

混合级联逆变器在 STATCOM 中的应用研究

郑建, 陈劲操

(南京理工大学动力工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 随着多电平逆变器在电力系统无功功率补偿领域的广泛应用, 为了对目前应用的静止同步补偿器 (STATCOM) 进行改进, 提出了将 2H 桥与 3H 桥混合级联逆变器作为 STATCOM 的拓扑, 运用 EPWM 进行调制的解决方案。该方案可以省去庞大笨重的变压器, 减小功耗, 降低输出谐波含量。文章对基于混合级联逆变器的 STATCOM 的工作原理进行了分析, 在完成理论研究的基础上, 利用电力电子仿真软件 Simplorer 进行了仿真研究, 仿真结果表明, 混合级联 STATCOM 具有输出波形质量好、动态响应速度快的优点。

关键词: 混合级联; 多电平逆变器; 静止同步补偿器; 阶梯波; EPWM

Study of STATCOM based on hybrid cascaded multilevel inverter

ZHENG Jian, CHEN Jin-cao

(Power Engineering College, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: As the broad application of multilevel inverters in high-power area, a 2H/3H cascaded multilevel inverter is used as a static synchronous compensator (STATCOM). Stair-waveform modulation and equal-pulse width modulation (EPWM) is used to control this STATCOM. Comparing with the STATCOM put into operation, this STATCOM can eliminate bulky and weighty transformers. Therefore, the power loss and the cost of this system are reduced. Furthermore, this STATCOM outputs less harmonic so that it will not bring new pollution into the power system. This paper explains the operation principle and the modulation technique of this system. The simulation software Simplorer is used to prove the validity of this system.

Key words: hybrid cascade; multilevel inverters; STATCOM; stair-waveform modulation; equal-pulse width modulation

中图分类号: TM714.3 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)18-0057-05

0 引言

静止同步补偿器 (STATCOM) 是 20 世纪 80 年代以来出现的采用自换相变流电路的静止无功补偿装置。STATCOM 作为灵活交流输电系统 (FACTS) 的核心装置之一, 可以双向连续调节无功功率的输出, 具有输出波形品质好, 动态响应速度快的优点^[1]。

目前, 国内外投入使用的 STATCOM 大多采用变压器多重化主电路结构^[2~5], 这种结构的 STATCOM 损耗大、耗资大、体积大, 并且控制困难^[6]。近年来, 在 STATCOM 的工程研究中, 由于多电平逆变器可以降低开关元件的耐压和开关过程中的 dv/dt , 省去多重化变压器, 改善输出波形, 引起了人们越来越多的重视^[7]。

本文提出了一种基于 2H 桥与 3H 桥混合级联多电平逆变器的 STATCOM 主拓扑结构。和钳位式以及级联式多电平 STATCOM 相比, 这种结构的 STATCOM 既可

以减少独立直流电源的个数, 又可以在不增加电路复杂程度的情况下增多电平数, 改善输出波形质量^[8]。这种 STATCOM 主要适用于单相系统以及三相系统的分相补偿, 可以应用于高压大功率场合下的无功功率补偿。文中对系统结构以及调制方法进行了介绍和分析, 并使用电力电子仿真软件进行了仿真实验, 实验结果表明混合级联 STATCOM 输出波形质量好, 有较好的无功功率补偿效果, 动态响应速度快。

1 系统结构及工作原理分析

图 1 所示为 2H 桥与 3H 桥组成的混合级联 STATCOM (图中以两个功率单元级联为例, 工程应用时可根据需要进行扩展)。这种不同功率单元的混合级联结构, 可以在各个功率单元中采用不同的开关器件, 从而降低装置成本。同时, 还可以根据最大扩展原则确定各个功率单元的直流母线电压, 以

