

广州换流站换流变压器运行异常情况及措施探讨

汲 广, 朱韬析

(南方电网超高压输电公司广州局, 广东 广州 510405)

摘要: 换流变压器是直流输电系统中最重要的设备之一, 简介了天广直流输电系统广州换流站换流变压器运行中发生的异常、原因及处理, 介绍了广州换流站针对这一异常所采取的措施, 探讨了一些换流变异常情况下提高直流输电系统运行可靠性的建议。这些运行经验及改进措施的探讨, 不仅有助于提高直流输电系统的运行维护能力, 还为未来我国直流输电工程的设计、建设提供有益的参考。

关键词: 换流变压器; 异常; 直流输电; 运行经验

Abnormity of converter transformers in Guangzhou inverter station and its treatments

Ji Guang, ZHU Tao-xi

(GZ Bureau, CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510405, China)

Abstract: Converter transformer is one of the most important equipments in HVDC transmission system. In this paper, the abnormity of the converter transformers used in Guangzhou inverter station of Tian-Guang HVDC transmission system and its reason and the treatments are introduced first, then the operation experiences and suggestions to improve the reliability of HVDC system are discussed. All of the conclusions are not only benefit to improve the operation and maintenance ability of HVDC system, but also valuable to the design and construction of HVDC system in the future.

Key words: converter transformer; HVDC system; abnormity; operational experience

中图分类号: TM41 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2010)01-0115-05

0 引言

直流输电具有传送功率大、线路造价低、控制性能好等优点, 是目前发达国家作为高电压、大容量、长距离送电和异步联网的重要手段^[1], 近年来在我国也得到了越来越广泛的应用。以南方电网为例, 目前已有天广、高肇和兴安直流输电系统投入运行, ± 800 kV 云广直流输电系统正在建设中, 而“十二五”期间, 还将新建溪洛渡右岸 ± 500 kV/2 \times 3 200 MW、糯扎渡 ± 800 kV/5 000 MW 直流工程。

广州换流站位于广州市北郊, 正常情况下作为天广直流输电系统逆变站运行。 ± 500 kV 天生桥—广州直流输电系统是中国南方电网第一条长距离、大容量的高压直流输电线路, 自 2001 年 6 月双极投运以来, 累计转运电量超过 400 亿千瓦时, 不仅在实施西电东送、促进东西部地区资源优化配置和社会经济发展方面发挥了重要作用, 而且为推进我国直流输电技术的发展积累了宝贵的经验。

天广直流输电系统投运以来, 已发现多台换流

变压器总烃和乙炔严重超标的重大缺陷^[2-5]。本文简介了广州换流站换流变压器发生异常的原因和处理措施, 并探讨了换流变压器异常条件下提高直流输电系统运行可靠性的措施, 这不但有助于提高直流输电系统的运行维护水平, 还可以为未来我国直流输电工程的设计和改造、以及直流输电技术的发展积累宝贵的经验。

1 广州换流站换流变压器及其异常简介

换流变压器制造技术复杂、价格昂贵、运输困难、事故影响大, 是直流输电工程中的核心元件^[1,6-7]。换流变压器与普通电力变压器结构基本相同, 但由于直流输电的特点, 二者运行条件有差别, 所以换流变压器的设计、制造和运行需要注意短路电抗、直流偏磁、噪音、绝缘和试验等特点^[1,6]。

广州换流站换流变压器由德国 SIEMENSE 公司生产, 共 7 台, 每极各 3 台, 1 台备用; 采用 $Y_0/Y_0/\Delta-7$ 的接线方式, 额定容量 337/168.5/168.5 MVA, 额定电压 $230/\sqrt{3}/198.5/\sqrt{3}/198.5$ kV,

