

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.202099

# 高阻抗变压器零模涌流特性与动模试验研究

尹项根<sup>1</sup>, 曹文斌<sup>1</sup>, 潘远林<sup>1</sup>, 王茂林<sup>1</sup>, 尹湘源<sup>1</sup>, 王育学<sup>2</sup>

(1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074;  
2. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510600)

**摘要:** 基于“磁通-电感”映射关系, 利用研究提出的零模涌流等值电路对高阻抗变压器(含高压内置型、低压串联型)和普通变压器的零模涌流特性进行了物理机理的阐释。参照实际变压器研制了三种变压器的物理模型, 构建了动态模拟试验系统。通过动模试验分析比较了剩磁(分闸角)、合闸角、电压、副方绕组接线方式、变压器类型等因素对零模涌流特性的影响, 验证了机理阐释的正确性。为抵御高阻抗变压器零模涌流引起零序保护误动的风险, 提出了调压绕组内置、分合闸角度匹配和二次谐波制动等应对方法。

**关键词:** 高阻抗变压器; 零模涌流; 物理机理; 物理模型; 动模试验

## Study on zero-mode inrush current characteristics and dynamic physical simulation tests of high-impedance transformer

YIN Xianggen<sup>1</sup>, CAO Wenbin<sup>1</sup>, PAN Yuanlin<sup>1</sup>, WANG Maolin<sup>1</sup>, YIN Xiangyuan<sup>1</sup>, WANG Yuxue<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Electric Power Dispatching Control Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China)

**Abstract:** Based on the mapping relationship of “flux-inductance”, the equivalent circuit of zero-mode inrush current is used to explain the physical mechanism of the zero-mode inrush current characteristics of high-impedance transformers (including the type of high-voltage winding built-in and the type of low-voltage winding series inductance) and traditional transformer. The physical models of two high-impedance transformers and traditional transformer are designed and manufactured with reference to the actual transformers, and a dynamic simulation test system is constructed. Based on the test waveforms, the effects of factors such as remanence (opening angle), closing angle, voltage, secondary winding connection mode, and transformer type on the characteristics of the zero-mode inrush current are analyzed and compared, and the correctness of the physical mechanism is verified. In order to resist the risk of zero-sequence protection misoperation caused by zero-mode inrush current of high impedance transformers, methods such as moving the tap-changing windings inside, matching opening and closing angle, and second harmonic restraint are proposed.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900600) and Science and Technology Project of Guangdong Power Grid Co., Ltd. (No. GDKJXM20162461).

**Key words:** high-impedance transformers; zero-mode inrush current; physical mechanism; physical models; dynamic physical simulation tests

## 0 引言

为了应对电网容量增加<sup>[1-2]</sup>, 短路电流超标严重的问题<sup>[3-4]</sup>。高阻抗变压器(后文简称“高抗变”)可

在不增加一次设备的情况下, 增大短路阻抗以降低短路电流, 并且有利于降低空载损耗, 已经得到现场的广泛应用<sup>[5-6]</sup>。普通变压器(后文简称普通变)的标准阻抗百分数为“高中 14%、高低 23%、中低 9%”、而高阻抗变压器的一般为“高中 14%、高低 35%、中低 21%”。在多种高阻抗变压器类型中<sup>[5]</sup>, 目前现场投运较多的是其中两种: 高压绕组内置型高阻抗

基金项目: 国家重点研发计划资助(2016YFB0900600); 广东电网有限责任公司科技项目(GDKJXM20162461)

变压器(后文简称“内置变”)和低压绕组串抗型高阻抗变压器(后文简称“串抗变”)。两种高抗变分别通过增大漏磁面积和在三角绕组内串联电抗来增大短路阻抗。近年来,国家电网和南方电网都出现了多次高阻抗变压器(尤其是内置变)投运时引起相关零序保护误动的事故<sup>[7-8]</sup>,严重时上一级线路的零序过流保护发生误动,严重影响了相关线路的供电可靠性。分析事故的录波发现,零序过流保护误动的直接原因是内置变投运时零序电流(零模电流工频分量)初始值较大且到达保护固定延时后仍大于整定值。

国内外相关学者和专家们对变压器励磁涌流的产生机理开展了长期的研究工作<sup>[9-13]</sup>,并提出了许多防止空投期间变压器及其相邻元件保护误动作的方法<sup>[14-20]</sup>,这些方法是否可直接适用于应对高阻抗变压器的特殊涌流问题仍有待考证。目前关于涌流的研究均未考虑绕组排列结构的差异,且对三相不平衡涌流和零模涌流的产生机理及其导致零序保护误动的原因尚缺乏物理机理本质的认识。因此,迫切需要进一步认识和研究高阻抗变压器零模涌流特性及其零序分量对保护的影响。

关于高阻抗变压器零模涌流的研究,文献[21]对变压器零模涌流进行了解析分析并得到了零模电流的等值电路。文献[5, 22]从数学解析、仿真等方面对高阻抗变压器零模涌流进行了分析并提出了保护误动应对策略的思路。对于高阻抗变压器零序电流对保护的影响及对策,文献[23-24]通过仿真分析了变压器剩磁、合闸角和中性点接地方式等因素对零序电流的影响,指出线路零序过流加速段保护在较大的励磁涌流零序电流下具有误动风险,建议通过提高零序过流加速段定值或增加二次谐波制动原理来提高保护的可靠性<sup>[23]</sup>,通过优化零序电流保护定值、增加空载合闸运行及间隔时间、采用涌流抑制措施来保证高阻抗变压器的正常投运<sup>[24-25]</sup>。