得到最多电平数输出,使系统适用于高压大功率场合。

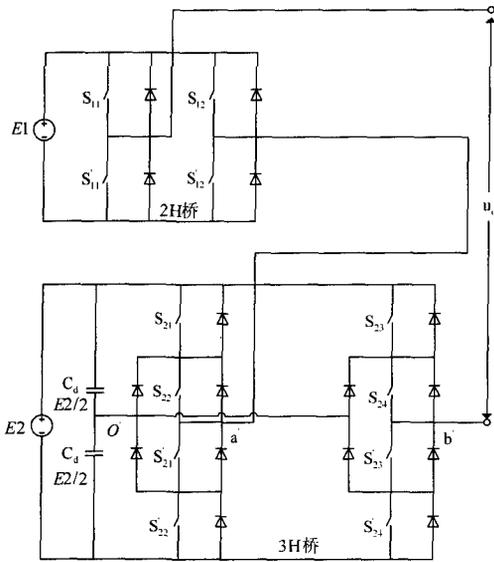


图1 2H桥与3H桥混合级联STATCOM

Fig.1 Hybrid cascaded STATCOM composed of 2H bridge and 3H bridge

所谓最大扩展原则,是指对于N个功率单元串联叠加的多电平逆变器,如果每一个功率单元能输出的最多电平数为 m_i ($i=1, 2, 3, \dots, N$),那么当各个功率单元的直流侧电压按式(1)设置时

$$\frac{E_i}{E_{i-1}} = \frac{m_i - 1}{m_i(m_{i-1} - 1)}, i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (1)$$

可以得到最多的输出电平数 m_{max}

$$m_{max} = \prod_{i=1}^N m_i \quad (2)$$

图1所示的混合级联电路中,2H桥能输出3个电平,3H桥能输出5个电平,即 $m_1=3, m_2=5$,由此可得 $E_1/E_2=1/6$,2H桥和3H桥的直流侧电压分别为 $1E$ 和 $6E$ 。2H桥输出 $E、0、-E$ 这3个电平,3H桥输出 $6E、3E、0、-3E、-6E$ 这5个电平,通过将这两个功率单元的输出叠加,可以得到15个电平,如图2(图中所示为正半周工作波形,负半周工作波形可根据对称原则获取)所示。文献[8]指出,在输出15个电平的情况下,和传统的多电平STATCOM相比,这种结构的STATCOM所需的器件是最少的。

在级联STATCOM中,应保证2H桥和3H桥在输出任何电平时,电路都能保持导通状态,这就要求每一个基本功率单元都有四种基本工作状态,即正向导通、反向导通、正向旁路以及反向旁路。以图1为例,当系统输出电平为 $3E$ 时,3H桥工作在正向导

通状态,开关管 $S_{21}、S_{22}、S_{23}$ 以及 S_{24} 导通,而2H桥则工作在正向旁路状态,开关管 S_{11} 以及 S_{12} 导通。

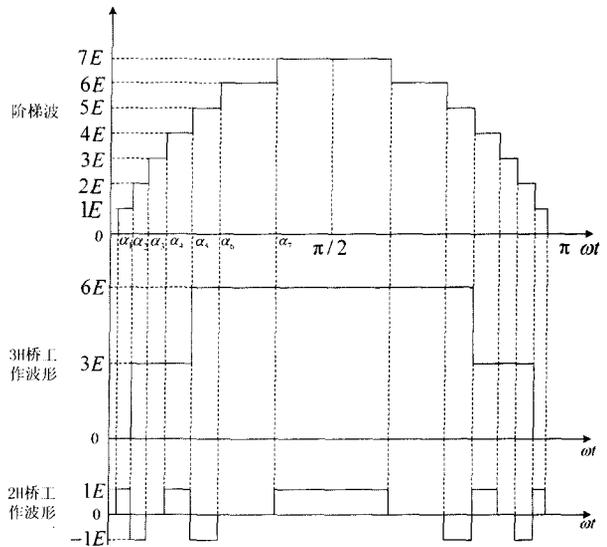


图2 2H桥和3H桥的工作波形

Fig.2 Working waveform of 2H bridge and 3H bridge

2 混合级联STATCOM的EPWM阶梯波控制法

2H桥与3H桥混合级联STATCOM的控制方法主要有两种:一种是基于基频的控制法,通过选择合适的器件开关角,使逆变器输出的多电平阶梯波逼近正弦波;另一种则是比较流行的混合调制法,对3H单元在低频下采用相移PWM,对2H单元则在高频下采用单极性PWM。其中2H桥的调制信号由3H桥的参考信号减去其输出所得,载波信号为高频三角波^[9]。混合调制法具有控制简单、易于扩展的优势,然而这种方法只能实现11个电平的PWM控制,有4个电平(正半周两个,负半周两个)不能实现PWM控制,这4个电平中含有较多的低次谐波,如果在2H桥/3H桥混合级联STATCOM中采用这种调制方法,将会影响补偿效果,给电力系统带来新的谐波污染。因此,正弦波逼近法更为适合对混合级联STATCOM进行控制。