额定电流 $2538/1470//1470/\sqrt{3}$ A。基本结构如图 1 所示，为两心柱两旁轭四柱结构，两个心柱构成两个分支，分别为分支 I 和分支 II。网侧绕组的基本绕组两个分支分别套装在两个心柱上，电气上并联，由套管 1.1 和套管 1.2 引出，每个分支为 1/2 容量；网侧绕组的 2 个调压绕组也分成两个分支分别套装在两个心柱上，电气上分别连接两台分接开关，并与各自的网侧基本绕组连通；阀侧 Y 型绕组与网侧的基本绕组 1 和调压绕组 1 组成一体套在分支 I 铁心柱上，阀侧 Δ 型绕组与网侧的基本绕组 2 和调压绕组 2 套成一体套在分支 II 铁心柱上^[2]。

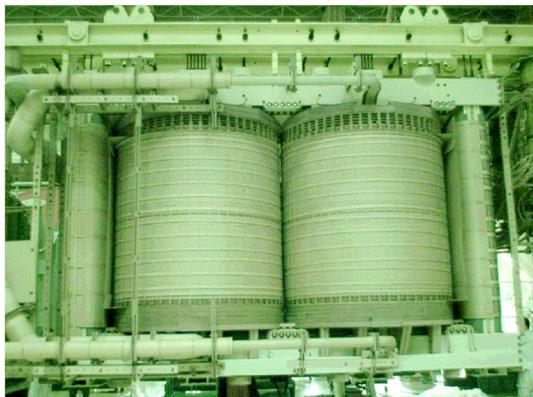


图 1 广州换流站换流变压器基本结构图

Fig.1 Structure of the converter transformer used in Guangzhou converter station

广州换流站换流变压器独特的阀侧 Y 型和阀侧 Δ 型绕组共存的接线方式，具有绝缘结构特殊、引线和出线众多、电场分布复杂、制造难度较大、工艺水平要求高等特点。

2006 年 11 月，在对广州换流站换流变压器进行定期油色谱分析时，发现极 1 A 相（出厂编号 # 408327）换流变压器总烃和乙炔严重超标，具体数据如表 1 所示。

表 1 #408327 换流变油色谱数据表

Tab.1 Oil chromatographic data of #408327 converter transformer (10^{-6})

取样日期	H ₂	CO	CH ₄	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	C ₁ +C ₂
08 月 01 日	11.9	495	6.19	3 008	5.73	2.19	0.76	14.87
11 月 21 日	1 400	129	2016	820	3973	1276	14	7 279
11 月 22 日	2 866	260	2518	2 227	6 831	3 680	36	13 066

停电后测试发现网侧绕组直流电阻与出厂值相比（换算到同一温度下）增长达 10% 以上。将两个

切换开关芯子吊出后，单独测量每个网侧绕组的直流电阻，结果为：柱 I 为 128.20 m Ω ，柱 II 为 94.02 m Ω ，初步判断柱 I 网侧绕组存在故障的可能性较大。

随后，用备用换流变压器代替 # 408327 换流变投入运行，并立即将 # 408327 换流变运至厂家修理；2007 年 8 月，# 408327 换流变修理完毕、验收合格后运至现场并投入运行。

2007 年 4 月和 2008 年 5 月，又分别发现极 1 C 相换流变压器（出厂编号 # 408329）和极 2 B 相换流变压器（出厂编号 # 408324）的油色谱数据出现类似异常，总烃、乙炔增长幅度加大。均陆续用备用换流变更换后送至厂家修理。目前，# 408329 换流变已于 2008 年 9 月修理完毕并投入运行，# 408324 换流变正在厂家修理过程中。

2 广州换流站换流变压器异常原因及处理

2.1 广州换流站换流变压器异常原因

天广直流输电系统投运以来，已多次出现换流变压器绕组故障造成油色谱异常的缺陷，经检修处理后，分析认为造成这一问题的主要原因包括^[2-5]：

(1) 天广直流换流变压器网侧绕组的设计上存在缺陷，其采用了二根对一根点焊的焊接方式，造成内部环流；而多次检修结果表明，故障区域均为二对一焊接点。

(2) 厂家焊接时存在工艺缺陷，造成绕组里层个别焊头没有焊好；同时，焊接过程中过多的热量使铜变脆；而且，绕组的焊接连接没有放在两个衬板的正中，增加了焊接的机械力，运行中的振动又导致一些变脆的导线束断裂。