综上所述,相关研究只停留在简单的仿真和数学解析,缺乏不同变压器参数特性、零模涌流特性的物理机理阐释,更无从动模试验角度对高阻抗变压器的涌流特性进行试验研究并对理论与仿真分析进行验证。本文对高阻抗变压器参数特性和零模涌流特性进行了物理机理的阐释。参照实际变压器研制了反映电磁暂态过程的内置变、串抗变、普通变的物理模型,构建了动态模拟试验系统,通过动模试验分析比较了剩磁(分闸角)、合闸角、电压、副方绕组接线方式、变压器类型等因素对零模涌流特性的影响。为抵御高阻抗变压器零模涌流引起零序保护误动的风险,提出了调压绕组内置、分合闸角

度匹配和二次谐波制动等应对方法。

## 1 高抗变参数和零模涌流特性的物理阐释

### 1.1 高抗变参数特性的物理阐释

变压器的磁通分布与等值电路中电感的映射关系如图1所示。高压绕组与低压绕组交链的磁通称为“互磁通”,分为通过铁芯部分的“主磁通”和通过间隙的“互漏磁通”,主磁通对应主电感 $L_H+L_F$ (包含线性部分和非线性部分),互漏磁通对应互漏电感 $L_K$ ;高压绕组与低压绕组不交链的磁通称为“自漏磁通”,高压侧自漏磁通对应原方绕组自漏感 $L_\sigma$ ,低压侧自漏磁通对应副方绕组自漏感 $L_{\sigma D}$ 。短路阻抗(电感)为 $L_{12}\% = L_\sigma + L_{\sigma D}$ 。不饱和时,有 $L_F = \infty$ ;饱和时, $L_F = 0$ 。

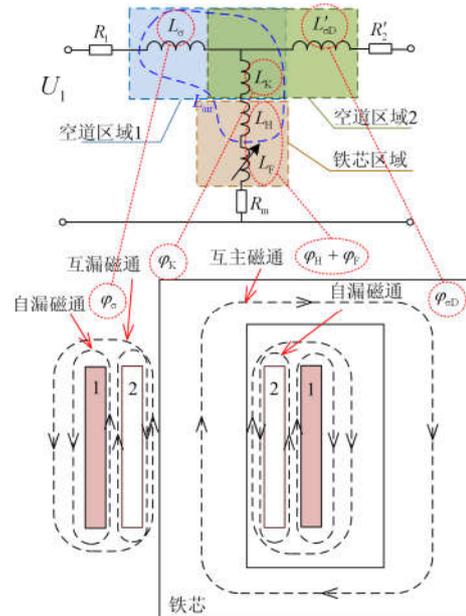


图1 磁通分布与等值电路中电感的映射关系

Fig. 1 Mapping relationship between magnetic flux distribution and inductance in equivalent circuits

高压绕组的自感 $L_{air}$ 满足 $L_{air} = L_\sigma + L_K + L_H$ , $L_{air}$ 又称为空心电感。铁芯饱和时,因为 $L_K$ 和 $L_H$ 都是互感性质的电感,令饱和互感为 $M_{air} = L_K + L_H$ 。根据作者前期发表的文献[5]可知, $L_{\sigma(Tra)} \approx L_{\sigma(Hin)} \approx L_{\sigma(Lse)}$ ;  $M_{air(Tra)} = M_{air(Lse)} > M_{air(Hin)}$ ;  $L_{\sigma D(Tra)} < L_{\sigma D(Hin)} = L_{\sigma D(Lse)}$ 。因此,三种变压器的原方绕组自漏感大致相等。两种高抗变与普通变的差别在于高抗变的副方绕组漏感更大。两种高抗变副方绕组漏感虽然相同,但实现方式不同,内置变通过改变绕组排列及空间距离增大漏磁面积实现而串抗变通过在三角绕组内串联电抗来实现。另外,内置变与同为高抗变的串抗变的差别在于内置变因其高压绕组内置导致

其空心电感及饱和互感变小。

## 1.2 高抗变零模涌流特性的物理阐释

图 2 是  $Y_0/\Delta$  联结的三相变压器励磁涌流等值电路。根据文献[5]得到零模涌流表达式如(1)所示。

$$3i_0(t) = \frac{U_s \left( \sum_{\Lambda} B_r - \sum_{\Lambda} B_J(t) \right)}{\omega B_s \left[ \frac{M_{\text{air}}(L_{s0} + L_{\sigma})}{L_{\sigma D}} + L_{s0} + L_{\sigma} + M_{\text{air}} \right]} \quad (1)$$

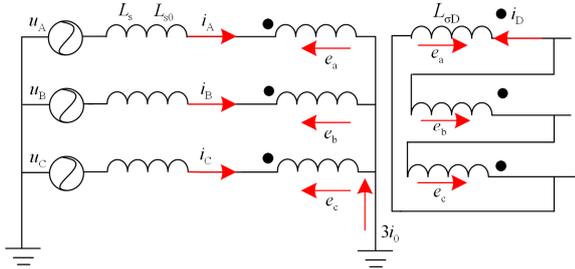


图 2  $Y_0/\Delta$  三相变压器励磁涌流等值电路

Fig. 2  $Y_0/\Delta$  Three-phase transformer magnetizing inrush

$$B_{JA}(t) = \begin{cases} B_s [\cos \alpha - \cos(\omega t + \alpha)] + B_{rA} & |B_{JA}(t)| \leq B_{\text{Sat}} \\ B_{\text{Sat}} & B_{JA}(t) > B_{\text{Sat}} \\ -B_{\text{Sat}} & B_{JA}(t) < -B_{\text{Sat}} \end{cases}$$