正弦波逼近法是指根据STATCOM的输出电平数按照波形逼近法或消除特定谐波法得到谐波含量最小的阶梯波。相较于消除特定谐波法,波形逼近法的谐波含量最小,并且离线计算简单^[10],在电平数较多的情况下,低次谐波也可以得到有效的抑制,因此采用波形逼近法获取阶梯波。

波形逼近法的原理如图3所示。图中阶梯波的阶高相等,阶梯波与正弦波的交点即为触发角,触发角的位置根据阶梯波面积与正弦波面积相等的原则求取,具体的计算过程如图4所示。只要使得图4中

所示的两个阴影区域的面积相等, 便可以使得阶梯波面积与正弦波面积相等。根据对称原则, 只要求

出前1/4周期的开关角, 便可以确定整个周期的开关角。

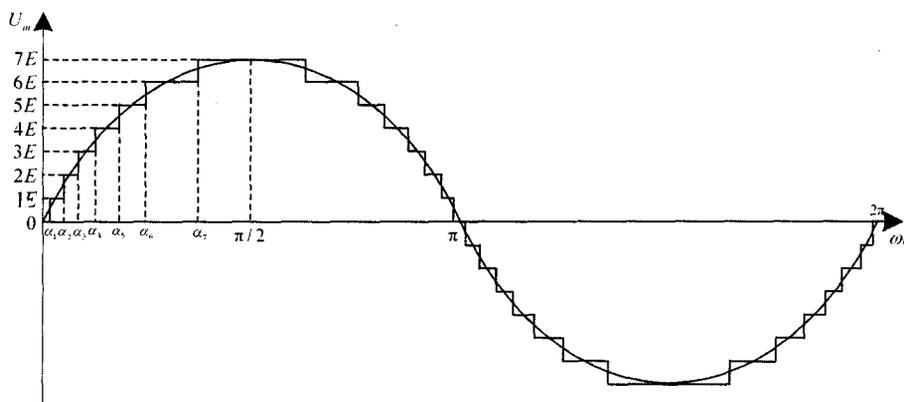


图3 波形逼近法原理

Fig.3 Theory of waveform approximation

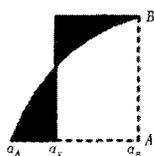


图4 开关角计算示意图

Fig.4 Switching point calculation

根据图4, 可得式(3):

$$\int_{\alpha_A}^{\alpha_x} (\sin \alpha - A) d\alpha = \int_{\alpha_x}^{\alpha_B} (B - \sin \alpha) d\alpha \quad (3)$$

式中: A 、 B 为阶梯波的电平值, α_x 为所求开关角, $\alpha_A = \sin^{-1} A$, $\alpha_B = \sin^{-1} B$ 。

根据式(3), 易得 $\alpha_1 = 4.0996^\circ$, $\alpha_2 = 12.3849^\circ$, $\alpha_3 = 20.9463^\circ$, $\alpha_4 = 30.0377^\circ$, $\alpha_5 = 40.0755^\circ$, $\alpha_6 = 51.9523^\circ$,

$\alpha_7 = 69.4334^\circ$ 。为了提高输出波形质量, 采用数控方式来精确定位触发角, 系统一个周期的数控脉冲数为 90。

根据波形逼近法所获得的阶梯波自身不具备调压能力, 一般还需依靠前级的直流变换器调压或采用移相调压技术^[11,12]。前者增加了直流环节, 限制了功率容量, 同时降低了效率; 后者则需要增加变换器和变压器的容量, 即增加了系统的体积重量和成本, 特别是在功率较大和输入电压变化范围大的场合, 这一缺点更加突出^[13,14]。为了对 STATCOM 的输出电压幅值进行调节, 以形成有效的电压闭环控制, 系统采用 EPWM 法对输出波形进行斩波控制, 以得到谐波含量少而又能进行 PWM 调压的输出电压。

