

DOI:10.3969/j. issn. 1001 - 4551. 2016. 08. 020

级联多电平 STATCOM 直流侧电容 电压稳定性分析

谢天才¹, 张玉娟¹, 张君泉², 王众全²

(1. 国网辽宁省电力有限公司 朝阳供电公司, 辽宁 朝阳 122000; 2. 积成电子股份有限公司, 山东 济南 250100)

摘要: 针对级联多电平静止同步补偿器(STATCOM)各独立直流侧电容电压易失衡的问题, 为保证 STATCOM 中各级联单元电容电压的稳定性, 提出了一种直流侧电容电压检测与控制方法。首先, 分析了电网无功功率交换对直流侧电容电压的影响。然后, 基于能量平衡原理, 建立了级联多电平 STATCOM 能量平衡模型同时采用 PI 闭环控制方法以解决滤波电路的延时问题, 并进行了稳定性分析。最后, 搭建了多电平级联 STATCOM 实验样机, 并进行了实验研究。研究结果表明: 该控制系统和方法可以保证直流侧电容电压的稳定性; 积分时间常数 T_{di} 对系统稳定性的影响较大, 与理论分析结果相符。

关键词: 静止同步补偿器; 级联多电平逆变器; 直流侧电容; 电压稳定控制

中图分类号: TM76

文献标志码: A

文章编号: 1001 - 4551(2016)08 - 1016 - 05

DC capacitor voltage stability analysis for cascade multilevel STATCOM

XIE Tian-cai¹, ZHANG Yu-juan¹, ZHANG Jun-quan², WANG Zhong-quan²

(1. State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd. Chaoyang Power Supply Company, Chaoyang 122000, China;
2. Integrated Electronic System Lab Co., Ltd., Jinan 250100, China)

Abstract: Aiming at the problem of the imbalance among each independent DC capacitor voltage of cascade multilevel STATCOM, a DC capacitor voltage detection and control method is proposed to guarantee the DC capacitor voltage stability of cascade multilevel STATCOM. Firstly, the influence caused by grid reactive power exchange on DC capacitor voltage is analyzed. Then, a cascade multilevel STATCOM energy balance model is established based on energy balance principle. At the same time, a PI closed-loop control method is adopted to solve the problem of filter circuit time-delay, and a stability analysis is also carried out. Finally, the multilevel cascade STATCOM experimental prototype is set up and relevant experiments are conducted. The results indicate that this control system and method can guarantee the stability of DC side capacitor voltage and the stability is mainly influenced by the integral time constant T_{di} , consistent with the theoretical analysis results.

Key words: static synchronous compensator; cascade multilevel inverter; DC capacitor; voltage stability control

0 引言

近年来, 电力工业得到了快速发展, 针对一些特定场合传统的无功补偿装置很难满足其应用要求^[1-5]。作为一种新型的无功补偿装置, 静止同步补偿器(STATCOM)采用级联多电平逆变技术, 通过全桥或半桥模块电路级联可以较好地弥补单一器件耐压不足的

缺点, 同时具有易扩展、易维护等优点, 在中高压配电网中的应用十分广泛^[6-9]。

在实际应用中, 受触发脉冲不一致、电力电子器件之间差异性等因素的影响, 静止同步补偿器各级联单元直流侧电容电压容易失衡。甚至有可能导致开关器件失去耐压性, 威胁到补偿器的安全运行^[10-11]。因此, 级联多电平 STATCOM 的关键技术在于维持各级

联单元电容电压的稳定性。目前,针对级联多电平 STATCOM 直流侧电压的均衡控制,诸多学者进行了相关研究并取得了一定的成果。文献[12-13]详细分析了电容电压的不平衡机理,认为造成电容电压不平衡的主要原因包括:开关脉冲延时差异、混合型损耗差异和并联型损耗差异。文献[14]提出了一种直流侧电容电压均衡控制方法,即通过外部电路实现电压平衡,该方法简单实用,但是会增加装置成本和运行损耗。文献[15]基于能量平衡原理,设计了一种控制模型,通过控制参数设计、稳定性分析和相关实验验证了该模型的有效性。另外,级联多电平 STATCOM 直流侧电容电压容易出现二倍频波动^[16],该二倍频波动会影响控制回路,同时造成并网电流中的三次谐波^[17],所以需要对直流侧电压信号进行滤波处理。同样,该检测滤波电路会影响级联多电平 STATCOM 直流侧电压的稳定性,但是关注该影响的文献相对较少。

本研究在现有研究的基础上,重点研究级联多电平 STATCOM 直流侧电压的稳定控制方法,提出一种 PI 闭环控制方法,并进行稳定性分析,最后通过实验验证其有效性。

1 直流侧电容电压波动分析

本研究以单相级联 STATCOM 其为例,对无功补偿时直流侧电容电压的波动进行分析。为便于分析可作如下假设:各级联单元的电容器状态一致;不考虑电抗器的能量波动同时忽略变流器的损耗;电网的无功功率全部传输至直流侧电容。