$$B_{JB}(t) = \begin{cases} B_s [\cos(\alpha - 120^\circ) - \cos(\omega t + \alpha - 120^\circ)] + B_{rB} & |B_{JB}(t)| \leq B_{\text{Sat}} \\ B_{\text{Sat}} & B_{JB}(t) > B_{\text{Sat}} \\ -B_{\text{Sat}} & B_{JB}(t) < -B_{\text{Sat}} \end{cases}$$

$$B_{JC}(t) = \begin{cases} B_s [\cos(\alpha - 240^\circ) - \cos(\omega t + \alpha - 240^\circ)] + B_{rC} & |B_{JC}(t)| \leq B_{\text{Sat}} \\ B_{\text{Sat}} & B_{JC}(t) > B_{\text{Sat}} \\ -B_{\text{Sat}} & B_{JC}(t) < -B_{\text{Sat}} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} B_{rA} = -K_r B_{\text{Sat}} \cos \theta \\ B_{rB} = -K_r B_{\text{Sat}} \cos(\theta - 120^\circ) \\ B_{rC} = -K_r B_{\text{Sat}} \cos(\theta + 120^\circ) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\theta$  为 A 相分闸角;  $\alpha$  为 A 相合闸角;  $B_r$  为剩磁的磁密;  $K_r$  为剩磁系数;  $B_J$  称为“非饱和和铁芯磁密”;  $B_{\text{Sat}}$  为饱和磁密;  $B_s$  为饱和磁密。

结合上小节讨论得到的三种变压器参数大小关系, 文献[5]得到三者的零模涌流大小的数学对比关系。本文通过等值电路从物理机理角度阐释高抗变的零模涌流特性。图 3 为根据作者前期发表的文献

[21]中推导得到的零模涌流等值电路。根据上述分析, 串抗变参数特性为副方漏感大; 内置变参数特性为副方漏感大和饱和互感小。根据图 3, 可以分析得到: ① 若副方绕组的阻抗  $L_{\sigma D}$  变大, 根据电路分流原理流向原方的零模电流增大; ② 若饱和互感  $M_{\text{air}}$  减小, 总电流将增大。总之, 内置变同时满足两个参数特性, 所以零模电流(流向原方绕组的电流)最大, 而串抗变只具备其中一点, 所以零模涌流虽然比普通变大, 但比内置变小。

除此之外, 根据零模涌流表达式分析可知, 影响零模涌流大小的还有系统电压、剩磁、合闸角等。显然电压越大, 零模涌流越大。一般情况下剩磁由分闸角决定, 从式(1)到式(3)可知, 零模涌流的大小与分闸角和合闸角的相对关系相关(后文详细分析)。副方若为 Y 接, 可等效为  $L_{\sigma D}$  无穷大, 因此理论上副方绕组 Y 接的零模涌流更大。

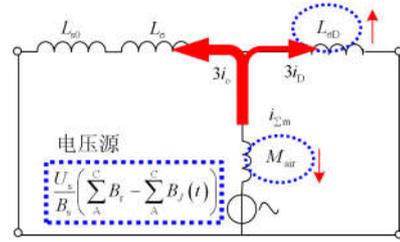


图 3 零模电流等值电路

Fig. 3 Equivalent circuit of zero-mode inrush current

## 2 高阻抗变压器物理模型及试验系统

### 2.1 高阻抗变压器物理模型

为验证上述关于零模涌流的物理阐述, 本部分将以实际变压器为原型制作物理模型并进行动模试验验证, 三种原型变压器的参数如表 1 所示。

表 1 三种实际变压器的参数对比

Table 1 Parameters comparison of three actual transformers

类型	普通变	内置变	串抗变
额定容量/MVA	240/240/80		
额定电压/kV	220/115/10.5		
额定电流/A	629.8/1024.9/4398.9		
空载电流/%	0.05	0.067	0.06
空载损耗/kW	103.4	96.53	95
空心电感/%	34	21	34
短路阻抗/%	H-M	14.17(14)	13.65(14)
	H-L	25.12(24)	36.41(35)
	M-L	8.47(8)	20.64(21)

注: 表中括号内为设计值。

动模实验室的标准电压为 800 V, 为了最大程度模拟原型变压器参数特性, 保证主要参数一致,

在“结构一致，参数等效”的原则下，设计并制作了动模用的内置变和普通变的物理模型。为了节省成本，不重新制作串抗变，而是制作一台电抗器，试验时接入普通变压器三角绕组，变成串抗变。几种变压器物理模型如图 4 所示。