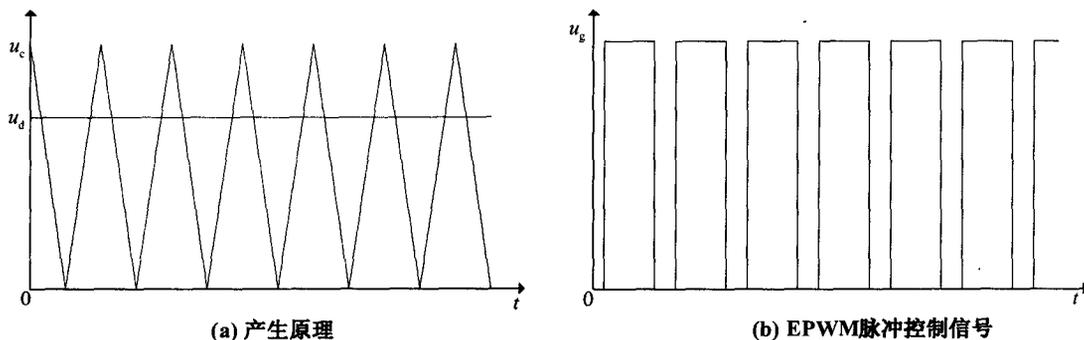


图5 EPWM 脉冲控制信号的产生

Fig.5 Generation of EPWM pulse

图5所示为EPWM脉冲控制信号产生的原理。在此图中用 N 个时钟脉冲 (N 值一般与对逆变器进行控制的数控脉冲数量相等) 产生出三角载波 u_c , 使用

直流电压控制信号 u_d 与 u_c 进行比较 (图5 (a)), 在 u_d 大于 u_c 的部分产生 EPWM 正脉冲控制信号 u_g (图5 (b))。

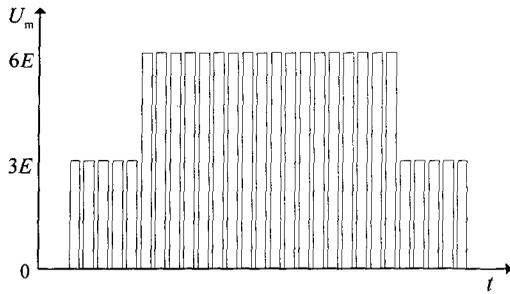


图 6 3H 桥控制信号

Fig.6 Controlling signal of 3H bridge

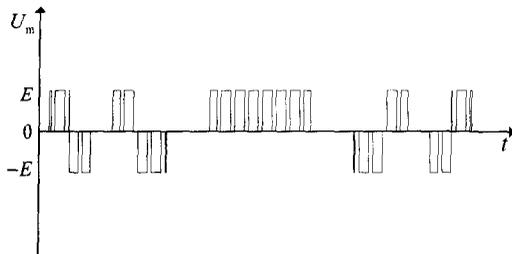


图 7 2H 桥控制信号

Fig.7 Controlling signal of 2H bridge

在得到EPWM正脉冲控制信号 u_g 后,将此信号与根据波形逼近法所得的2H桥与3H桥的控制信号(图2)作为逻辑门“与”的输入,则逻辑门的输出就是可以进行调压的STATCOM的控制信号(图6,图7)。通过改变直流电压控制信号 u_d 的大小就可以实现STATCOM输出电压幅值的控制。

3 混合级联STATCOM的工作原理分析

本文所提出的混合级联STATCOM,主要用于单相系统的无功补偿以及三相不平衡时的分相补偿。图8所示是系统的单相等效电路图,图中, U_s 是电网电压, U_1 是STATCOM的输出电压,它与 U_s 的频率相同, I 是从电网注入STATCOM的电流, X 为连接电抗器。实际工程应用中,需要考虑连接电抗器的损耗和变流器自身的损耗,通常将总的损耗集中作为连接电抗器的电阻 R 来考虑。