(3) 大负荷运行时绕组端部漏磁引起环流，导致局部过热甚至造成受影响区域熔化。如果不及时采取相应措施，将会发生烧毁甚至是爆炸事故。

2.2 绕组检查情况

408327 换流变运至厂家后，经拆装、器身入炉脱油、拆夹件、挑上铁轭后，依次拔出柱 I、柱 II 的调压线圈。拆下柱 I 网侧绕组外的绝缘纸筒、撑条后发现引线下第二饼（从上往下数）分叉处（上、下两股）已发黑炭化，下股有明显烧坏断股现象，如图 2 所示，其它位置未发现异常。

随后拔出柱 I、柱 II 网侧线圈。对故障点进行清理，故障点位于焊接位置处，属于典型的多根断股现象。从网侧绕组上下两个二对一焊接点分别截取一段进行解剖，上部二对一焊头出现严重的烧毁现象，如图 3 所示。发热的迹象从焊头向两端延伸，所包的 NOMEX 绝缘纸有烧毁痕迹。绕组下部的焊头没有发现明显的过热痕迹。



图2 #408327换流变故障部位图

Fig.2 Fault position of #408327 converter transformer



图3 故障网侧绕组解剖图

Fig.3 Dissection of the fault winding

2.3 广州站换流变网侧绕组解剖检查及更换

广州换流站送至厂家返修的换流变压器采用了如下检修方案:

网侧线圈整体更换,重新绕制两个全新线圈,采用单一线规绕制,焊接处进行一对一焊接,新旧网侧线圈结构如图4所示。采用该方案后环流损耗可消除,但横向涡流损耗会增加,总体负载损耗基本不变。其中,网侧线圈的平均温升为62 K,最热点温升为75.8 K;阀Y线圈的平均温升为55 K,最热点温升为76.3 K,均在国标允许范围内。

依次拔出两个网侧线圈、套装新网侧线圈和调压线圈、绝缘装配、插上铁轭、引线装配、器身预装、半成品试验等。真空干燥、抽真空、注油、热油循环等诸多工序均严格按照500 kV的技术指标控制。此外,原储油柜为敞开式结构,这导致含气量严重超标,对变压器的安全运行造成一定的不良影响,故借返厂大修的机会,把储油柜改为胶囊式。

