

超/特高压变压器差动 保护关键技术与新原理

郑 涛 王增平 翁汉珺 林湘宁 著



科学出版社

超/特高压变压器差动保护 关键技术与新原理

郑 涛 王增平 翁汉珮 林湘宁 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书针对我国超/特高压变压器差动保护在工程应用中遇到的技术难题开展研究,结合现场误动案例,采取理论分析与仿真试验相结合的研究方法。首先,重点分析了励磁涌流、和应涌流、TA饱和、直流偏磁等因素引起的变压器差动保护误动机理,并提出相应的防误动措施;其次,根据1000kV交流特高压变压器本体结构和工作原理,重点针对特高压变压器空载合闸过程中调压变压器差动保护存在误动风险及特高压有载调压变压器内部故障灵敏度低等问题开展研究,提出相应的解决方案;最后,结合实际超/特高压直流输电工程模型,研究二次谐波制动判据应用于换流变压器差动保护的局限性,并有针对性地提出适用于换流变压器差动保护的新判据。

本书对电力系统继电保护方向研究生、继电保护工程师及相关行业技术人员均有重要的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

超/特高压变压器差动保护关键技术与新原理/郑涛等著. —北京:科学出版社, 2017.9

ISBN 978-7-03-053794-2

I. ①超… II. ①郑… III. ①超高压变压器—差动保护 IV. ①TM424

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第139635号

责任编辑: 闫悦 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张克忠 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年9月第一版 开本: 720×1 000 1/16

2017年9月第一次印刷 印张: 21

字数: 410 000

定价: 108.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

变压器是电力系统中重要电气主设备之一，随着超高压、特高压输电技术的不断发展和我国交直流互联电网的逐渐形成，大型变压器的作用日益突出。然而，差动保护作为变压器内部故障的主保护，其在现场实际应用中却存在一些问题。这在很大程度上制约了我国超/特高压工程中变压器差动保护的性能，影响了交直流电网供电的可靠性，对此亟待开展深入的分析和研究。

本书在介绍变压器差动保护基本原理及相关影响因素的基础上，主要针对近年来我国超/特高压工程中变压器差动保护遇到的新现象和新问题而展开，例如，和应涌流、恢复性涌流、直流偏磁及特高压调压变压器励磁涌流及调挡对差动保护的影响、超/特高压换流变压器差动保护异常动作等，其内容是作者多年相关科研项目研究成果的总结和凝练，理论上具有创新性，部分成果在技术上也具有相当的实用价值。

本书共 8 章，分别为绪论、变压器纵联电流差动保护原理与实现、变压器励磁涌流识别新原理研究、变压器励磁涌流新现象及其影响分析、保护用电流互感器的饱和特性及其对差动保护的影响、直流偏磁产生机理及其对变压器差动保护的影响、交流特高压变压器差动保护特殊问题分析和超/特高压换流变压器差动保护特殊问题分析。

本书由华北电力大学郑涛副教授、王增平教授，三峡大学翁汉珺副教授，华中科技大学林湘宁教授共同撰写，其中第 1~7 章由郑涛撰写，第 8 章由翁汉珺撰写，全书由郑涛统稿，王增平、林湘宁审校。

感谢国家重点研发计划“智能电网技术与装备”重点专项（2016YFB0900604），国家自然科学基金项目（51677069，51607106）对本书的资助。

此外，北京电力科学研究院谷君博士、北京四方继保自动化有限公司的肖远清高级工程师及华北电力大学的陈佩璐、吴丹、陆格野、黄婷、胡鑫、余青蔚等硕士研究生对本书部分研究工作也作出了重要贡献，在此表示衷心的感谢。

作者希望通过本书分享已有及最新研究成果，为提高我国超/特高压电网变压器差动保护性能贡献一份绵薄之力。由于作者水平和实践经验有限，书中难免有不足之处，敬请读者批评指正。

