II	6I <sub>e</sub>
13	2 次谐波闭锁系数	0.15

### 3.2 试验结果

利用 RTDS 分别进行了在移相变高压侧和低压侧各分支区内和区外金属性故障(故障类型包含单相接地、两相短路接地、两相相间短路、三相短路及三相短路接地故障)、匝间故障、区外转区内转换性故障、空投变压器试验、电流互感器断线和电流互感器饱和等试验。试验结果如表 3 所示。部分试验故障录波如图 8、图 9 所示。

如图 8 所示,当移相变压器高压侧(图 7 中的 K<sub>2</sub> 处)发生三相短路故障时,差动速断保护快速动作,动作时间为 12 ms,而比率差动保护在 21 ms 时动作,故障电流可达 14I<sub>e</sub>。

表 3 RTDS 试验结果

Table 3 Results of test by RTDS

序号	故障类型	动作情况
1	区内金属性短路故障	正确动作
2	区外金属性短路故障	可靠闭锁
3	区外转区内转换性故障	正确动作
4	电流互感器断线	可靠闭锁
5	区外短路故障时电流互感器饱和	可靠闭锁
6	区内短路故障时电流互感器饱和	正确动作
7	正常空投试验	可靠闭锁
8	空投于故障	正确动作

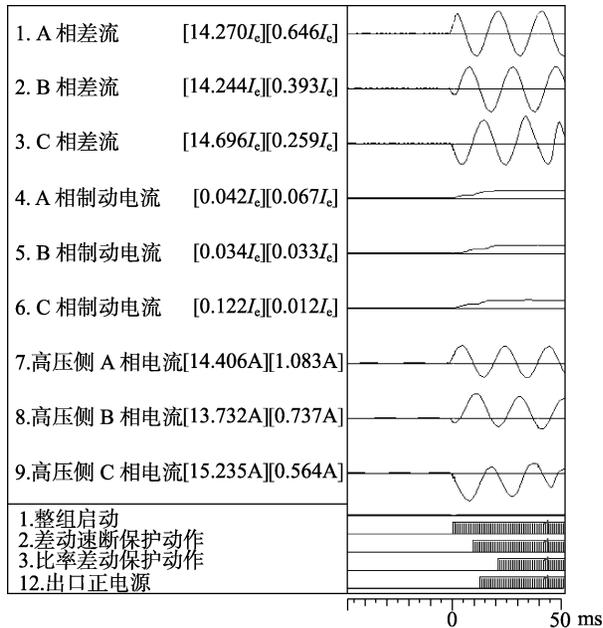


图 8 变压器高压侧三相短路故障录波

Fig.8 Recording waveforms of three-phase short circuit occurring at HV side of transformer

如图 9 所示,当移相变低压侧(图 7 中的 K<sub>3</sub> 处)

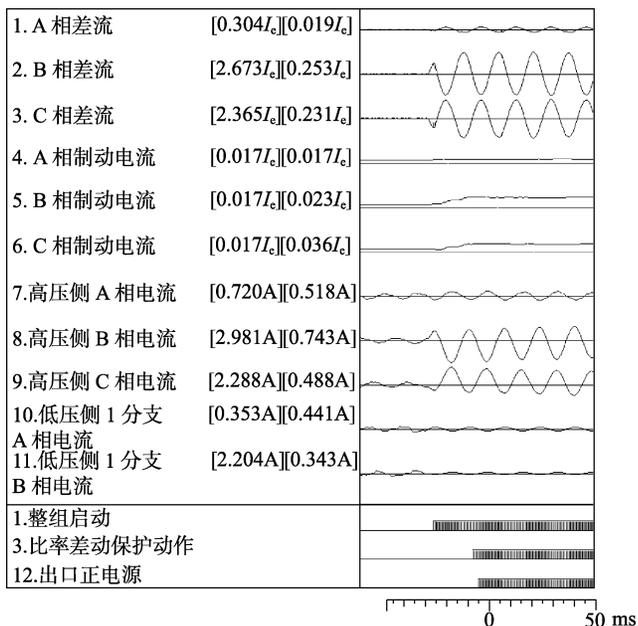


图 9 变压器低压侧两相短路故障录波

Fig.9 Recording waveforms of two-phase short circuit occurring at LV side of transformer

发生两相短路故障时,此时高压侧电流互感器测得的电流小于  $3I_c$ ,现有电流速断保护无法动作,但差动电流可达  $2.67I_c$  左右,差动保护灵敏动作。

上述试验结果可以验证数字化移相变差动保护系统在移相变各种工况均能可靠运行,正常动作。

## 4 现场工程实施

### 4.1 浙能台州第二发电有限责任公司凝泵移相变概况

基于本文方案的数字化差动保护安装于浙江浙能台州第二发电有限责任公司的凝泵电机移相变上。该移相变设备参数为:容量为  $3.8 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ;高压侧额定电压为  $11 \text{ kV}$ ,低压侧额定电压为  $1.2 \text{ kV}$ ;低压侧包含 5 个分支,移相角度分别为  $0^\circ$ 、 $\pm 12^\circ$  和  $\pm 24^\circ$ ,共计 45 路出线,其主接线图如图 1 所示。