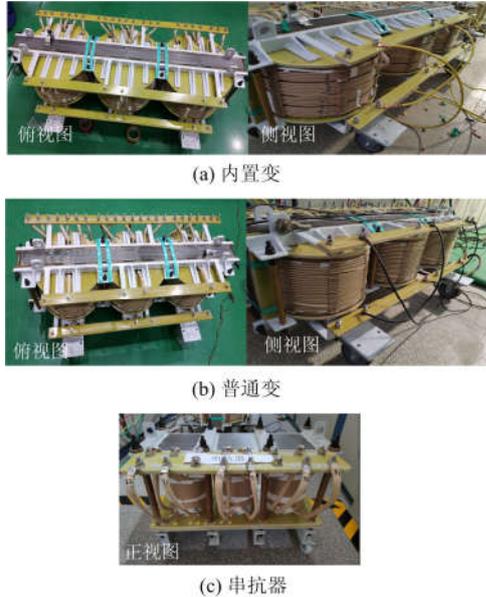


图 4 三种变压器物理模型

Fig. 4 Physical models of three kinds of transformers

研制的变压器物理模型参数如表 2、表 3 所示，参数基本符合原型变的大小关系。

表 2 两种模型变压器的参数对比

Table 2 Parameters comparison of two model transformers

类型	普通变	内置变	
额定容量/kVA	20/20/6.67		
额定电压/kV	0.8/0.4182/0.0382		
额定电流/A	14.4/27.6/100.8		
空载电流/%	2.28	2.82	
空载损耗/W	119	122	
空心电感/%	17.28	14.33	
短路阻抗/%	H-M	13.24	13.37
	H-L	22.27	37.22
	M-L	11.88	29.17
负载损耗/W	H-M	714	985
	H-L	186	420
	M-L	200	471

### 2.2 高阻抗变压器涌流试验系统

为了研究影响高抗变和普通变涌流特性的主要因素，在华中科技大学电力系统动模实验室搭建了高阻抗变压器涌流试验系统。试验系统接线如图 5

所示。21W 为可调压的无穷大系统，最高电压 900V，其中 21T 是调压变。母线上分别连着运行变和空投变，54QF 和 41QF 是断路器，JQF 是具备定角度分合闸功能的合闸控制器。图 6 是涌流试验系统的现场接线图。

表 3 串抗器的参数

Table 3 Parameters of series inductance

类型	串抗器	
额定容量/kVA	0.311	
额定电压/kV	0.0382	
额定电流/A	58.2	
电阻/ $\Omega$ (括号中电抗值)	A-X	0.010613(0.0326)
	B-Y	0.011008(0.0312)
	C-Z	0.010711(0.0302)

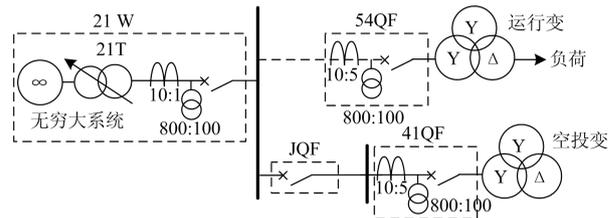


图 5 试验系统的主接线图

Fig. 5 Main wiring diagram of the test system

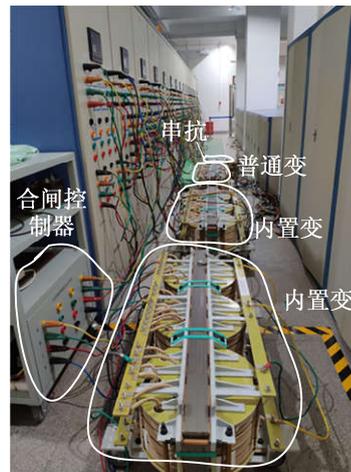


图 6 试验系统的现场接线图

Fig. 6 Field wiring diagram of the test system

### 3 高阻抗变压器动模试验分析

为模拟现场复杂运行工况，进行了单台变压器空投、含带负荷变压器运行且一台空投等多项试验，这里仅介绍单台变压器空投情况。考虑各种因素进行试验，主要的因素如下(以下角度均为 A 相角度)：

- ① 剩磁(60°, 90°, 180° 下的初始剩磁)；

- ② 合闸角( $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ );
- ③ 系统电源电压( $0.9V_N, V_N, 1.1V_N$ );
- ④ 变压器类型(内置变、串抗变、普通变);
- ⑤ 副方接线方式(Y接、D接)。

实验时控制变量, 在研究某个因素的影响时只改变该因素的取值, 其余因素皆为默认值。各个因素的默认取值为: 电压  $V_N$  为 800 V、分闸角  $180^\circ$ 、合闸角  $0^\circ$ 、副方绕组 D 接。

### 3.1 改变剩磁

通过改变分闸角来改变剩磁大小, 本文设定了三种剩磁状态, 分别为  $60^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $180^\circ$  的分闸角断开后产生的剩磁。

图 7 为不同分闸角(剩磁)分闸后, 均以  $0^\circ$  合闸的零模涌流  $3i_0$ 、零序电流有效值  $3I_0$ 、二次谐波比  $I_{2nd}\%$  的试验结果。可以发现, 当分闸角和合闸角差值越大, 零序电流越大, 二次谐波比较高。

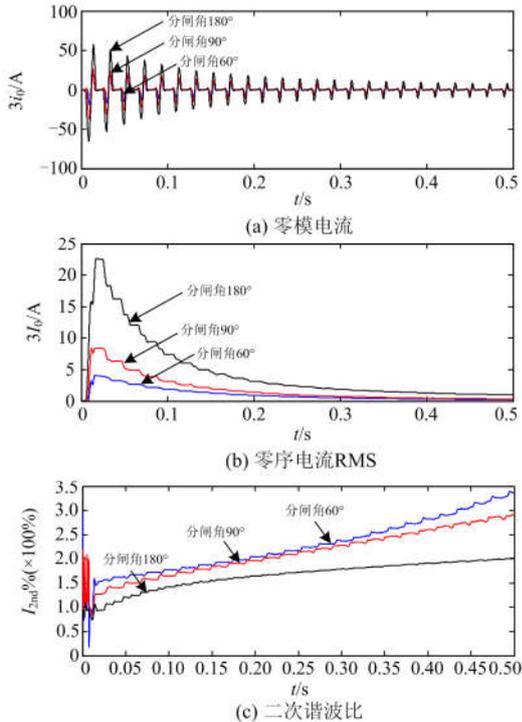


图 7 不同剩磁下的试验结果  
Fig. 7 Test results at different remanence

### 3.2 改变合闸角

通过合闸控制器控制合闸角分别为  $0^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $180^\circ$ 。