作 者

2017 年 4 月

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 变压器差动保护的发展现状	1
1.1.1 防止励磁涌流造成变压器差动保护误动	1
1.1.2 变压器励磁涌流新现象及其影响	3
1.1.3 防止 TA 饱和造成变压器差动保护误动	4
1.1.4 直流偏磁对变压器差动保护的影响	5
1.1.5 交流特高压变压器差动保护特殊问题	6
1.1.6 超/特高压换流变压器差动保护特殊问题	7
1.2 变压器差动保护技术的发展趋势	8
参考文献	9
第 2 章 变压器纵联电流差动保护原理与实现	13
2.1 电力变压器故障类型及差动保护基本原理	13
2.1.1 变压器故障类型及不正常运行状态	13
2.1.2 变压器差动保护基本原理	13
2.2 变压器差动保护的不平衡电流	15
2.2.1 变压器两侧绕组接线方式不同引入的不平衡电流	15
2.2.2 电流互感器变比与变压器变比不一致产生的不平衡电流	16
2.2.3 电流互感器传变误差产生的不平衡电流	17
2.2.4 变压器励磁涌流产生机理及其特征	18
2.2.5 减小不平衡电流的主要措施	23
2.3 比率制动特性	24
2.4 三相变压器的相位补偿方式	26
2.4.1 三种电流相位补偿方式	26
2.4.2 不同电流相位补偿方式的分析比较	29
2.5 变压器 Δ 侧绕组中环流计算方法	33
2.5.1 Δ 侧绕组中环流的求解方法	33
2.5.2 仿真验证	36
2.6 本章小结	38

参考文献	38
第 3 章 变压器励磁涌流识别新原理研究	39
3.1 基于数学形态学的励磁涌流识别新原理	39
3.1.1 概述	39
3.1.2 数学形态学	39
3.1.3 基于数学形态学提取电流波形特征的励磁涌流识别新方法	43
3.2 基于等效瞬时励磁电感的变压器励磁涌流识别新原理	53
3.2.1 概述	53
3.2.2 等效瞬时励磁电感的基本原理	53
3.2.3 对基于等效瞬时励磁电感变化量识别涌流判据的分析	61
3.2.4 基于归一化等效瞬时励磁电感分布特性识别励磁涌流的新方法	63
3.3 基于变压器回路方程的励磁涌流识别原理	72
3.3.1 概述	72
3.3.2 动作方程的推导	72
3.3.3 基于变压器回路方程的励磁涌流识别新判据	80
3.4 基于模糊理论的变压器励磁涌流识别新原理	83
3.4.1 概述	83
3.4.2 模糊理论的数学基础	83
3.4.3 基于模糊逻辑的变压器励磁涌流二次谐波闭锁新原理	85
3.4.4 基于多判据融合的励磁涌流模糊识别方案	90
3.5 本章小结	96
参考文献	96
第 4 章 变压器励磁涌流新现象及其影响分析	98
4.1 变压器和应涌流产生机理及其影响分析	98
4.1.1 变压器和应涌流现象	98
4.1.2 变压器和应涌流仿真模型的建立	99
4.1.3 变压器和应涌流的产生机理及影响分析	100
4.1.4 变压器和应涌流的特性	104
4.2 变压器恢复性涌流产生机理及其影响分析	105
4.2.1 变压器恢复性涌流现象	105
4.2.2 变压器恢复性涌流仿真模型的建立	105
4.2.3 变压器恢复性涌流的产生机理	106
4.2.4 变压器恢复性涌流的影响因素分析	108
4.2.5 变压器恢复性涌流对差动保护的影响	110

4.3	非同期合闸励磁涌流特征及其影响分析	112
4.3.1	非同期合闸励磁涌流现象	112
4.3.2	Y/Δ接线变压器空投的过程分析	113
4.3.3	非同期空投引起差动保护误动的原因分析	117
4.3.4	变压器非同期空投的识别方案	119
4.3.5	变压器非同期空投的防误动措施	126
4.4	本章小结	130
	参考文献	130
第 5 章	保护用电流互感器的饱和特性及其对差动保护的影响	132
5.1	保护用 CT 的传变特性	132
5.1.1	CT 的基本工作原理	132
5.1.2	CT 的稳态饱和特性	134
5.1.3	CT 的暂态饱和特性	137
5.1.4	暂态过程中特殊的饱和情况	145
5.2	CT 传变特性对差动保护的影响	149
5.2.1	变压器区外故障切除后 CT 传变特性及对差动保护的影响	149
5.2.2	变压器转换性故障时 CT 饱和特性及对差动保护的影响	156
5.2.3	内桥接线方式下 CT 饱和特性及对变压器差动保护的影响	156
5.3	防止 CT 饱和引起变压器差动保护误动的方案	163
5.3.1	差动保护中 P 级 CT 的“同型”匹配方案	163
5.3.2	基于多分区延时法的防止变压器区外故障切除后差动保护误动的措施	173
5.3.3	基于数学形态梯度的时差法及变压器转换性故障识别判据	179
5.3.4	内桥接线方式下变压器差动保护防误动措施	190
5.4	本章小结	193
	参考文献	194
第 6 章	直流偏磁产生机理及其对变压器差动保护的影响	196
6.1	直流偏磁产生机理及其等效模型	196
6.1.1	HVDC 型直流偏磁分析模型	196
6.1.2	GIC 型直流偏磁分析模型	198
6.2	直流偏磁对保护用电流互感器传变特性的影响	201
6.2.1	HVDC 型直流偏磁对 TA 起始饱和时间的影响	201
6.2.2	GIC 型直流偏磁对 TA 传变特性的影响机理	203
6.2.3	GIC 型与 HVDC 型直流偏磁对 TA 传变特性影响的比较	205
6.3	直流偏磁对变压器差动保护的影响	206