### 4.2 各侧电流的采集

电流采集方案见附录中的图 A1。高压侧电流通过原有的凝泵开关柜保护电流互感器采集,由凝泵开关柜直接接到移相变差动保护屏的保护装置上。

低压侧原本没有电流互感器,因此功率单元接入端安装穿心式电流互感器。低压侧共计 45 路电流,在凝泵变频控制柜内将 45 路电流中同相位并接后(如附录中图 A1 所示,功率单元 A<sub>1</sub>、功率单元 B<sub>1</sub> 和功率单元 C<sub>1</sub> 的输入电流同相位,将其进行并联),共有 15 路电流接入合并单元内,合并单元采集后通过光纤将数据传送到移相变差动保护装置。

### 4.3 应用情况

数字式移相变差动保护系统已于 2017 年 3 月在浙能台州第二发电厂正式投运。现场手动采集波形如图 10 所示。通过录波可以看出,现场运行时,

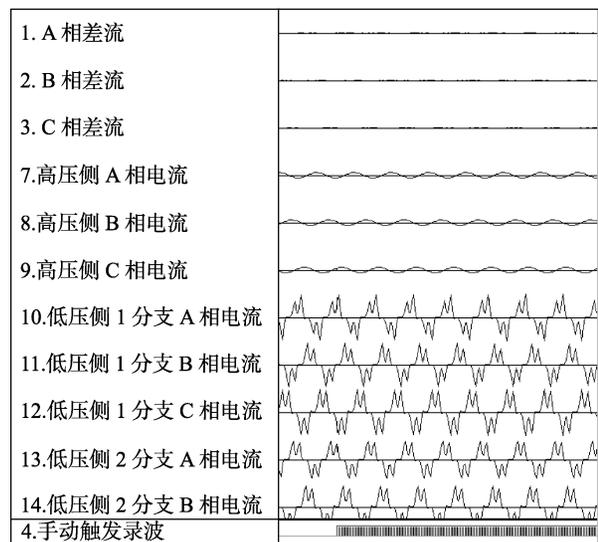


图 10 移相变差动保护装置现场运行录波

Fig.10 On-line recording waves of phase-shifting differential protection relay in field

高压侧电流谐波含量主要为 5 次和 7 次谐波,对差动保护的影响较小。经过保护装置处理后差流为 0。移相变差动保护装置保持正常、稳定运行。

## 5 结语

由于移相变独特的内部构造,传统移相变保护配置方案中无法配置差动保护。目前,从国内外可获得的资料来看,大型发电厂移相变差动保护的运用也是一个空白,没有相关文献的报道。

本文介绍了数字化移相变差动保护装置的原理、研制和应用情况。通过全角度移相算法和数字化采样等技术的实施,解决了传统多分支移相变保护方案无法配置差动保护的难题,使保护性能得到了极大的提升。数模仿真试验和现场运行情况也表明,数字化差动保护系统能够满足移相变的安全运行要求,极大地提高了移相变保护方案的灵敏性和可靠性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 崔立君. 特种变压器理论与设计[M]. 北京:科学技术文献出版社,1995:418.
- [2] 中国有色金属工业协会. 有色金属冶炼厂电力设计规范:GB50673—2011[S]. 北京:中国计划出版社,2012.
- [3] 李红钧,侯花莉,叶志勇,等. 大型整流变压器不配置差动保护的原因分析[J]. 电气技术,2016,17(9):121-125.  
LI Hongjun, HOU Huali, YE Zhiyong, et al. The reason for the differential protection of the large rectifier transformer is not configured[J]. Electrical Engineering, 2016, 17(9): 121-125.
- [4] 能源部西北电力设计院. 电力工程电气设计手册电气二次部分[M]. 北京:中国电力出版社,1991:685.
- [5] 王明飞,赵雪. 整流变压器与整流器之间保护死区分析[J]. 城市轨道交通研究,2013,16(1):97-99.  
WANG Mingfei, ZHAO Xue. Analysis of protection dead zone between rectifier transformer and rectifier[J]. Urban Mass Transit, 2013, 16(1): 97-99.
- [6] 邓茂军,吴起. 基于电子式互感器的电弧炉变压器差动保护研

究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(9):114-118.

DENG Maojun, WU Qi. Study on furnace transformer differential protection based on electronic transformer[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 114-118.