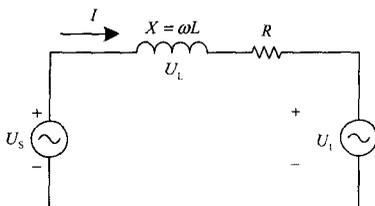


图 8 STATCOM 单相等效电路

Fig.8 Single phase equivalent circuit of STATCOM

图9是STATCOM工作的相量图,图中 ϕ 是线路的阻抗角, U_L 是负载电压, $U_L=U_s-U_1$ 。混合级联STATCOM的直流侧电压由独立直流电源提供,系统的损耗也由这些直流电源进行补偿。因此,电网电压 U_s 与电流 I 的相位差将保持在 90° ,而 U_1 与电流 I 的相位差为 $90^\circ+\delta$ 。 δ 角是电网电压 U_s 与STATCOM输出电压 U_1 的相位差, U_1 的相位超前于 U_s 时, δ 为正,滞后于 U_s 时, δ 为负。通过改变 δ 的大小,并且改变 U_1 的幅值,就可以改变电流 I 的相位和幅值,这样就实现了STATCOM从电网中吸收的无功功率的调节。

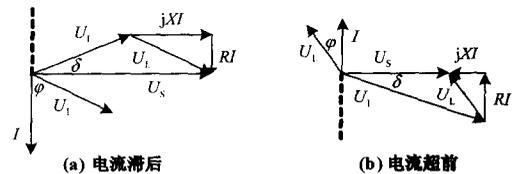


图 9 STATCOM 的工作相量图

Fig.9 Working phasor diagram of STATCOM

4 仿真实验

为了证明混合级联STATCOM的有效性,使用电力电子仿真软件进行了仿真验证。主要仿真参数为:电网相电压幅值为220 V,频率为50 Hz,2H桥的直流侧电压为31.5 V,3H桥的直流侧电压为188.5 V,连接电抗为20 mH,等效电阻为5 Ω 。

首先对STATCOM的输出电压进行仿真分析。图10所示为混合级联STATCOM在直流控制电压信号为120 V时的输出波形及频谱分析。

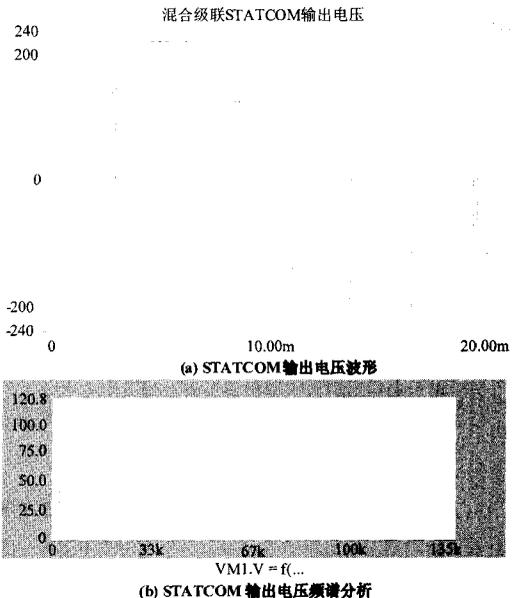


图 10 混合级联 STATCOM 输出电压及频谱分析

Fig.10 Output voltage of hybrid cascaded STATCOM and spectrum analysis of the voltage

根据仿真结果, STATCOM 输出电压的基波幅值为 120.776 9 V, 满足了输出电压为 120 V 的设计要求。此时, STATCOM 输出相电压的 *THD* 值为 5.2%, 而使用载波调制法控制的混合级联 STATCOM 输出相电压的 *THD* 值一般为 15%。如果要使用传统的级联型 STATCOM 获得 15 电平相电压输出, 在采用相移 PWM, 载波频率为 3 kHz 时, 相电压 *THD* 值高达 31.85%。这说明, 采用阶梯波 EPWM 法控制的混合级联 STATCOM 拥有较好的波形输出质量。

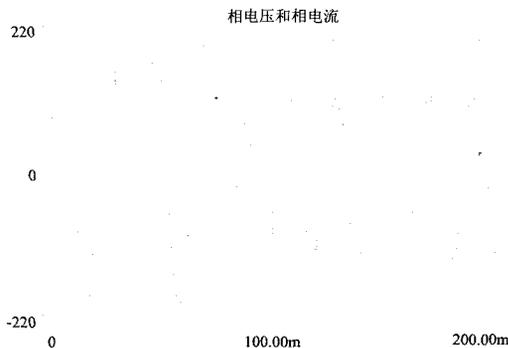


图 11 混合级联 STATCOM 进行无功功率补偿仿真波形

Fig.11 Simulation waveform of reactive power compensation using hybrid cascaded STATCOM