6.3.1	HVDC 型直流偏磁引发的 TA 饱和及其对差动保护的影响	206
6.3.2	GIC 型直流偏磁引发的 TA 饱和及其对差动保护的影响	210
6.3.3	GIC 在电力变压器三相绕组中的分布特性及其对变压器差动保护的影响	222
6.4	本章小结	239
	参考文献	240
第 7 章	交流特高压变压器差动保护特殊问题分析	242
7.1	交流特高压变压器本体结构及其保护配置	242
7.1.1	交流特高压变压器本体结构及其工作原理	242
7.1.2	交流特高压变压器保护配置	244
7.1.3	交流特高压变压器差动保护的的特殊问题	247
7.2	特高压调压变压器励磁涌流特征及其判别新原理	249
7.2.1	交流特高压变压器励磁涌流复杂性分析	249
7.2.2	现场保护误动案例分析	252
7.2.3	调压变压器差动保护励磁涌流判别法	253
7.3	特高压调压变压器挡位调节自适应差动保护新原理	260
7.3.1	交流特高压变压器调压原理分析	260
7.3.2	有载调压变压器差动保护策略分析	261
7.3.3	有载调压变压器差动保护自适应算法	263
7.3.4	自适应差动保护动作特性分析	267
7.4	直流偏磁对交流特高压变压器的影响研究	271
7.4.1	直流偏磁电流分布特征	271
7.4.2	直流偏磁对铁心磁通的影响	274
7.4.3	影响因素分析	277
7.4.4	差动保护动作特性分析	279
7.5	本章小结	282
	参考文献	282
第 8 章	超/特高压换流变压器差动保护特殊问题分析	284
8.1	换流变压器接线方式和差动保护配置介绍	284
8.1.1	换流变压器接线及运行方式	284
8.1.2	换流变压器差动保护配置介绍	285
8.1.3	换流变压器差动保护存在的异常动作行为	285
8.2	换流变小差保护异常动作行为分析及对策研究	287
8.2.1	换流变空载合闸小差保护误动分析	288
8.2.2	区内故障换流变小差保护拒动分析	289

8.2.3	基于时差法的换流变内部故障和励磁涌流识别·····	292
8.3	特高压换流变对称性涌流对大差保护的影响及保护新判据·····	299
8.3.1	特高压换流变对称性涌流及其引起大差保护误动现象·····	299
8.3.2	特高压换流变空投对称性涌流生成机理分析·····	301
8.3.3	特高压工程模型及对称性涌流引起大差保护误动仿真分析·····	303
8.3.4	基于 Hausdorff 距离算法的特高压换流变大差保护新判据·····	315
8.4	本章小结·····	325
	参考文献·····	325

第1章 绪 论

1.1 变压器差动保护的发展现状

变压器是电力系统中重要的电气主设备之一，它在整个电力系统中起着能量传递的作用。随着超高压、特高压输电技术的不断发展和全国互联电网的逐渐形成，大型变压器的作用也日益突出，提高变压器工作的可靠性对保障整个电力系统的安全稳定运行具有十分重要的意义。

差动保护作为电力变压器的主保护之一，是建立在严格的基尔霍夫电流定律（Kirchhoff's circuit laws, KCL）基础上的。差动保护在发电机和线路上的应用较为成功，而作为变压器内部故障的主保护，差动保护在原理及现场实际应用中，均存在一些问题。与传统线路上的差动保护有所不同，由于变压器一、二次绕组之间不存在直接的电气联系，而是根据稳态运行时的磁路平衡关系将其原、副边电气量联系起来的。当系统发生扰动或故障时，对于处在暂态过程中的变压器将不再满足该平衡关系。因此需要对其暂态过程的特性进行准确的检测，以避免变压器差动保护在此过程中发生误动^[1]。目前变压器差动保护在应用过程中主要存在：如何防止励磁涌流造成变压器差动保护误动，和应涌流对变压器差动保护的影响，如何防止电流互感器（TA）饱和造成变压器差动保护误动以及直流偏磁对交流超/特高压变压器、换流变压器差动保护的影响等问题^[2-6]。针对以上问题，近几年国内外已有许多专家学者进行了大量的研究工作，并取得了诸多成果。