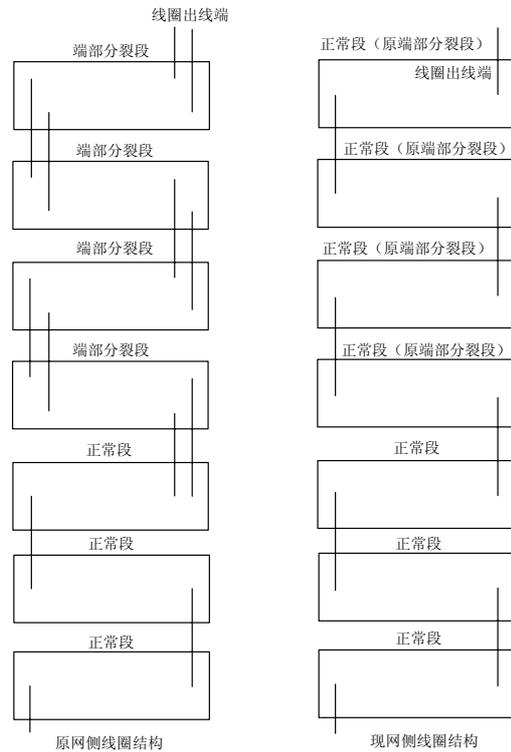


图4 原网侧和现网侧线圈结构

Fig.4 The winding structure

3 换流变压器异常条件下提高直流输电系统运行可靠性的措施探讨

3.1 运行单位采取的主要措施

运行经验证明,天广直流输电系统换流变压器多次出现异常的主要原因为网侧绕组的设计存在缺陷。为了尽早发现运行中换流变的异常,运行单位主要采取了定期取油样分析、安装在线油色谱检测仪、加强巡检及利用红外测温等措施,而对发生故障的换流变,则轮流送至厂家更换故障绕组。

由于故障的换流变必须送至厂家更换绕组,路途遥远,耗时较长,导致广州换流站较长时间无备用变运行,甚至发生此期间又发现运行中的换流变总烃异常的情况。

在这一特殊情况下,为了既维持天广直流输电系统的运行,又确保发生异常的换流变运行情况不会进一步恶化,运行单位采取了针对性的运行预案,以便加强对异常换流变的运行监督,及时掌握其运行参数,判断其运行情况:

(1)通过试验确定异常换流变可以维持运行的最高负荷

运行方式灵活多变是直流输电的主要优点之一,双极运行时可以将一极设定为定功率运行方式、另一极设为定电流方式,从而实现在尽量不影响送

电的前提下控制某一极的最高负荷。

将异常换流变所在极的功率传输方式设定为定电流方式,并根据试验负荷水平曲线调整相应极直流负荷。在某一负荷运行时间达到 48 h 后,对该换流变的油样进行分析,油色谱分析结果无异常时,经专家同意后调高该极输送功率;若运行或试验数据发生异常,则及时中止试验,将负荷降低至本次试验调整前的负荷水平或更低负荷,必要时,申请停运该极。

(2) 加强巡检和监视

加强日常巡检工作,详细记录油温、绕组温度、油位等,测量铁芯及夹件的电流,并与正常换流变相应参数及历史数据对比;同时加强红外测温,检查是否存在异常发热点。

(3) 充分利用油色谱分析

人工取油样分析和在线油色谱监测仪取样分析相结合,根据《GB/T7252-2001 变压器油中溶解气体分析和判断导则》,若发现试验数据存在异常,及时汇报。

以 2008 年为例,广州换流站 #408329 换流变压器正在厂家检修时,5 月又发现运行中的 #408324 换流变总烃出现上涨趋势,于是在 #408329 换流变压器检修完毕、运至现场并满足投运条件期间,均采用上述运行方式,不仅确保 #408324 换流变异常情况不再进一步恶化,避免了换流变故障的恶性事故,同时维持了天广直流输电系统的运行,缓解了夏季负荷高峰期广东地区的缺电问题,圆满完成了迎峰度夏和西电东送任务。

3.2 其它建议

截止 2009 年 1 月,广州换流站 7 台换流变中已有 3 台发生异常,其中 #408327 和 #408329 换流变已经更换绕组并投入运行,#408324 换流变正在厂家检修。在接下来的运行中,不排除再次出现换流变故障的问题,甚至可能再次出现无备用变运行期间又发现运行换流变总烃异常的极端情况。对此,一方面应借鉴之前的成功经验,采取如上文所述的预案;另一方面,应不断完善相应的运行方式,考虑其它改进措施,以确保换流变的安全,并提高直流输电系统运行的可靠性。

3.2.1 改进天广直流输电系统双极方式下的接地极线路不平衡保护

直流输电系统接地极往往距换流站数十公里以上,采用双回架空线路,在单极大地回线方式或双极不平衡运行方式下,经接地极线路流入接地极的电流较大。此时,如果某一回线路出现故障,双回线路电流自然将出现一定的差流^[1,6]。根据这一原理