图 8 中为均以  $180^\circ$  分闸后(初始剩磁相同), 在不同合闸角下的零模涌流  $3i_0$ 、零序电流有效值  $3I_0$ 、二次谐波比  $I_{2nd}\%$  的试验结果。同样可以发现, 当分闸角和合闸角相差角度越大, 零序电流越大, 二次谐波比较高。

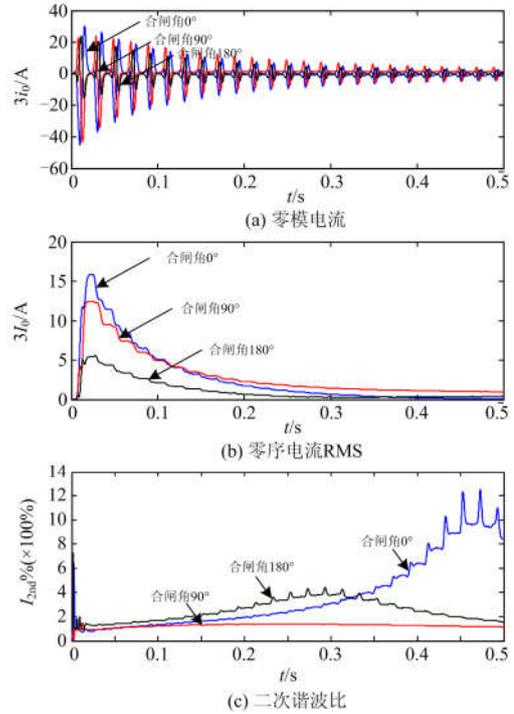


图 8 不同合闸角下试验结果  
Fig. 8 Test results at different closing angle

### 3.3 改变电源电压

通过调节调压器使变压器合闸电压分别为 720 V、800 V 和 880 V。

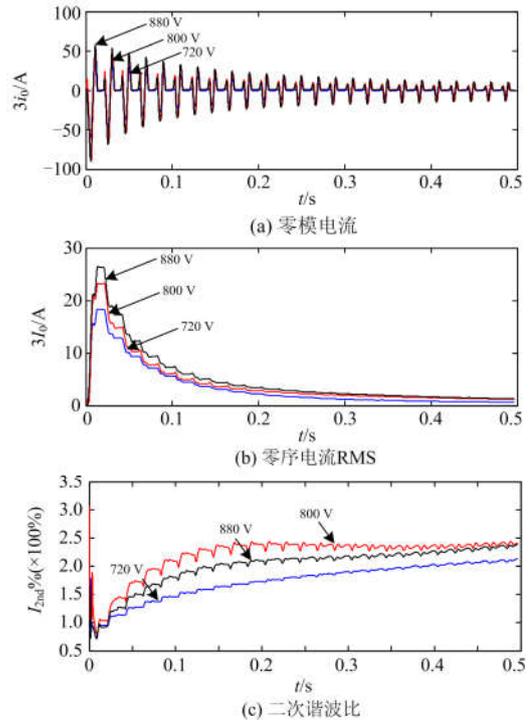


图 9 不同电压下试验结果  
Fig. 9 Test results at different voltage

图 9 中为均以  $180^\circ$  分闸后(初始剩磁相同)以  $0^\circ$  合闸时,在不同电压下零模涌流  $3i_0$ 、零序电流有效值  $3I_0$ 、二次谐波比  $I_{2nd}\%$  的试验结果。可以发现,电压越大,零序电流越大。符合式(1)电压越大,零模电流越大的特点。

### 3.4 改变副方绕组接线方式

通过变更副方压绕组接线,使得副方绕组接线分别为 Y 接和 D 接。

图 10 为均以  $180^\circ$  分闸后(初始剩磁相同)以  $0^\circ$  合闸时,在不同副方绕组接线方式的零模涌流  $3i_0$ 、零序电流有效值  $3I_0$ 、二次谐波比  $I_{2nd}\%$  的试验结果。可以发现, D 接零序电流小于 Y 接。符合上文对式(1)的分析。