1.1.1 防止励磁涌流造成变压器差动保护误动

变压器空载合闸会产生较大的暂态励磁电流，即励磁涌流，其峰值可达额定电流的6~8倍^[7]，如果没有相应的防范措施，励磁涌流会导致变压器差动保护误动作。

目前工程上大多是根据励磁涌流与故障电流在波形特征上的差异来进行励磁涌流的识别，例如，二次谐波制动^[2-5]原理、间断角原理^[7]，以及波形对称原理^[8-11]等方法。而随着变压器主保护、后备保护一体化方案的认可和广泛采用，在变压器保护装置中引入电压量也成为可能，综合电压、电流两个状态变量来描述变压器的运行状态，信息更具完备性，为更好地识别励磁涌流提供了新的方法和途径。目前已提出的此类方法主要为基于励磁阻抗变化和等效瞬时电感变化^[12-14]的识别方法。

1. 二次谐波制动原理

研究表明,由于铁心饱和等因素的影响,变压器励磁涌流中含有较大的二次谐波分量,而当变压器发生区内故障时,差电流中的二次谐波含量则远远小于发生涌流时的情况^[15,16]。根据该特点,可通过计算差电流中二次谐波所占比例(与基波相比)来判断变压器是否发生了内部故障。但是该方法也存在一定的局限性,例如,大型变压器严重故障时由于谐振的影响使暂态电流中产生较大的二次谐波分量,导致基于二次谐波制动原理的差动保护发生延时动作。微机保护中广泛采用基于傅里叶分析的谐波处理方法,对于变压器空载合闸或故障暂态过程中的电流,由于其可能含有较大的直流衰减分量,采用傅里叶方法对其进行处理,将可能影响二次谐波分析的准确性,甚至导致判断出错。

2. 间断角原理

一般情况下,当变压器产生励磁涌流时,由于铁心饱和的影响,涌流波形中将呈现较为明显的间断特征,而对于故障电流波形则不存在该现象^[7]。间断角原理最为突出的特点是可以采用分相制动方案,从而在对存在内部故障的变压器进行空载合闸操作时,能确保保护快速跳闸。而根据目前的研究,间断角原理应用于变压器差动保护装置时也同样面临着一些问题^[17,18],例如,对继电保护装置硬件方面的要求有所加大,需要采用较高的采样频率,对处理器性能的要求有所提高等。

3. 波形对称原理

波形对称原理是通过分析差动电流波形的特征,利用一个周期内前半波与后半波的对称性判断是否发生内部故障。现有方法有微分波形对称法^[19](首先对差动电流进行微分计算,在此基础上,对微分后的波形进行对称性比较,如果其前、后半波的对称性较强,则判断变压器发生内部故障,否则便视为励磁涌流)、积分波形对称法^[20](通过对电流波形的大小、形状以及变化率等多种特征因素进行综合判别得到,首先需要对变压器差动电流波形中的前、后半波数据进行积分运算,进而得出相关的波形对称系数,在此基础上,结合模糊识别方法,对于不同的对称系数进行相关计数,若计数结果小于设定值,则判断变压器发生区内故障,反之则判断为励磁涌流,同时根据识别结果对保护装置采取相应的处理措施)、基于波形相关性的分析方法^[21](不仅仅是利用电流的单一特征进行分析判断,而是对相关电流波形的多种信息进行综合分析判断),上述方法具有重要价值,但是在现场实际运行中,有可能出现保护误动的情况。

4. 基于励磁阻抗或等效瞬时电感变化的识别方法

基于励磁阻抗或等效瞬时电感变化的识别方法是根据变压器励磁涌流产生的本质,即铁心磁路饱和机理出发的。当变压器产生励磁涌流时,其励磁阻抗或励磁电感将发生明显变化,而正常运行或故障时则基本不变,依据该特性可区分变压器的励磁

涌流与内部故障。以励磁阻抗为例,文献[22]为了反映励磁阻抗的变化规律,首先通过对测量阻抗 $Z(t)$ 进行定义,规定 $U(t)$ 与 $I(t)$ 的比值为 $Z(t)$,其中 $U(t)$ 、 $I(t)$ 分别表示对应时刻下采用滤波算法得到的电压、电流幅值,其数学期望如式(1-1)所示。

$$E(z) = \frac{1}{T} \int_0^T Z(t) \cdot dt \quad (1-1)$$

测量阻抗与其数学期望的均方差可表示为

$$\sigma Z(t) = \sqrt{E\{[Z(t) - E(z)]^2\}} \quad (1-2)$$

式中, $\sigma Z(t)$ 反映测量阻抗 $Z(t)$ 的变化程度(即励磁阻抗的变化程度)。当 $\sigma Z(t)$ 大于设定门槛值时,为励磁涌流;若小于门槛值,则判断为内部故障。该方法适用于单相双绕组变压器,以及由三个单相变压器构成的三相变压器组。然而其是否同样适用于三相三柱式或三相五柱式变压器,还有待进一步详细探讨和研究。尤其是对于采用 Δ 型接线的三相变压器,由于 Δ 侧绕组内部环流对励磁阻抗或励磁电感计算结果影响大,而又难以对 Δ 侧绕组中的环流进行准确的测量,从而在很大程度上制约了基于励磁阻抗或励磁电感的变化来识别励磁涌流的可行性。

