

罗军川 张星海 编

电力变压器

反事故措施解析

DIANLI BIANYAQI
FANSHIGU CUOSHI
JIEXI



1072377



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

电力变压器

反事故措施解析

罗军川 张星海 编 傅锡年 审稿



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书以《国家电网公司十八项电网重大反事故措施》的第9部分为依据,对其刚性条文出台的历史背景、蕴涵的丰富理论逐一进行深度解读,并结合实际案例分析,有利于读者透彻理解和牢固掌握反事故措施的精髓,有利于反事故措施的贯彻实施和正确运用,有利于形成根深蒂固的反事故长效机制。

本书共分3章,既全面系统地阐释了变压器从设计制造、监造验收到运行维护等全过程的各项反事故措施要求,又深入论述了变压器的相关试验以及分接开关、套管和冷却系统等附件的反事故措施。对变压器监造验收项目的内容、标准要求进行了明确,并针对近年来运行中出现的共性问题补充了新的反事故措施。

本书突出实用性和知识性,覆盖变压器设计制造、监理、试验验收、安装调试、运行维护和故障分析等内容,可作为电力生产技术和管理人员拓展专业知识、提升业务水平的理想读本,也可作为电力企业深入学习和实践电网重大反事故措施的培训教材,还能满足电力专业的莘莘学子开阔视野的需求。

图书在版编目(CIP)数据

电力变压器反事故措施解析 / 罗军川, 张星海编. —北京: 中国电力出版社, 2010.8

ISBN 978-7-5123-0612-7

I. ①电… II. ①罗…②张… III. ①电力变压器—事故—处理 IV. ①TM41

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第123407号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2010年8月第一版 2010年8月北京第一次印刷

850毫米×1168毫米 32开本 7.625印张 186千字

印数 0001—3000册 定价 20.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



序

为适应电力工业日新月异的发展，国家电网公司确立了全面推进“两个转变”，建设“一强三优”现代公司的发展战略目标。近年来，电网投资不断增大，电网建设快速推进，导致相关设施设备产能不足，供不应求，个别先天不良的设备仍有可能流入系统，健康水平堪忧。同时，地震、冰冻雨雪、洪涝等自然灾害呈频发多发态势，电网运行环境日趋恶劣，加之自身防灾抗灾能力不足，在某种特定条件下有可能激发为严重的设备和电网事故，电网安全风险增大，形势不容乐观。要实现建设坚强智能电网，全面提高电网的安全运行水平和供电保障能力的目标，进一步加大隐患排查治理力度，提升设备本质安全，防止重特大设备损坏事故发生，反事故斗争的道路依然艰辛而漫长。在《国家电网公司十八项电网重大反事故措施》颁布实施近五年的今天，编写出版此书，对总结分析五年来电力变压器反事故工作成效，巩固反事故阶段性成果，切实推动建立反事故常态机制，确保电网安全稳定运行，意义重大而深远。

实践证明，设备事故不会自然消亡，这是安全生产不可逾越的客观现象，但通过加强管理和采取必要的技术措施，安全生产风险是可以控制而且能够控制的，一切责任事故也是可以避免的。维护安全生产持续稳定的良好局面，不可能一蹴而就，它必然源自于我们脚踏实地、日积月累的执著坚持。正所谓“不积跬步，无以至千里；不积细流，无以成江海”。

本书基于《国家电网公司十八项电网重大反事故措施》框架性条文，结合国家、行业最新标准、导则和规范（规定），逐条解

析了反措条文出台的背景，深入浅出、内容丰富；根据近年来电网运行中新出现的共性问题，有针对性地补充了电力变压器防雷过电压保护、抗震分析和过载运行方案等条文，丰富了反措内容；对变压器选型规范、抗短路能力措施、出厂验收的标准要求进行翔实论述，对有载分接开关、强油冷却系统等提出了建设性意见，对变压器直流偏磁、过励磁能力最新研究成果进行了实质性阐述，对设计、建设、运行以及采取相应反事故措施具有极其重要的参考价值。本书将实践性和知识性融为一体，既有数理统计，又有大量的案例分析，堪称为一本有关变压器设备的知识读本和培训读物。