- [7] 栗磊. 大容量整流变压器差动保护相关问题的研究[D]. 北京:华北电力大学,2014.  
LI Lei. Research on related problems of large capacity rectifier transformer differential protection[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2014.
- [8] 王鹏,刘文胜,袁澜,等. 移相变压器应用于高压变频器的研究与设计[J]. 变压器,2009,46(9):9-12.  
WANG Peng, LIU Wensheng, YUAN Lan, et al. Research and design of application of phase-shifting transformer to HV frequency converter[J]. Transformer, 2009, 46(9): 9-12.
- [9] 孔宁,尹忠东,杨坡,等. 相间耦合电抗器的移相机理及其运用[J]. 电力自动化设备,2011,31(5):84-89.  
KONG Ning, YIN Zhongdong, YANG Po, et al. Phase-shifting principle of inter-phase coupling reactor and its application[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(5): 84-89.
- [10] 刘益青,高伟聪,高厚磊,等. 适用于智能变电站混合数据源接入的保护同步采样方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(11):158-164.  
LIU Yiqing, GAO Weicong, GAO Houlei, et al. Synchronous data acquisition from hybrid sources for smart substation protections[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11): 158-164.

## 作者简介:



侯 炜

侯 炜(1979—),男,山西阳泉人,高级工程师,硕士,研究方向为电力系统继电保护及控制(E-mail:houw@nrec.com);

邵铃敏(1978—),男,浙江台州人,工程师,研究方向为发电厂保护与控制;

段胜朋(1987—),男,山东菏泽人,工程师,硕士,研究方向为电力系统及其自动化;

王祚涛(1977—),男,山东济南人,高级工程师,硕士,研究方向为电力系统及其自动化;

陈 俊(1978—),男,江苏姜堰人,高级工程师,硕士,研究方向为电力系统及其自动化。

## Research and application of differential protection for multi-branch phase-shifting transformer

HOU Wei<sup>1</sup>, SHAO Lingmin<sup>2</sup>, DUAN Shengpeng<sup>1</sup>, WANG Litao<sup>1</sup>, CHEN Jun<sup>1</sup>

(1. Nanjing NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. Zhejiang Zheneng Taizhou Second Electric Power Generation, Taizhou 318000, China)

**Abstract:** The shortages of traditional protection for phase-shifting transformer are analyzed, the working principle of phase-shifting transformer is studied in detail, the current conversion relationship suitable for different types of phase-shifting transformer is deduced, and a new digital differential protection scheme using full-angle phase-shifting and digital sampling technology is proposed. The proposed scheme solves the problem that differential protection cannot be equipped in traditional multi-branch phase-shifting transformers, greatly improves the performance of protection system, and is suitable for different types of phase-shifting transformers. The effectiveness and correctness of the proposed scheme are verified by the simulation carried out with RTDS. The differential protection device applying the proposed scheme has been put into operation in March 2017, and has operated stably since then.

**Key words:** digital protection; differential protection; relay protection; multi-branch phase-shifting transformer

附录

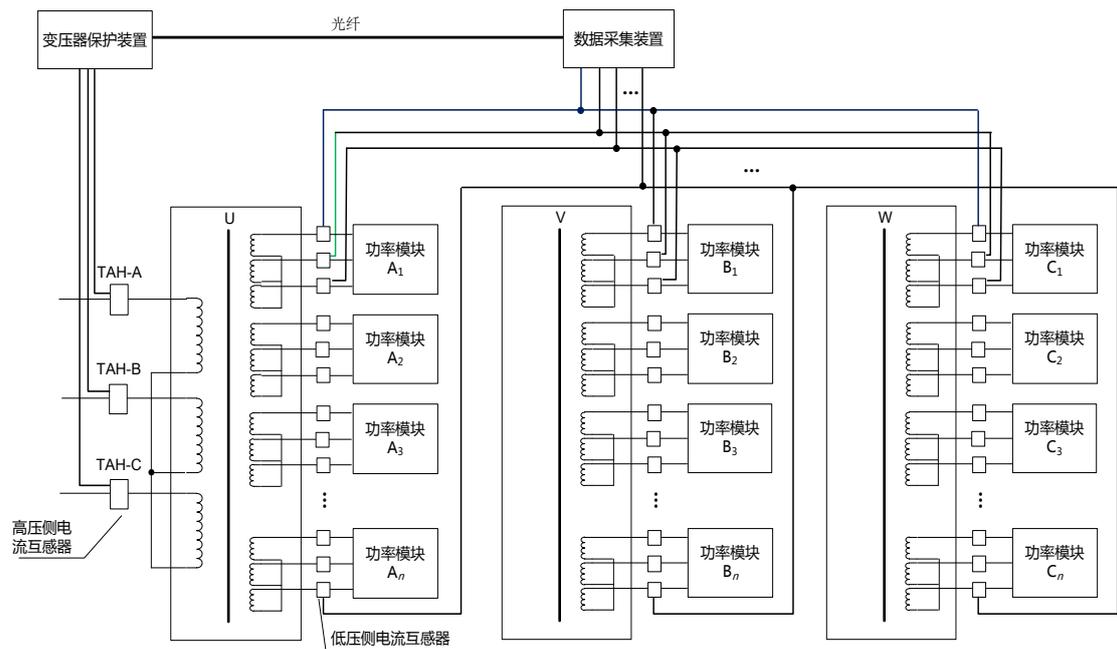


图 A1 移相变压器差动保护实施方案

Fig.A1 Implementation scheme of phase-shifting transformer differential protection