1.1.2 变压器励磁涌流新现象及其影响

1. 和应涌流及其影响

多台变压器并列运行时,其中一台变压器在投运过程中会在相邻的变压器中产生和应涌流的现象,国外早在 1941 年就通过现场波形记录、试验测试和电流表达的数学推导对和应涌流现象进行了深入的分析,并讨论了和应涌流对变压器差动保护和过流保护的影响^[23]。文献[24]通过数值仿真一台变压器空投充电,而另外一台空载、负载或有并联电容器的变压器正在并联运行时,两台变压器的电流、磁链和公共连接点的电压变化,分析了影响和应涌流的部分因素。文献[25]、文献[26]通过仿真分析并联和级联变压器两种系统结构形式,指出空投一台变压器时,励磁涌流在系统和变压器间电阻上产生的不对称电压,会在变压器之间产生一种暂态和应作用,不但使空投变压器的励磁涌流的幅值和持续时间发生变化,而且在运行变压器中将产生和应涌流,结果导致运行变压器差动保护误动和长时间的谐波过电压。

国内对和应涌流的认识主要是根据波形对其特性进行描述^[27],通过合理简化两台变压器并联和级联结构的模型,从磁链变化的角度分析了运行变压器中和应涌流的发生、发展的过程以及影响因素,并辅以考虑变压器饱和特性的数值仿真做进一步研究。初步分析出和应涌流中二次谐波含量的变化特点以及较大的直流衰减分量使 TA 暂态饱和是导致变压器纵差保护误动的原因^[28]。文献[29]分析和应涌流的产生机理及其对差动保护的影响,通过理论分析和实验结果得出结论:由于相邻变压器空投励磁涌流中的非周期分量流过系统电阻,导致公共节点上电压的非周期波动,引起该变压器

产生和应涌流,指出了在运行中应该注意的问题和方法,但未从保护判据方面提出防止和应涌流引起变压器差动保护误动的措施。

2. 恢复性涌流及其影响

近年来,出现多次变压器区外故障切除后差动保护误动的报道^[30-33],引起了人们对故障切除后变压器恢复性涌流对差动保护影响的关注^[30,31]。

文献[30]研究表明变压器区外故障切除后形成的恢复性涌流峰值较小,难以达到差动保护的启动值,且其二次谐波含量并不低,即使恢复性涌流能够满足差动保护的启动条件,二次谐波制动判据也能够正确闭锁差动保护。文献[32]分析恢复性涌流的性质,认为其与空载合闸涌流相似,并得出结论:在外部故障切除后,特定的条件下,TA可能仍有一段时间处在饱和区,产生较大的差流,引起差动保护误动。文献[33]分析了变压器外部故障切除后,恢复性涌流可能导致TA局部暂态饱和,进而产生幅值相对较大的差流引起差动保护误动。

3. 非同期合闸涌流及其影响

高压断路器分、合闸的同期性是检验断路器机械特性的重要参数,如果分、合闸时间不同期,将造成线路或变压器非全相接入或切断,甚至出现危害绝缘的过电压。电力系统规程要求三相断路器触头闭合时间差不能超过 5ms ^[34]。断路器三相非同期合闸时间差具有一定的随机性。

对电力变压器而言,当断路器三相非同期空投时,由于已合闸相对未合闸相的影响(例如,A相对B相),可能使得后合闸相铁心中的磁链远远大于饱和值,甚至可能导致变压器铁心发生超饱和,此时的励磁涌流波形接近正弦波,二次谐波含量降低,间断角消失,使现有的涌流判据失效^[35,36],从而导致变压器差动保护误动作。

1.1.3 防止TA饱和造成变压器差动保护误动

电流互感器是电力系统中重要的测量元件,在继电保护中起着举足轻重的作用。无论是传统的模拟式继电保护还是目前广泛采用的微机式继电保护装置,都需要将流过TA的一次侧电流传变至二次回路。当电力系统发生故障时,TA的一次电流可能达到正常运行时电流的几十倍甚至上百倍,且往往含有以指数形式衰减的直流分量,使得TA可能进入饱和状态。另外,铁心中往往存在剩磁,若剩磁极性同故障电流所产生的磁场极性相同,则会使铁心更加容易饱和。TA铁心饱和时,二次电流出现畸变,不能准确反映一次电流,从而可能导致变压器差动保护无法正确动作^[37-39]。可见TA的传变性能对于保护装置的可靠性起着至关重要的作用。