四川省电力公司总工程师

张伟



前言

电网反事故斗争是一项坚持不懈的任务。编写本书的主要目的是为了深入贯彻落实“安全第一，预防为主，综合治理”的电力工作方针，提高全员防范事故意识，增强防范事故能力，完善各项反事故措施，有目标、有重点地防止电力生产重大恶性事故的发生，构建预防重大安全生产事故的常态机制，实现安全生产可控、能控和在控。

本书紧扣《国家电网公司十八项电网重大反事故措施》有关变压器的各项重点内容，结合国家或行业标准、规定（规范）和相关技术文件的要求，对框架性反措条文进行逐条、逐项解构与剖析，并辅以近年发生的典型案例说明。追溯条文出台的历史背景，揭示反措制定的实践依据，深挖其中蕴涵的相关知识，寓理论于实践，抽丝剥茧，旁征博引，激活生硬、僵化的条文，便于读者透彻理解和牢固掌握反事故措施的精髓。结合当前电力安全生产事故新的特点和突出问题，吸取了有关网省公司反措实施细则中的有益内容，增加了有针对性的预防建议；对不够明确、比较笼统的条文进行了细化和延伸；对个别条文适应性不强，以及由于技术进步运用而生的新举措进行了分析、评价，深入浅出，客观翔实，极大地丰富和完善了反措内容。突出实用性和知识性，涵盖变压器设计制造、监理、试验验收、安装调试、运行维护和故障分析全方位全过程，既是深入学习与实践电网重大反事故措施的理想读本，也是广大电力生产技术管理人员拓展专业知识、提升业务水平的良师益友。

本书在编写过程中参考了同行专家的诸多宝贵资料，全书由

全国变压器专家、原国家电网公司电力科学研究院总工程师傅锡年同志审稿，并提出了许多宝贵的修改意见，在此表示深切感谢。本书的编写还得到了四川省电力公司和广元电业局各级领导的大力支持与帮助，在此表示衷心感谢。由于时间仓促、水平与条件的限制，书中不足及疏漏之处在所难免，敬请广大读者不吝赐教，以便再版时修订。谨致谢意！

编 者
2010 年 2 月



目 录

序

前言

第一章 加强变压器质量管理措施	1
第一节 变压器选型	2
第二节 抗短路能力	55
第三节 工厂监造和验收	79
第四节 试验	83
第五节 有关说明	120
第二章 预防变压器事故措施	122
第一节 出厂试验和运输要求	122
第二节 防止变压器绝缘事故	131
第三节 防止分接开关事故	143
第四节 采取措施保证冷却系统可靠运行	153
第五节 加强变压器保护管理	164
第六节 防止变压器出口短路	173
第七节 防止套管事故	175
第八节 预防变压器火灾事故	186
第三章 补充措施	192
第一节 提高变压器的抗震性能	192
第二节 防止变压器雷击事故	197
第三节 防止变压器超温故障运行	211
附录 A 电网重大反事故措施的背景	226
附录 B 本书主要引用标准及规定	231

加强变压器质量管理措施

为防止油浸式电力变压器损坏事故，应严格执行国家电网公司《预防 110（66）kV～500kV 油浸式变压器（电抗器）事故措施》（国家电网生〔2004〕641 号）、《110（66）kV～500kV 油浸式变压器（电抗器）技术监督规定》（国家电网生技〔2005〕174 号）等有关规定，并提出以下重点要求：

►〔原文〕

9.1 加强变压器的全过程管理

9.1.1 加强变压器选型、订货、验收及投运的全过程管理。应选择具有良好运行业绩和成熟制造经验生产厂家的产品。在设备订购前，应向生产厂家索取做过相似变压器突发短路试验的试验报告和抗短路能力动态计算报告；在设计联络会前，应取得所订购变压器的抗短路能力动态计算报告，并进行核算工作。

9.1.2 严格按有关规定对新购变压器进行验收，确保变压器按订货合同要求进行制造、安装、试验。

9.1.3 220kV 及以上电压等级的变压器应赴厂监造和验收，按变压器赴厂监造关键控制点的要求进行监造，有关监造关键控制点应在合同中予以明确。监造验收工作结束后，监造人员应提交监造报告，并作为设备原始资料存档。