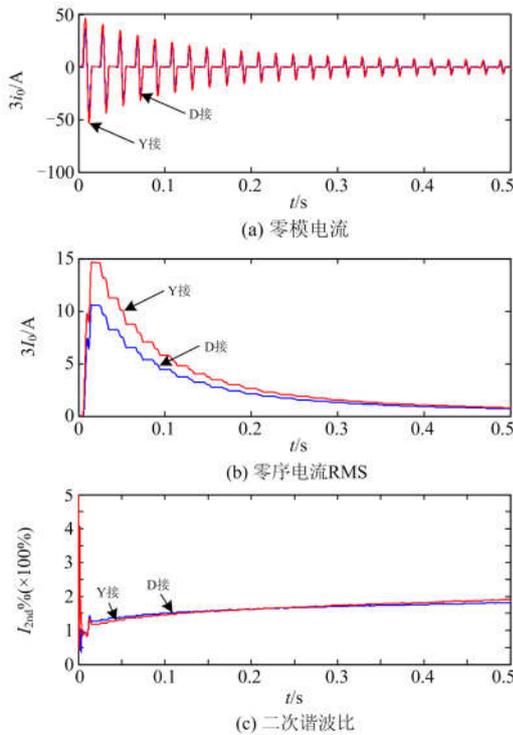


图 10 不同接线下试验结果

Fig. 10 Test results at different connection mode

### 3.5 改变变压器类型

分别对内置变、串抗变和普通变进行空投试验。

图 11 为不同类型变压器均以  $180^\circ$  分闸后(初始剩磁相同)以  $0^\circ$  合闸时的零模涌流  $3i_0$ 、零序电流有效值  $3I_0$ 、二次谐波比  $I_{2nd}\%$  的试验结果。可以发现,内置变的零模涌流最大,串抗变次之,普通变最小,符合上文中利用零模涌流等值电路关于三种变压器零模涌流对比的物理机理分析。

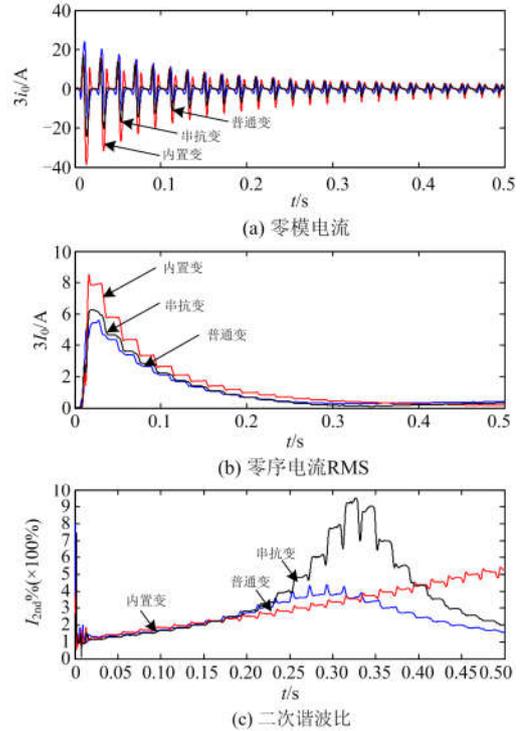


图 11 不同类型变压器的试验结果

Fig. 11 Test results of different kinds of transformers

## 4 高阻抗变压器零模涌流造成零序保护误动的应对策略

为了抵御高阻抗变压器零模涌流对零序保护的影响,主要可考虑优化变压器绕组排列结构、优化合闸控制方式、改进保护原理等方面途径,因篇幅有限下面简要介绍,不详细展开。

### 4.1 调压绕组内置

调整绕组排列结构可以改变阻抗大小。根据附录 A 可知,高阻抗变压器保持高压和中压绕组的距离不变,通过拉大高压和低压绕组之间的空间距离实现高阻抗。如图 12 所示,在普通变压器的基础上,若仅将调压绕组放置于中压和低压之间也能够实现保持高压和中压绕组的距离不变,拉大高压和低压绕组之间的空间距离的目的。

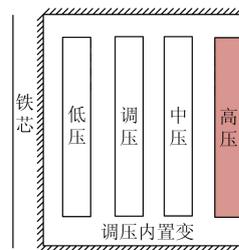


图 12 调压绕组内置型

Fig. 12 Type of tap-changing windings build-in

#### 4.2 基于分合闸角度匹配的零模涌流抑制方法

根据零模电流表达式, 认为合闸时三相剩磁对称, 则式(1)变为

$$3i_0(t) = -k \sum_A^C B_j(t) \quad (4)$$

为了减小零模涌流, 应尽量使  $\sum B_j(t) = 0$ 。三相非饱和磁密的分段时域区间不同, 不能直接相加。求解总和的最小值在这里可以等价求解每相非饱和磁密的最小值。图 13 为各种不同分、合闸角组合下, 零模涌流的基波有效值(零序电流有效值), 可以发现对角线上的值总是最小, 即  $\alpha = \theta$  时最小。即采用以分闸角相同的角度合闸, 零模电流小。因此, 现场具备条件时, 应投运时的合闸角尽量与上一次分闸时的分闸角相同。

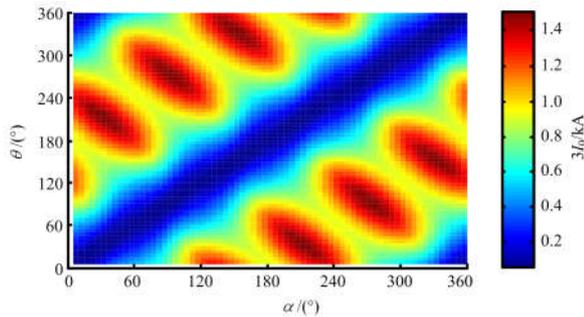


图 13 不同分合闸角度情况下的零序电流

Fig. 13 Zero-sequence current RMS at different opening and closing angles

#### 4.3 基于二次谐波比制动的零序保护改进方法

从上文试验数据可知, 无论何种情况零模涌流的二次谐波比都较高。为了论证该特征并非偶然, 利用式(1)数值模拟了三相对称性剩磁(见图 14)、无剩磁(见附录图 A2)和随机剩磁(见附录图 A3)的情况下的解析结果, 发现零模涌流二次谐波比均较高。二次谐波比的最小值为 0.25, 高于一般涌流的谐波制动门槛。因此零序保护可以增加二次谐波比制动辅助判据。