国内外专家学者针对如何防止TA饱和引起变压器差动保护误动的问题提出了诸多方法^[40-43]。目前,在工程上普遍采用的带有比率制动特性的差动保护具有一定的抗TA饱和能力,能够在一定程度上避免变压器发生区外故障时由于TA饱和造成的误动。

但当 TA 发生严重饱和时, 由于制动电流小, 差动电流增大, 差动保护仍可能误动。增大制动系数虽然有助于提高差动保护在区外故障下抗 TA 饱和的能力, 但其增大的幅度有限, 因为这是以降低差动保护区内故障的灵敏度为代价的。由此可见, 若要防止区外故障时由于 TA 饱和引起的差动保护误动, 必须辅以其他鉴别 TA 饱和的措施, 如谐波制动法^[40]、小波奇异性检测法^[41,42]、时差法等^[43]。

谐波制动法是根据电流中二次和三次谐波含量的大小来判别 TA 是否发生饱和。当检测到相电流中二次和三次谐波含量超过设定的门槛值则判定 TA 饱和, 闭锁差动保护。但该方法对于 TA 饱和情况下发生的区内故障或转换性故障(区外转区内), 可能会使差动保护产生较长的动作延时甚至拒动。小波奇异性检测法是利用小波变换的奇异性检测原理来识别 TA 二次电流的进饱和点和退饱和点, 从而实现在 TA 的线性区开放差动保护的设想。该方法在理论上具有先进性, 但若工程实用化, 还有许多具体技术问题需要解决。时差法是通过检测故障发生时刻和差动电流增大时刻是否同步来判别区内和区外故障, 其技术关键是准确定位故障发生时刻和差动电流增大时刻, 当区外发生严重故障且 TA 在 1/4 周内快速饱和时, 故障发生与差动电流增大的时差很微小, 且该方法对于在 TA 饱和情况下发生的转换性故障的识别还存在一定难度。

在电力系统实际运行中, TA 的局部暂态饱和以及超饱和也是引起变压器差动保护误动的重要影响因素。根据文献[33]的分析, 当变压器发生和应涌流或穿越性涌流等情况时, 若 TA 长时间处于非周期分量的作用下, 可能出现局部暂态饱和现象。文献[44]在分析和应涌流对差动保护的影响时指出: 和应涌流本身并不会引起差动保护误动, 而由和应涌流所引发的 TA 局部暂态饱和才是引起差动保护误动的主要原因, 并提出利用改进比率制动特性的方法防止差动保护误动。文献[45]指出变压器在区外故障切除后, 可能导致变压器铁心发生饱和, 相应的涌流特征消失, 从而导致差动保护误动。

1.1.4 直流偏磁对变压器差动保护的影响

直流偏磁是指由于某种原因在变压器或 TA 的励磁电流中出现了直流分量, 导致铁心半周磁饱和, 以及由此引起的一系列电磁效应^[46,47]。目前直流偏磁对继电保护的影响研究主要集中在变压器直流偏磁引起的附加效应对继电保护的影响上。

美国电网继电器委员会(Power System Relaying Committee)研究了直流偏磁对变压器的影响, 其中分析了包括三相三柱、三相五柱和单相变压器组等五类变压器受直流偏磁的影响程度, 认为由于变压器直流偏磁引起的谐波, 造成中性点零序电压保护、电容器过流保护和电容器过压保护误动, 且直流偏磁会使变压器铁心发热引起瓦斯保护动作, 而励磁激增则会造成交压器差动保护误动^[48]。

国内在有关直流偏磁对变压器影响的仿真研究以及理论分析方面, 也得到了许多研究成果, 但绝大部分的研究主要是针对变压器本体受到的影响做细致的分析, 而对变压器保护影响方面的内容涉及较少。并且, 许多文献在建模以及实验过程中对直流

源的引入方式未给予足够重视,文献[49]仅考虑直流的作用,未计及交流,该方法研究地磁感应电流(geomagnetically induced current, GIC)型直流偏磁易产生较大误差。文献[50]针对三峡龙泉—江苏政平的500kV直流系统出现的变压器偏磁问题进行了研究,重点关注直流换流站切换滤波器时的谐波含量对零序方向保护和距离保护的影响。通过OMICRON试验装置分别在电网正常运行及发生故障的两种情况下进行测试,ABB、GE、南瑞公司的保护装置均接受了测试。研究结果表明直流偏磁下产生的电网谐波未造成保护装置的不正确动作,因此认为变压器直流偏磁产生的谐波对电网中的保护控制设备影响不大,可通过适当调节、校验保护整定值避免其影响。事实上,根据对GIC引发的数次电网事故的分析,变压器半波饱和产生的谐波、无功波动、电压跌落等并不是唯一的事故诱因,TA的传变特性、继电保护的协调控制策略等也是引发事故的重要因素,在研究中应予以重视。