►〔解析〕 变压器的全过程管理并不仅限于此。设备管理的

全过程应当包括从该设备的设计选型直至退役报废整个生命周期，这里主要是强调变压器在加入电网运行前期管理的重要性，坚决从源头上杜绝先天不良的设备流入系统。尤其是基建工程项目，生产技术管理职能部门变压器专责应将关口前移，靠前监督，并参与到变压器类设备选型、招标、监造、验收等全过程管理工作中，落实各项反事故措施，严把设备的准入门关，从而提高变压器设备运行管理水平。

9.1.1 条文中主要强调变压器的设计、选型环节以及对生产厂家的要求，重点突出变压器的抗短路能力问题。本条文主要针对变压器的验收，包括制造过程中关键环节的监造验收和出厂验收。强调指出验收时除了按照国家有关规定验收外，还必须遵循订货合同（含技术协议）的有关约定。

第一节 变 压 器 选 型

变压器选型应按照生产运行的需要和有关标准规定，遵照技术经济合理的原则提出技术要求，包括变压器型式、容量、阻抗、电压组合、调压方式和范围、损耗、绝缘水平、温升、噪声、外部尺寸、试验、抗短路能力、过励磁能力、直流偏磁能力、冷却方式、绝缘油、套管、调压开关以及各种附件的要求。

一、设备厂家的基本要求

变压器是电网的重要设备，俗称“电网的心脏”。变压器的安全可靠直接关系到电网的安全稳定运行，因此，变压器设备的选型应优先采用设计及制造经验成熟、结构简单可靠和经过运行考验的变压器。应选用通过国家权威部门认定、型式试验和鉴定合格在有效期内（一般认为有效期为五年）以及有运行经验的设备，并且还要对制造厂的制造能力、设备质量、设备在电力系统的运行业绩（通常取三台/组三年成功的商业运行业绩。在认定制造业

绩时，既了解制造厂的正面业绩，还应掌握“反面业绩”（运行劣迹），即近期运行中出现过的击穿、放电、绕组变形和强迫停运等严重故障情况及其相应的整改措施。如果对发生过的问题已有解决措施并经过实际的验证，可视为对业绩无实质性影响。反之，特别是反复出现影响变压器安全运行的故障，则应视为业绩存在重大问题）等诸方面进行考察。原则上应选择管理要求严、设计能力强、工艺水平高、技术装备先进、变压器原材料和零部件质地优良、具有完备的产品质量保证体系、有一定规模 and 良好运行业绩的制造厂，以保证质量好的产品进入系统。如有其他特殊要求，应与制造厂协商后在合同文件中规定。验收时，应严格按照国家标准、行业标准和合同中规定的技术条件对采购的设备进行验收。

变压器采用的组、部件和材料质量，与变压器的性能关系密切。应对套管、分接开关、冷却器（散热器）、硅钢片、导线和绝缘材料等重要组、部件和材料的性能提出要求。变压器制造厂应对所采用的全部组、部件和材料的质量负责。

二、变压器型式

变压器型式及用途是多种多样的，但本质都是一样的，都是以电磁感应原理为基础的。

电网中常用的变压器按用途可分为升压变压器、降压变压器、配电变压器、联络变压器、试验变压器和整流变压器等；按功能可分为主变压器和站（厂）用变压器；按绕组型式可分为双绕组变压器、三绕组变压器和自耦变压器；按相数可分为单相变压器、三相变压器和多相变压器（如整流用六相变压器）；按调压方式可分为无调压变压器、有载调压变压器和无励磁调压变压器；按冷却条件可分为油浸式变压器（包括油浸自冷变压器、油浸风冷变压器、强迫油循环自冷变压器、强迫油循环风冷变压器、强迫油循环水冷变压器、强迫导向油循环风冷变压器和强迫导向油循环

水冷变压器等)、干式变压器和充气式变压器;按中性点绝缘水平可分为全绝缘变压器(中性点绝缘水平与首端绝缘水平相同)、半绝缘变压器(中性点绝缘水平比首端绝缘水平低)。其对应的产品型号见 JB/T 3837—2010《变压器类产品型号编制方法》。