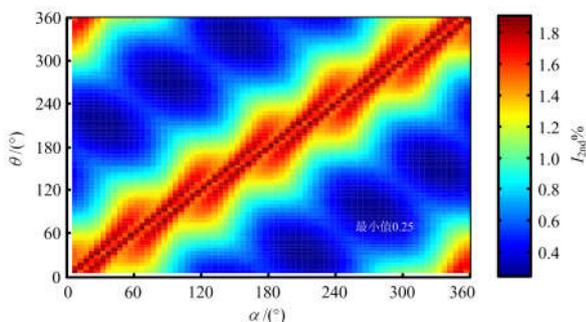


图 14 不同分合闸角度情况下的二次谐波比

Fig. 14  $I_{2nd}\%$  at different opening and closing angles

## 5 结语

针对目前高阻抗变压器涌流的研究缺乏不同变压器参数特性和零模涌流特性的物理机理阐释以及相关动模试验。本文开展了高阻抗变压器零模涌流特性和动模试验的研究, 主要工作如下:

(1) 从物理机理角度阐释了高抗变参数以及高抗变零模涌流特性。根据零模涌流等值电路, 高阻抗和低饱和互感都会使零模涌流变大。内置变同时满足两个参数特性, 其零模电流最大, 而串抗变只具备高阻抗, 其零模涌流虽然比普通变大, 但比内置变小。

(2) 研制了内置变、串抗变、普通变的物理模型, 构建了动态模拟试验系统, 通过动模试验比较分析了剩磁、合闸角、电压、绕组接线方式、变压器类型等因素对零模涌流的影响。结果表明分闸角和合闸角差值越大, 系统电压越大, 零序电流则越大; 副方绕组 D 接的变压器零序电流小于 Y 接的。

(3) 为抵御高阻抗变压器零模涌流引起零序保护误动的风险, 分别从一次结构、合闸控制方式和保护改进等方面提出了调绕组内置、分合闸角度匹配和二次谐波制动等方法。

## 附录 A

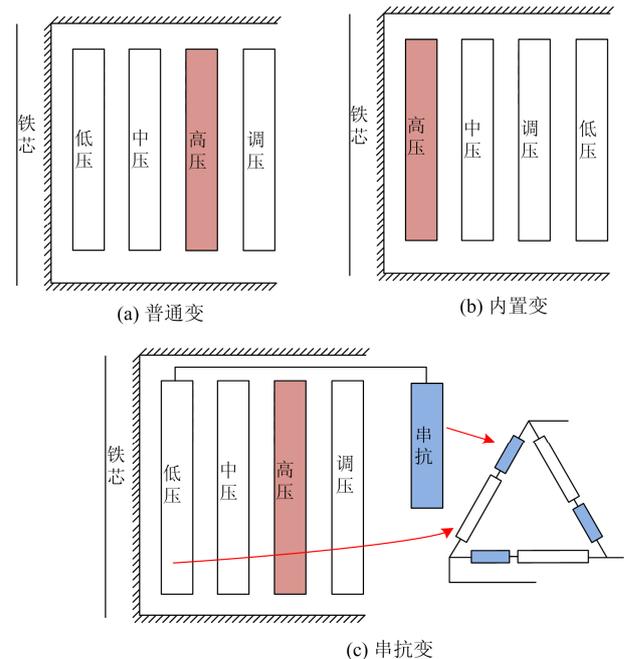


图 A1 几种变压器绕组排列结构比较

Fig. A1 Comparison of several transformer winding arrangement structures

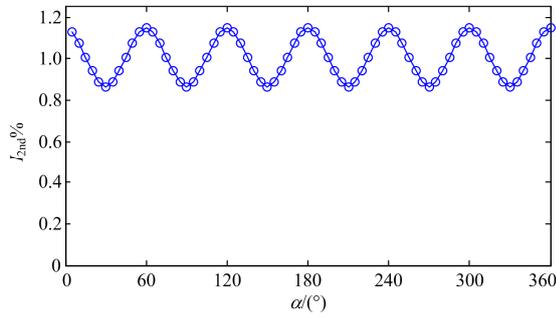


图 A2 无剩磁情况下的二次谐波比

Fig. A2  $I_{2nd}\%$  at different closing angles without remanence

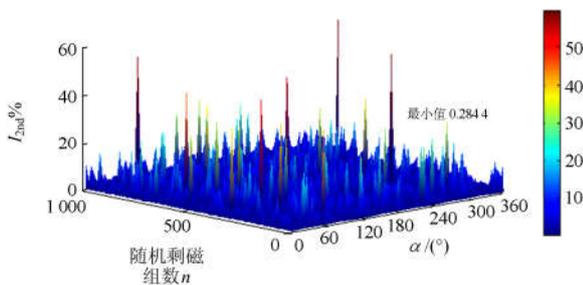


图 A3 随机剩磁情况下的二次谐波比

Fig. A3  $I_{2nd}\%$  at different closing angles with random remanence

参考文献

[1] LI Guodong, LI Gengyin, ZHOU Ming. Model and application of renewable energy accommodation capacity calculation considering utilization level of inter-provincial tie-line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 1-12. DOI: 10.1186/s41601-019-0115-7.

[2] HOU Kaiyuan, SHAO Guanghui, WANG Haiming, et al. Research on practical power system stability analysis algorithm based on modified SVM[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 119-125. DOI: 10.1186/s41601-018-0086-0.