有关直流偏磁的影响,目前的研究一般将由GIC引发的直流偏磁和由高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)引发的直流偏磁视作等同。在研究手段上通常将GIC简化为直流电流进行处理^[51-53]。近年来已有研究者注意到GIC在时域上的变化特征,如文献[54]用方波来模拟GIC,文献[55]用阶跃函数来模拟GIC,但仅研究了GIC的幅值变化与变压器温升的关系。从直流偏磁的产生机理来看,HVDC引发的偏磁电流由极址土壤中形成的一个恒定直流电场驱动,当系统运行方式不变时,偏磁电流恒定且为纯粹的直流电流,仅对直流接地极附近的电网产生一定的影响。而GIC引发的偏磁电流的方向、幅值和频率是随着全球性地磁场扰动而变化的,其幅值可能高达上百安培,影响范围甚广,并且越高电压等级的电网所受影响越严重,因此在论及两者对TA传变特性产生的影响时,加以必要的区分具有重要的意义。

1.1.5 交流特高压变压器差动保护特殊问题

特高压变压器作为特高压电网中的重要设备之一,与传统电力变压器的结构存在很大差异。特高压变压器采用分体式结构^[53],单独设置外接调压变压器,改变分接头位置调节500kV侧母线电压;设置补偿变压器以减小挡位调节时110kV侧母线电压的波动^[54,55]。特高压变压器的保护配置也更为复杂,分别给调压变压器和补偿变压器配置独立的分相比率差动保护,确保保护装置能准确迅速切除区内轻微故障^[56]。

2008年,在特高压变压器现场调试过程中曾发生过两次当500kV侧空载合闸时,调压补偿变压器差动保护因励磁涌流未闭锁出现误动的情况。经过对现场录波数据的分析,发现这两次合闸时调压变压器的励磁涌流比较大,且差流中二次谐波含量小于涌流闭锁整定值,因此导致变压器差动保护误动作。针对误动情况,国内很多研究机构进行了有关的理论和仿真分析,对励磁涌流的判据问题做了有益的研究工作,得到如下结论:纵联电流差动保护能反映主变压器绕组内部故障,而对于调压绕组和补偿绕组的内部故障则明显灵敏度不足,说明了配置调压绕组差动保护和补偿绕组差动保护的充分性和必要性^[55]。文献[57]基于电磁暂态仿真软件EMTDC建立了特高压变压

器仿真模型。在特高压环境下,分别进行励磁涌流和故障电流仿真,并用于考察应用最为广泛的二次谐波闭锁策略的动作可靠性,得出结论:当合闸角和剩磁满足一定条件时,特高压变压器三相励磁涌流的二次谐波含量都会在10%以下,即使采用一相制动三相的二次谐波闭锁策略,如果二次谐波门槛值维持在15%~20%,也不能避免差动保护误动;另外,在某些轻微故障的情况下,故障初期故障电流的二次谐波含量成分较高,会使保护动作延迟^[57]。文献[56]从工程应用的角度分析了特高压变压器励磁涌流特点,提出利用消磁法抑制励磁涌流,能够在一定程度上避免空充时差动保护误动。调压变压器差动保护是特高压变压器保护的薄弱环节,提升调压变压器差动保护的可靠性和灵敏性,对于提高交流特高压变压器保护的整体性能具有重要意义。

1.1.6 超/特高压换流变压器差动保护特殊问题

根据我国资源分布和能源需求的特点,国家正快速推进高压直流输电工程的建设,将逐渐形成复杂的大规模交直流混联电网,而作为耦合交直流互联系统的关键性主设备,换流变压器的运行及其所配置保护的可靠性至关重要。

换流变压器因其应用场合特殊,在保护配置方面以及接线方式上与普通常规变压器有显著区别。换流变压器通常是由一台Y/Y接线变压器和一台Y/D接线变压器并联运行形成一组12脉动换流变组,一组两台换流变压器总是同时投切。因此,除了对一组两台变压器单独配置各自的差动保护(小差保护)作为主保护,还对该组换流变压器配置有大差保护。目前的换流变压器大差保护与小差保护工程实践上均采用基于二次谐波制动原理的差动保护。