及线路自身的相关参数,在天广、高肇和兴安等由德国 Siemens 公司设计的直流保护系统中,设置了接地极线路电流不平衡保护。

然而,天广直流保护系统中,双极方式下接地极线路不平衡保护动作后果仅为告警。由于直流回路自身的特性,一旦接地极线路上落雷或发生其他瞬时故障,直流电弧往往难以自行熄灭,这可能对人身、设备造成危害。而高肇和兴安直流双极方式下接地极线路不平衡保护动作后果为自动启动双极平衡功能,这样可以降低接地极线路总电流,从而达到消除暂时性故障的目的。

考虑到天广直流输电系统换流变设计上的固有缺陷,极有可能再次出现无备用变运行期间又发现运行换流变总烃异常的极端情况,不得不在双极运行方式下单极限负荷运行——仅 2008 年 06 月~08 月迎峰度夏期间,天广直流输电系统长达近 70% 的时间为双极不平衡运行方式,双极不平衡电流最高达到 800 A。因此,如果将天广直流双极方式下接地极线路不平衡保护动作后果做类似高肇、兴安直流系统的改进,可以有效防止这种运行方式下接地极线路故障对设备、人身造成危害。

3.2.2 建立直流输电电压等级序列,统一 500 kV 换流变压器规格

根据南方电网直流输电系统运行经验,换流变压器属于故障率较高的一次设备,而且检修周期长、难度大、运输困难,检修期间将造成该换流站长期无备用换流变运行,这给直流输电系统的稳定运行带来了隐患。

而随着我国直流输电工程的发展,直流输电电压等级序列的建立势在必行。文献[8]提出,综合分析论述多方影响因素,推荐未来我国直流输电工程应按 ± 500 kV/3 000 A、 ± 660 kV/3 000 A、 ± 800 kV/4 500 A 和 $\pm 1 000$ kV/4 500 A 4 个直流电压等级序列进行选择。直流输电电压等级序列的确立和直流输电设备技术规范的编制,不仅对工程的设计、制造具有指导意义,同时也有助于实现设备的通用化。

此外,文献[9,10]探讨了以兴安直流输电系统宝安换流站 Y/Y 型换流变替代高肇直流输电系统肇庆换流站换流变并列运行的可行性,根据接线组别、变比、短路阻抗、容量、安装运输尺寸、套管、CT、分接开关等部件技术参数,并结合 EMTDC、RTDS 仿真工具,研究表明,宝安换流站 Y/Y 型换流变可以替代肇庆换流站换流变并列运行。

由于我国的电力消费主要集中在中部、东部和南部地区,高压直流输电系统的落点往往比较集中,因此,设计这些直流输电系统的换流变压器时,推

行系统设计、设备选型、工程建设、运行维护的标准化, 甚至可以考虑进行换流变相互替代运行的专门研究, 不仅可以降低生产建设投资, 还可以提高换流变异常时直流输电系统的运行可靠性。

3.2.3 在直流输电系统落点较集中的地区建立专门的修理厂

换流变压器的检修对检修现场的温度、湿度、清洁度、密封性均有非常高的要求, 这给换流变现场修复带来了极大的困难。而将换流变运至具备修复能力的厂家, 路途往往非常遥远, 不仅需要花费较长时间, 而且还要受到路政、交通、水文、市政、潮汐、台风等许多不可控因素的制约。

考虑到目前换流变压器故障率较高的现状, 结合我国直流输电系统的落点比较集中的特点, 建议考虑在直流输电系统落点较集中的地区建立具备换流变压器修复能力的修理厂, 不仅有助于提高故障换流变修复的效率和直流输电系统的运行可靠性, 还有助于尽快掌握直流设备制造的核心技术。

3.2.4 设置换流变压器匝间保护

目前, 监测变压器内部电气故障的主保护主要是差动保护, 其以简单稳定可靠而获得广泛应用。匝间短路时虽然短路环流中电流很大, 但流入差动保护的电流可能不大。当变压器绕组匝间短路时, 变压器仍带有负荷, 被保护的设备仍有流出电流, 从而影响差动保护的灵敏动作。