图11为利用混合级联STATCOM对单相系统进行无功补偿的仿真波形, STATCOM在80 ms时投入运行, 图中所示为相电压和相电流。由图11可以看出, 在STATCOM投入之前, 由于无功电流的存在, 相电压和相电流之间存在着一定的相位差, 混合级联STATCOM投入系统后, 消除了相电压和相电流之间的相位差。这说明STATCOM有效补偿了系统中的无功功率。同时, 由图可得, 混合级联STATCOM仅用10 ms就消除了相电压和相电流之间的相位差, 充分证明了STATCOM的快速响应能力。

5 结论

本文提出的混合级联 STATCOM, 具有输出电压谐波含量小、组成灵活、可以应用于高压大功率场合下的无功补偿等优点。该 STATCOM 中应用的 EPWM 阶梯波控制法, 可以降低器件的开关频率, 并且控制简单, 易于扩展, 这在无功补偿领域是十分重要的。在完成理论分析的基础上, 使用电力电子仿真软件对混合级联 STATCOM 进行了仿真研究, 仿真结果表明, 混合级联 STATCOM 可以有效地补偿系统中的无功功率, 并且响应速度较快, 是一种具有工程应用价值的 STATCOM 主电路拓扑。

参考文献

- [1] 伏祥运, 王建曠, 曾繁鹏, 等. 一种改进的混合静止同步补偿器[J]. 电网技术, 2006, 30 (15): 80-84. FU Xiang-yun, WANG Jian-ze, ZENG Fan-peng, et al. An Improved Hybrid Static Synchronous Compensator[J]. Power System Technology, 2006, 30(15): 80-84.
- [2] Edwards C W, K E Mattern, Stacey E J, et al. Advanced Static Var Generator Employing GTO Thyristors[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3(4): 1622-1627.
- [3] Mori S, Matsuno K, Hasegawa T, et al. Development of a Large Static Var Generator using Self-Commutated Inverter for Improving Power System Stability[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(1): 371-377.
- [4] Schauder C, Stacey E, Lund M, et al. AEP UPEC Project: Installation, Commissioning and Operation of the ± 160 Mvar STATCOM (Phase I)[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(4): 1530-1535.
- [5] 刘文华, 梁旭, 姜齐荣, 等. 采用 GTO 逆变器的 ± 20 Mvar STATCOM[J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (23): 19-23, 70. LIU Wen-hua, LIANG Xu, JIANG Qi-rong, et al. Development of \pm Mvar STACOM Employing GTO Inverters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (23): 19-23, 70.
- [6] Peng F Z, McKeever J W, Adams D J. Cascade Multilevel Inverters for Utility Applications[A]. in: IECON 97[C]. 1997. 437-442.
- [7] 王立杰, 孙玉坤, 孙运全, 等. 大容量链式 STATCOM 的三角载波移相-开关频率最优 PWM 法控制策略的研究[J]. 继电器, 2007, 35 (3): 461-49. WANG Li-jie, SUN Yu-kun, SUN Yun-quan, et al. PS-SFO-PWM Control for High-power STATCOM Employing Cascade Multilevel Inverters[J]. Relay, 2007, 35 (3): 461-49.
- [8] 刘凤君. 多电平逆变技术及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [9] 陈阿莲, 何湘宁, 赵荣祥. 一种改进的级联型多电平变换器拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (11): 13-162. CHEN A-lian, HE Xiang-ning, ZHAO Rong-xiang. An Improved CASCADED Multilevel Inverter Topology[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (11): 13-162.
- [10] 江友华, 曹以龙, 龚幼民. 多电平中几种阶梯波算法的分析和比较[J]. 电气传动, 2005, 35 (2): 34-36. JIANG You-hua, CAO Yi-long, GONG You-min. The Analysis and Comparison of Some Kinds of Stair-waveform Arithmetic in Multicevel Converter[J]. Electric Drive, 2005, 35 (2): 34-36.
- [11] 张勇, 谢少军. 大功率三相静止变流器研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2002, 34 (1): 57-61.