1. 三相和单相型式

220(330) kV 及以下电压等级变压器一般采用三相共体式,500kV 电压等级变压器受到运输条件的限制宜采用单相式。当选用单相变压器组时,应根据所连接的电力系统和设备情况,考虑是否装设备用相。三相共体变压器比单相变压器在节省材料和降低损耗方面有一定优势,但制造难度增加,因此选用三相共体的 500kV 变压器时,要特别注意制造厂的制造水平和经验。

对于特别困难的运输条件,有的制造厂推出一种可拆开运输现场组装式的变压器,即在制造厂完成整体试验后,将线圈和铁芯拆开分别运输(有的还将三相铁芯拆开运输)。变压器各部件运至现场重新组装,经过干燥处理和感应耐压及局部放电测量合格,变压器投入运行。确保这种拆开运输变压器安全可靠的关键,在于现场的重新安装和干燥的高质量。如果在现场有良好的工作环境和相关设备,且由原制造厂来完成,变压器的质量会有一定保证。但毕竟现场条件比原制造厂要差很多,该类变压器的风险比不拆开运输的风险大,应慎重对待。对于运输条件不受限制的变电站,一般不选择这种结构型式的变压器。

2. 芯式和壳式结构

按变压器铁芯的结构,变压器可分为芯式变压器和壳式变压器。如绕组包在铁芯外围则为芯式变压器,如铁芯包在绕组外围则为壳式变压器。二者在结构上稍有不同,在原理上没有本质区别。芯式变压器铁芯用量少,构造简单,绕组的安装和绝缘比较容易,运行和制造经验成熟,因此电力变压器一般应选用芯式变压器。

我国 500 (330) kV 变压器也有采用壳式变压器的。近期系统中, 500kV 壳式变压器的故障比芯式变压器多, 而且多是绕组绝缘损坏的严重故障。其中, 运行十年左右时间, 发生油流放电故障的问题也比较突出, 涉及国际上主要的两个壳式变压器制造厂。壳式结构特征容易引发绝缘爬电现象及油流带电, 以及三次谐波电压可能较高, 以致中性点出现相应的漂移, 因此高电压等级一般不宜选用壳式变压器。国外有些电力公司已明确 500kV 等级以上不使用壳式变压器。但由于壳式变压器在结构上的特殊性, 具有优异的抗短路能力, 因此在频繁发生短路的场所也有选用。但目前阶段如选用壳式变压器, 宜采用非强迫油循环冷却方式, 以避免过高的油流速度带来油流放电的可能性。

3. 独立绕组普通型式和自耦型式

根据定义, 自耦变压器是指至少有两个绕组具有公共部分的变压器 (见 GB 1094.1—1996《电力变压器 第 1 部分 总则》中 3.1.2)。自耦变压器一般用于联络两种不同电压网络系统或用于连接两个中性点直接接地系统。自耦变压器与普通独立绕组变压器的区别在于, 自耦变压器的一、二次侧绕组不仅有磁的联系, 还有电的联系, 而普通变压器一、二次侧绕组仅有磁的联系。

利用自耦变压器的高、中压绕组的自耦联系, 变压器本身绕组容量可以小于它的通过容量。换句话说, 用自耦变压器来传输功率时, 它本身某部分绕组的容量可以比其通过容量小。因为变压器的尺寸、质量及铁芯截面是由通过其磁路传输的功率决定的, 因此, 对于自耦变压器来说, 其尺寸和重量则是由公共绕组的容量也即是由其额定标准容量决定的, 而且这种效益随自耦变压器的高、中压的变比不同而异, 当电压比越接近于 1 时, 节损也越明显。变比增加, 其经济效益就变差。如对于 220/110kV 的自耦变压器, 其标准容量只有通过容量的 50%。因此, 自耦变压器较普通的独立绕组变压器有如下优点:

(1) 消耗材料少, 从而降低了成本。因为变压器所用硅钢片和铜线的量是和绕组的额定感应电势和额定电流有关, 也即和绕组的容量有关, 自耦变压器绕组容量降低, 所耗材料也减少。如果 S 表示自耦绕组标注在铭牌上的额定容量, 则从实际尺寸和重量来说, 相当于额定容量为 $\alpha \times S$ 的普通独立绕组变压器 [$\alpha = (U_1 - U_2)/U_1$, 为自耦连接的降低因素]。通常 $\alpha \times S$ 又可表示为固有额定容量或等值双绕组额定容量。

例如: 一台 220/110kV, 90MVA 的自耦变压器与一台额定容量 $(220 - 110)/220 \times 90 = 45$ (MVA) 的独立绕组变压器相当。

如果还带有一个额定容量为 30MVA 的非自耦连接的第三绕组 (YNautod 90/90/30MVA), 那么, 它的等值双绕组额定容量为

$$\frac{45 + 45 + 30}{2} = 60 \text{ (MVA)}$$

(2) 损耗少、效率高。由于铜线和硅钢片用量减少, 在同样的电流密度及磁通密度时, 自耦变压器的铜耗和铁耗都比普通独立绕组变压器减少, 因此效率高。

(3) 便于运输和安装。因为它比同容量的多绕组变压器质量轻, 尺寸小, 占地面积也小, 有利于变压器的运输和安装。

(4) 提高了变压器的极限制造容量。变压器的极限制造容量一般受运输条件限制, 在相同的运输条件下, 自耦变压器的容量可以比普通多绕组变压器制造得大一些。

不过, 采用自耦变也会带来不利的影响, 其缺点如下:

(1) 使系统短路电流增加。由于自耦变压器的高、中压绕组之间有自耦联系, 其短路阻抗比普通变压器的小。因此, 在电力系统中采用自耦变压器后, 将使三相短路电流显著增加。为了提高自耦变压器承受突发短路的能力, 设计时对自耦变压器的机械结构应适当加强, 必要时可以适当增大短路阻抗以限制短路电流。又由于自耦变压器的中性点必须直接接地, 同时高、中压绕组又

有自耦联系，故又将使系统的单相短路电流也大大增加，有时甚至超过三相短路电流，影响电气设备的选择，且在单相短路时加大了对通信线路的干扰。

(2) 传递过电压倍数高，使绕组的过电压保护复杂。由于高、中压绕组的自耦联系，当高压方过电压时，会引起低压方产生严重的过电压，可能超出该侧的绝缘水平。为了避免这种危险，常常采用在自耦变压器的高、中压两侧出线端都装一组避雷器。

(3) 使继电保护复杂。这是因为自耦变压器的高、中压绕组有共同的中性点以及它的绕组的负荷运行方式比较特殊。比如，自耦变压器的零序过流保护必须考虑到在中压或高压侧系统内接地故障时，流经自耦变压器的零序电流的影响，而其过负荷保护应根据其各种过负荷的可能性进行具体设计，而自耦变压器的负荷分配方面的运行方式与普通变压器有显著的不同。

采用自耦变压器比采用普通变压器能节省材料、降低成本、缩小变压器体积和减轻质量，有利于大型变压器的运输和安装。因此应根据电网的统一规划，当所需电压变比不大（一般在 3 以下）时，大型变压器和在运输、安装条件有限制时也有选用。

4. 变压器的全星形接线和稳定绕组

变压器每侧三相的连接方式，最常用的就是 Y 和 Δ 。到底选用哪种连接方式，要根据系统的需要、运行的性能要求、制造和运行的经济性以及某些特殊要求等各方面因素决定。而容量的不同，会使某些矛盾突出，也影响到对接线方式的选择。

变压器绕组接成 Y/Y 存在三次谐波问题，而如果接成 Δ/Y 或 Y/Δ 就可以消除三次谐波产生的某些恶劣后果，这是因为变压器的铁芯是联系一、二次侧的“纽带”，它的工作情况对一、二次侧各量的影响是很大的。当铁芯不饱和时，变压器的一次电流和由它而产生的铁芯磁通成正比关系，即电流随时间按正弦波的规律变化，磁通也随时间按正弦规律变化。但当变压器在额定电压作