结合天广直流输电系统换流变压器的绕组设计缺陷和运行现状, 虽然采取了定期人工取油样、在线油色谱监测和加强巡检等措施, 但仍难以检测到换流变运行状况的突然恶化, 因此, 为了能迅速的发现天广换流变压器运行时出现的异常, 避免换流变运行状况的急剧恶化造成更严重的影响, 建议考虑设置换流变压器匝间保护, 以便及时发现换流变压器匝间的轻微故障并迅速采取相应的控制措施。

4 结束语

换流变压器是换流站主回路的关键设备之一, 成本约占换流站总体费用的 16%^[1], 其可靠性对整个直流输电系统的运行起着至关重要的作用。天广直流输电系统投运以来, 逆变侧广州换流站换流变压器因此绕组设计缺陷及工艺等原因, 已造成多台换流变油色谱异常, 本文首先简介广州站换流变压器异常情况、原因及处理, 然后介绍了在无备用变运行期间又发现运行换流变总烃异常的极端情况下采取的控制措施, 这有助于提高我国直流输电系统的运行维护能力; 接着结合目前直流输电系统换流变故障率较高及落点较集中等特点, 探讨了建立直

流输电电压等级序列的必要性, 并建议考虑进行换流变相互替代运行的研究, 最后还讨论了在直流输电系统落点较集中的地区建修理厂和设置换流变压器匝间保护等改进措施, 以便提高直流输电系统运行的可靠性。

参考文献

- [1] 浙江大学发电教研组直流输电教研组. 直流输电[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [2] 阳少军, 牛保红, 吕家圣. $\pm 500\text{kV}$ 天广直流换流变故障的分析与处理[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 165-167.
YANG Shao-jun, NIU Bao-hong, Lü Jia-sheng. Analysis of Accident of the Converter Transformer of Tian-Guang HVDC Project[J]. High Voltage Technology, 2006, 32(9): 165-167.
- [3] 曾宪刚, 黄徐, 刘江华. 天广直流换流变压器故障分析及现场绕组更换[J]. 高电压技术, 2006, 32(11): 167-169.
ZENG Xian-gang, HUANG Xu, LIU Jiang-huang. Converter Transformer Fault Analysis and Winding Replacement on Sit of Tian-Guang HVDC Project[J]. High Voltage Technology, 2006, 32(11): 167-169.
- [4] 曾宪刚, 吕家圣. 天广直流系统天生桥站408316换流变压器故障分析[J]. 变压器, 2008, 45(6): 69-73.
ZENG Xian-gang, Lü Jia-sheng. Fault Analysis of 408316 Converter Transformer in Tianshengqiao Converter Substation of Tian-Guang HVDC System[J]. Transformer, 2008, 45(6): 69-73.
- [5] 吕家圣, 曾宪刚, 黄徐, 等. $\pm 500\text{kV}$ 换流变压器现场干燥处理技术应用[J]. 高电压技术, 2007, 33(10): 222-223.
- [6] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [7] 王晓京. 采用双变压器并联解决 $\pm 660\text{ kV}$ 超大容量换流变压器的运输和制造的可行性[J]. 电力设备, 2008, 9(6): 38-42.
WANG Xiao-jing. Feasibility of Adopting Double Transformer with Parallel Connection to Solve Problems of Transportation and Production for $\pm 660\text{ kV}$ Extra Large Capacity Converter Transformer[J]. Electrical Equipment, 2008, 9(6): 38-42.
- [8] 刘振亚, 舒印彪, 张文亮, 等. 直流输电系统电压等级序列研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 1-8.
LIU Zhen-ya, SHU Yin-biao, ZHANG Wen-liang, et al. Study on Voltage Class Series for HVDC Transmission System[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 1-8.
- [9] LIN Rui, LIU Hong-tai. Analysis of Steady-State Operation of Shenzhen Converter Station's Y/Y Converter Transformer Substitute Zhaoqing Converter Station's Converter Transformer[A]. in: The 17th Conference of Electric Power Supply Industry[C]. 2008.