由于换流变压器复杂的运行环境和特殊的运行方式,其在空载合闸及故障复电过程中更容易出现严重且具有非常规特征的励磁涌流及和应涌流现象,严重涌流的频发与新特征可能导致基于二次谐波制动原理的换流变压器小差和大差保护的误动作,严重时将引起直流单极甚至双极闭锁。实际上,换流变压器空投导致差动保护误动的案例已有多次报道^[58,59],这引起国内研究人员的关注,并开展对换流变压器励磁涌流特征及其对差动保护影响的研究。例如,文献[60]分析了500kV高岭背靠背换流站空充变压器时的励磁涌流特性,验证了合闸电阻对换流变压器空载充电励磁涌流的抑制效果。文献[61]对换流变压器经历涌流和故障时的电流波形特征进行了分析,提出换流变压器遭遇和应涌流时,涌流中衰减缓慢的非周期分量易使TA暂态饱和,形成差流导致小差保护误动。文献[59]借鉴和应涌流的分析方法,基于一个周波两台换流变压器磁链积分量之差对涌流的变化特点进行推测,分析对称性涌流的产生及其造成大差保护误动的原因。

此外,换流变压器在发生不对称故障时,其差流特征也较之常规变压器有所不同。文献[62]经仿真分析指出,整流侧发生换流变压器保护区内换流阀短路故障时,类似于换流变压器出口的两相或三相短路,流过电流较大,易引起换流变压器铁心和TA饱和,差流二次谐波含量较大,差动保护易被闭锁而不能出口。文献[63]则提出阀侧单相接地故障情况下,差电流出现间断,该相电流存在消失风险,差动保护不能动作。

可以看到,对换流变压器差动保护异常动作行为的研究已经开展了相关工作并取得了有益的成果,但大多是基于现场波形的粗略分析,尚缺乏基于精确模型的深层次机理研究和验证。而对策方面,目前研究也主要提出优化二次谐波制动判据的配合逻辑^[64,65],实际上这很难在对称性涌流时差动保护误动和故障电流含涌流时差动保护拒动之间找准平衡点。

为了解决上述换流变压器差动保护所面临的特殊问题,需要对换流变压器经历合闸和故障时的暂态特性进行较为透彻的分析,深入研究小差和大差保护误动或拒动的机理,并据此找到基于新原理的判据来保证换流变压器差动保护应对涌流和故障时的可靠性和速动性。

1.2 变压器差动保护技术的发展趋势

采用差动保护作为变压器内部故障的主保护,导致励磁涌流和故障电流的识别问题成为几十年来一直影响变压器差动保护性能的桎梏,有关这方面的文献资料可以说是浩如烟海,前面介绍的几种识别方法仅仅是其中比较有代表性的方法。对于变压器主保护技术的发展路线,一方面,需要努力寻找新途径,探索新思路,彻底抛开差动保护方案的束缚,研究与差动保护迥然不同的新原理作为变压器主保护方案,完全从识别励磁涌流和故障电流的羁绊中解脱出来。例如,基于变压器回路方程的方法^[66],其根据变压器原、副边绕组回路方程构成的内部故障识别方案,理论上不受励磁涌流或过励磁的影响,有待实际工程的进一步检验。另一方面,面对现状,迎难而上。选择差动保护作为变压器主保护方案,有历史原因,但差动保护方案绝非一无是处,其在变压器内、外部故障的区分方面确实发挥了重要作用。继电保护工作者在提高变压器差动保护在外部故障情况下的可靠性和内部故障情况下的灵敏性方面也倾注了大量心血,比率制动特性^[67,68]、标积制动特性^[5]、故障分量差动^[5]、采样值差动等方案在实际运行中都发挥了很好的作用。在目前,尚没有找到比差动保护性能更好的变压器主保护方案情况下,要面对现状,针对励磁涌流和故障电流识别的老问题,总结已有的较为成功的运行经验和方法,同时不断地探索和尝试新理论、新技术的应用,力求能够很好地解决励磁涌流和故障电流的识别问题,将变压器主保护性能提高到一个新水平。

随着自适应技术、智能技术的不断发展,变压器保护技术向智能化方向发展已成为必然。自适应保护的基本思想是使继电保护尽可能地适应电力系统的各种变化,使其具有自动识别系统的运行状态和故障状态的能力,并能根据状态的改变,实时自动地调整保护的性能,包括动作原理、整定值和动作特性,达到最佳使用效果。目前,在变压器保护中已有部分功能具备了一定的自适应能力,例如,浮动门槛、差动保护中比率制动特性的自适应调整^[69]等。

智能技术如人工神经网络、专家系统、模糊理论等为变压器保护技术的发展也开