用下铁芯已处在饱和状态时，磁通和产生它的电流不再是正比的关系。一次电流是正弦波，磁通则是平顶波。我们知道，非正弦波总可以分解成许多不同频率的正弦波（含基波和高次谐波）。这些高次谐波中，影响最大的是三次谐波。三次谐波的特点是三相相量相同、幅值相等。因此，铁芯饱和之后，磁通是平顶波（非正弦波）时，则在铁芯中会有三次谐波磁通。至于这个磁通怎样形成回路，这和磁路有关。对于三相三柱式铁芯的变压器，三个柱里的磁通都朝一个方向，碰在一起会“顶牛”，所以只能互相排挤，从铁轭散去，都以铁壳（油箱）为通路，借铁芯外的铁件、空气、油等构成回路。而铁壳中通过有 150Hz 的三次谐波磁通，就会因产生涡流损耗而发热，而且降低变压器效率。对大容量变压器，这个问题比较严重。

对于三相五柱芯式变压器、三相壳式变压器和连接成三相绕组的单相变压器，由于磁路磁阻较小，三次谐波磁通可以在三相铁芯中形成闭合回路，总磁通波形的平顶程度更加厉害，三次谐波电压可能较高，以致中性点出现相应的漂移。因此三次谐波问题比三相三柱芯式变压器更为突出。

如果有一侧接成 Δ ，就可避免这个缺点。先说一次侧接成 Δ （即 Δ/Y ）的情况：假如开始时电流是正弦波，因铁芯饱和的缘故，磁通为平顶波，于是，磁通中出现三次谐波，这三次谐波磁通能在一次侧 Δ 中感应起三次谐波的反电动势，在这三次谐波反电动势作用下， Δ 中流过三次谐波电流，此三次谐波电流又在铁芯中产生一个与原来的三次谐波磁通相反的三次谐波磁通，它抵消了原来的三次谐波磁通，保证了铁芯中磁通为正弦波。而由于原来电流叠加上一个三次谐波电流（实际上还有与 3 成倍数的其他高次谐波），其波形变成了尖顶波。由于铁芯磁通里消除了三次谐波，这种接线的变压器也就不存在上述缺陷。

再看二次侧接线成 Δ （即 Y/Δ ）的情况：这时，由于一次侧 Y

接线三次谐波电流流不通，在铁芯饱和的情况下，磁通是平顶波。磁通为平顶波必分解出三次谐波磁通，此三次谐波磁通在二次侧△里感应的三次谐波电势，能产生三次谐波电流，这个三次谐波电流又在铁芯里产生三次谐波磁通抵消原来的（由一次侧产生的）三次谐波磁通。这样，铁芯中的主磁通仍基本上保持为正弦波。

从以上分析可知，大容量的电力变压器不宜采用无三角形绕组的全星形接线。当电网运行需要全星形接线变压器时，应设立单独的△接线的稳定绕组。稳定绕组的额定电压一般应稍低于相邻绕组的额定电压，额定容量一般不超过一次额定容量的 50%，其绝缘水平还应考虑其他绕组的传递过电压。稳定绕组的一点（一相）引出接地，另两相也宜全部引出（悬空），以便于进行直流电阻等测试。为考核稳定绕组绝缘承受其他绕组传递过电压的能力，在进行其他绕组的冲击耐压时，稳定绕组必须按照实际运行情况，一点接地，另两点悬空（不允许接任何电阻或电容等）。

5. 无励磁和有载调压

无励磁调压变压器的制造成本和运行成本较低，一般用于电压波动范围较小，且电压变化较少的场所。有载调压变压器的可靠性差，制造成本和运行成本高，但调压灵活，一般用于电压波动范围较大，且电压变化频繁的变电所。

为保证运行单位的电压质量，35~220kV 变压器应采用有载调压。从简单可靠和节省投资角度考虑，在满足电网电压变动范围的情况下，500（330）kV 变压器优先选用无励磁调压，当选用有载调压变压器时，应进行充分的经济技术论证。

从运行可靠性的角度上来说，在满足使用要求的前提下，能用无调压的尽量不用无励磁调压；能用无励磁调压的尽量不采用有载调压；无励磁分接开关应尽量减少分接数目，可根据电压变动范围只设最大、最小和额定分接。自耦变压器采用公共绕组中