(下转第 73 页 continued on page 73)

作为参考相并网, 效果明显好于 A 相或 C 相并网, 产生的冲击电流是最小的。

4 结论

并网装置运行中遇到的三相不平衡问题非常普遍, 处理不当会产生较大冲击电流, 造成并网装置或系统的损坏。文中对并网条件、冲击电流产生的原因和三相不平衡的原因进行分析, 最后冲击电流的计算大小选择并网的操作相, 得出结论: 并网时选取 B 相进行, 产生的合闸相角差最小, 冲击电流最小。这样就优化了并网三相不平衡的问题, 提高了并网时的可靠性和安全性。

参考文献

- [1] 韦刚, 吴伟力. 分布式电源及其并网时对电网的影响[J]. 高电压技术, 2007, 33(1):36-40.
WEI Gang, WU Wei-li. Distributed Generation and Effects of Its Parallel Operation on Power System[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1):36-40.
- [2] 刘杨华, 吴政球, 等. 分布式发电及其并网技术综述[J]. 电网技术, 2008, 32(15):71-76.
LIU Yang-hua, WU Zheng-qiu, et al. A Survey on Distributed Generation and Its Networking Technology[J]. Power System Technology, 2008, 32(15):71-76.
- [3] 张艳霞, 王锡凡. 电力系统保护与控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005. 105-124.
ZHANG Yan-xia, WANG Xi-fan. Power System Protection and Control[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. 105-124.
- [4] 葛少云, 李晓明. 基于戴维南等值的配电网合环冲击电流计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(6):124-127.
GE Shao-yun, LI Xiao-ming. Study on Surge Current Due to Closing Loop in Distribution Network Based on Thevenin's Equivalent[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2007, 19(6):124-127.
- [5] 叶清华, 唐国庆, 等. 配电网合环操作环流分析系统的开发和应用[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(22):66-69.
YE Qing-hua, TANG Guo-qing, et al. Development and Application of the Analysis System for Closed Loop Operation of Distribution Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(22):66-69.
- [6] 潘书燕, 曹团结, 等. 在线路监控单元中实现的准同期功能[J]. 继电器, 2003, 31(12):58-60.
PAN Shu-yan, CAO Tuan-jie. Necessity of the Quasisynchronization Functions in the Line Monitor and Control Unit[J]. Relay, 2003, 31(12):58-60.
- [7] 侯彦方. 配电变压器采用 Dyn11 联结组的优势分析[J]. 电气应用, 2008, 27(6):50-52.
HOU Yan-fang. The Analysis About Advantage of Dyn11 Using in Distribution Transformer[J]. Electrotechnical Application, 2008, 27(6):50-52.
- [8] 张五一, 张言滨, 等. 配电网三相负荷不对称的线损分析[J]. 继电器, 2007, 35(7):24-27.
ZHANG Wu-yi, ZHANG Yan-bin, et al. Circuit Loss Analysis of Three-phase Unbalanced Circuit in Distribution Network[J]. Relay, 2007, 35(7):24-27.

收稿日期: 2008-10-13; 修回日期: 2009-02-19

作者简介:

海 涛 (1963-), 男, 硕士生导师, 高级工程师, 主要研究方向为工业自动化、检测仪表等; E-mail: haitao@gxu.edu.cn

闭耀宾 (1980-), 男, 硕士研究生, 研究方向为综合自动化。

(上接第 61 页 continued from page 61)

ZHANG Yong, XIE Shao-jun. Three-phase Static Converter with High Power Output[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 34(1):57-61.

[12] Zhang Z C, Kuang J, Wang X, et al. Force Commutated HVDC and SVC Based on Phase Shifted Multi-converter Modules[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(4):712-718.

[13] Leon M T, Peng F Z, Thommas G H. Multilevel PWM Methods at Low Modulation Indices[J]. IEEE Trans on P E, 2000, 15(4):719-725.

[14] Peng F Z, LAI Jin-sheng, Mckeever J, et al. A Multilevel Voltage-source Inverter with Separate DC Sources for Static VAR Generation[J]. IEEE Trans on I A, 1996, 32(5):1130-1137.

收稿日期: 2008-11-04

作者简介:

郑 建 (1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术

陈劲操 (1956-), 男, 教授, 主要研究方向为测试技术, 电力电子技术在电力系统中的应用。