(下转第124页 continued on page 124)

参考文献

[1] BP-2A 微机母线保护装置技术说明书[Z]. 深圳:深圳南京自动化研究院, 1997.
Technique Instruction Manual of BP-2A Serial Busbar Protective Devices[Z]. Shenzhen: Shenzhen Nanjing Automation Research Institute, 1997.

[2] PSL 603 (G) 数字式线路保护装置技术说明书[Z]. 国电南京自动化股份有限公司, 2004.
Technique Instruction Manual of PSL 603 (G) Serial Digital Line Protective Devices[Z]. Guodian Nanjing Automation co.Ltd, 2004.

[3] 变电站综自系统保护信号分类及传输原则[Z]. 福州:福州电业局, 2004.
Protective Signal Classification and Transmission Standard of Integrated Substation Automation System[Z]. Fuzhou: Fuzhou Power Supply Bureau, 2004.

[4] 变电站综合自动化系统信号分类和传输规范[Z]. 福建:福建省电力有限公司, 2006.
Signal Classification and Transmission Standard of Integrated Substation Automation System[Z]. Fujian: Fujian Electric Power Company Limited, 2006.

收稿日期: 2009-01-09

作者简介:

张国平 (1979-), 男, 工程师, 工学硕士, 主要从事电力系统继电保护和变电站综合自动化工作; E-mail: zh_guoping@126.com

黄巍 (1969-), 男, 高级工程师, 工学硕士, 长期从事电力系统整定计算和继电保护管理工作;

华建卫 (1966-), 男, 高级工程师, 长期从事电力系统继电保护管理工作。

(上接第 78 页 continued from page 78)

[4] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
WANG Zhao-an, YANG Jun, LIU Jin-jun. Harmonics Suppression and Reactive Power Compensation[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.

[5] 李海鹏, 牛培峰. 基于DSP的新型静止无功发生器控制器的研制[J]. 继电器, 2005, 33 (10): 57-61.
LI Hai-peng, NIU Pei-feng. Design of a Static VAR Generator Controller based on Digital Signal Processor[J]. Relay, 2005, 33 (10): 57-61.

[6] 洪乃刚, 等. 电力电子和电力拖动控制系统的MATLAB 仿真[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

HONG Nai-gang, et al. MATLAB Simulation of Power Electronics and Electric Drive Control System[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.

收稿日期: 2009-01-05; 修回日期: 2009-02-28

作者简介:

李付亮 (1974-), 男, 副教授, 硕士, 主要从事教学与电气信息、电力系统微机保护及水电站自动化方面的研究; E-mail: lfliang_@163.com

周有庆 (1944-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电气信息、电力系统微机保护及变电站自动化方面的研究;

吴涛 (1984-), 男, 硕士, 研究方向为电气信息、电力系统微机保护及变电站自动化。

(上接第 119 页 continued from page 119)

[10] LIU Hong-tai, LIN Rui. Analysis of On-Load Tap Changer Operation and Harmonic Condition of Shenzhen Converter Station's Y/Y Converter Transformer Substitute Zhaoqing Converter Station's Converter Transformer[A]. in: The 17th Conference of Electric Power Supply Industry[C]. 2008.

[11] Rudervall R, Charpentier J P, Sharma R. High Voltage Direct Current (HVDC) Transmission Systems[R]. in:

Technology Review Paper Presented at Energy Week[C]. Washington DC (USA) [s.n.]: 2000.

收稿日期: 2009-02-02; 修回日期: 2009-03-23

作者简介:

汲广 (1976-), 男, 工程师, 目前从事直流输电管理工作;

朱韬析 (1980-), 男, 工程师, 目前从事直流输电维护工作。E-mail: taoxi_zhu@hotmail.com