[3] LIANG Zhigang, LIN Xinchun, KANG Yong, et al. Short circuit current characteristics analysis and improved current limiting strategy for three-phase three-leg inverter under asymmetric short circuit fault[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(8): 7214-7228.

[4] LIM S, YOU I, KIM J. Study on peak current limiting characteristics of a flux-lock type SFCL using its third winding[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, 21(3): 1275-1279.

[5] 尹项根, 曹文斌, 潘远林, 等. 高阻抗电力变压器涌流特性及其对保护影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 1-11.

YIN Xianggen, CAO Wenbin, PAN Yuanlin, et al. Inrush current characteristic of high-impedance transformers and its impact on protective relays[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 1-11.

[6] 周雨. 一种 220 kV 高阻抗变压器工程设计新方法[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.

ZHOU Yu. A new engineering design method of 220 kV high-impedance transformer[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.

[7] 李勇, 苏钟焕, 王然丰, 等. 高压内置型高阻抗变压器励磁涌流计算分析[J]. 变压器, 2017, 54(8): 1-5.

LI Yong, SU Zhonghuan, WANG Ranfeng, et al. Calculation and analysis of magnetizing inrush current of high impedance transformer with built-in high voltage winding[J]. Transformer, 2017, 54(8): 1-5.

[8] 李晓华, 罗龙波, 谢金泉, 等. 高压内置型高阻抗变压器涌流特性对保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 108-114.

LI Xiaohua, LUO Longbo, XIE Jinquan, et al. Impact of inrush current characteristics of high-voltage built-in high-impedance transformer on relay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 108-114.

[9] LIN Xiangning, HUANG Jianguang, ZENG Linjun, et al. Analysis of electromagnetic transient and adaptability of second-harmonic restraint based differential protection of UHV power transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2299-2307.

[10] 陈德树, 尹项根, 张哲, 等. 虚拟三次谐波制动式变压器差动保护[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 20-24.

CHEN Deshu, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Virtual third harmonic restrained transformer differential protection principle and practice[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 20-24.

[11] 胡玉峰, 陈德树. 基于采样值差动的励磁涌流鉴别方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 55-58, 63.

HU Yufeng, CHEN Deshu. A new method to identify inrush current based on sampled values[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 55-58, 63.

[12] RUDEZ U, MIHALIC R. A reconstruction of the WAMS-detected transformer sympathetic inrush phenomenon[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 724-732.

[13] HAMILTON R. Analysis of transformer inrush current and comparison of harmonic restraint methods in

- transformer protection[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(4): 1890-1899.
- [14] SAMANTARAY S R, DASH P K. Decision tree based discrimination between inrush currents and internal faults in power transformer[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2011, 33(4): 1043-1048.
- [15] HUANG S, CHEN H, WU C, et al. Distinguishing internal winding faults from inrush currents in power transformers using Jiles-Atherton model parameters based on correlation coefficient[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(2): 548-553.
- [16] 尹项根, 张哲, 王友怀, 等. 变压器间及其与电流互感器暂态交互作用分析和保护对策[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 1-9.  
YIN Xianggen, ZHANG Zhe, WANG Youhuai, et al. Multiple transformers and CTs interactive effect and its impact on the protective relay[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 1-9.
- [17] PENG Fang, GAO Houlei, LIU Yiqing. Transformer sympathetic inrush characteristics and identification based on substation-area information[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(1): 218-228.
- [18] WU Wengcong, JI Tianyao, LI Mengshi, et al. Using mathematical morphology to discriminate between internal fault and inrush current of transformers[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(1): 73-80.
- [19] QI Xuanwei, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Study on the unusual misoperation of differential protection during transformer energization and its countermeasure[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2016, 31(5): 1998-2007.
- [20] DASHTI H, DAVARPANA M, SANAYE-PASAND M, et al. Discriminating transformer large inrush currents from fault currents[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 75: 74-82.
- [21] 王育学, 曹文斌, 黄明辉, 等. 变压器零模涌流解析分析及其等值电路[J]. 电网技术, 2018, 42(12): 3960-3968.  
WANG Yuxue, CAO Wenbin, HUANG Minghui, et al. Mathematical analysis for zero-Mode inrush current of transformer and its equivalent circuit[J]. Power System Technology, 2018, 42(12): 3960-3968.
- [22] 刘尧. 高压内置变压器涌流特性及其导致零序电流保护误动的应对策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [23] 谭靖, 肖浩, 李艳, 等. 基于暂态仿真的主变涌流对线路零序过流保护的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 149-153.  
TAN Jing, XIAO Hao, LI Yan, et al. Study on influence of transformer magnetizing inrush current on the line zero sequence overcurrent protection by transient simulation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 149-153.
- [24] 郭倩雯, 莫文雄, 郑方晴, 等. 高压内置型变压器空投导致零序电流保护误动分析及对策[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 164-170.  
GUO Qianwen, MO Wenxiong, ZHENG Fangqing, et al. Analysis and measures of zero sequence current protection malfunction caused by no-load high-voltage built-in transformer[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 164-170.
- [25] GUO Qianwen, WANG Jin, ZHENG Fangqing, et al. An application of inrush current suppression technology based on CNN in switching operation of high-voltage built-in high-impedance transformer[C] // 2018 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), May 22-25, 2018, Singapore, Singapore: 511-516.

收稿日期: 2020-01-15

作者简介:

尹项根(1954—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护与安全自动控制; E-mail: xgyin@hust.edu.cn

曹文斌(1992—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 1019097704@qq.com

潘远林(1993—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: 2410329909@qq.com

(编辑 姜新丽)