定义电容容量均为 C ,直流侧电容电压初始值为 u_{d0} ,那么电容器的初始总能量 W_0 可表示为:

$$W_0 = \frac{NCu_{d0}^2}{2} \quad (1)$$

无功功率瞬时值可用二倍频的交流量表示,即:

$$p = \sqrt{2}U_s \sin(\omega t) \times \sqrt{2}I_q \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = U_s I_q \sin(2\omega t) \quad (2)$$

式中: ω —电网角频率, I_q —无功电流有效值, U_s —电网电压有效值。

若电网周期为 T_s ,在 $(0 \sim 1/4)T_s$ 时间内,无功功率为正,直流侧电容处于充电状态,电容能量持续增加;在 $(1/4 \sim 1/2)T_s$ 时间内,直流侧电容处于放电状态,其能量将陆续释放。所以上述无功交换,势必导致

直流侧电容电压的波动。在 $(0 \sim 1/4)T_s$ 时间内,直流侧电容能量变化量可表示为:

$$\Delta W = \int_0^{\frac{T_s}{4}} p dt = \int_0^{\frac{T_s}{4}} U_s I_p \sin(2\omega t) dt = \frac{U_s I_p T_s}{2\pi} \quad (3)$$

因此, $\frac{1}{4}T_s$ 时刻直流侧电容总能量可表示为:

$$W = W_0 + \Delta W = \frac{NC(u_{d0} + \Delta u_d)^2}{2} \quad (4)$$

根据式(1,3,4) 计算可得直流侧电压波动量 Δu_d 为:

$$\begin{aligned} \Delta u_d &= \sqrt{u_{d0}^2 + \frac{2\Delta W}{NC}} - u_{d0} \\ &= \sqrt{u_{d0}^2 + \frac{U_s I_p T_s}{\pi NC}} - u_{d0} \end{aligned} \quad (5)$$

综上所述,级联多电平 STATCOM 直流侧电容电压波动为二倍频分量,该二倍频分量幅值大小由直流侧电压初始值、电容容量、级联数、无功电流、电网电压共同决定。

2 直流侧电容电压均衡控制

2.1 级联多电平 STATCOM 能量平衡模型

为保证直流侧电容电压瞬时功率平衡,基于能量平衡的原理,瞬时功率平衡方程可以表示为:

$$u(t)i(t) - \frac{1}{2}i(t)L \frac{di(t)}{dt} = \sum_{i=1}^N u_{di}(t)C_i \frac{du_{di}(t)}{dt} \quad (6)$$

式中: $u(t)$ —电网电压瞬时值, $i(t)$ —电网电流瞬时值, $u_{di}(t)$ —各级联单元直流侧电压瞬时值, C_i —各级联单元直流侧电容。

为便于分析,同样作如下假设:各级联单元直流侧电压变化一致;不考虑连接电感和无功补偿电流的影响。基于上述假设直流侧电压主要受基波有功电流分量的影响,可用下式进行表示:

$$U_s I_p(t) = \sum_{i=1}^N C u_{di}(t) \frac{du_{di}(t)}{dt} = \frac{C}{N} u_d(t) \frac{du_d(t)}{dt} \quad (7)$$

式中: $u_d(t)$ —各级联单元直流侧电压之和。

鉴于微分方程(7) 的非线性,本研究采用小信号分析法对其进行线性化处理。如果不考虑变流器的损耗,在电路稳态工作点附近,直流侧电压无限接近设定值,有功电流为零,即满足 $u_d = u_d^*$, $I_p = 0$, $du_d/dt = 0$ 。

若加入小信号扰动,则有:

$$\begin{cases} u_d(t) = u_d^* + \Delta u_d \\ I_p(t) = \Delta I_p \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)代入式(7),整理可得:

$$\begin{aligned} U_s \Delta I_p &= \frac{C}{N}(u_d^* + \Delta u_d) \left(\frac{d\Delta u_d}{dt} + \frac{du_d^*}{dt} \right) \\ &\approx \frac{C}{N}u_d^* \frac{d\Delta u_d}{dt} \end{aligned} \quad (9)$$

对式(9)进行拉氏变换,可得稳态工作点处级联多电平静止同步补偿器的开环传递函数为:

$$G_c(s) = \frac{u_d(s)}{I_p(s)} = \frac{\Delta u_d(s)}{\Delta I_p(s)} = \frac{NU_s}{sCu_d^*} \quad (10)$$

2.2 PI 闭环控制

本研究采用 PI 调节器对电压环进行控制,其传递函数可表示为:

$$G_{PI}(s) = K_{dp} \frac{(sT_{di} + 1)}{sT_{di}} \quad (11)$$

一般情况下,电压 - 频率转换信号调理常采用一阶 RC 滤波电路,其反馈环节传递函数可表示为:

$$H(s) = \frac{1}{sR_f C_f + 1} = \frac{1}{sT_f + 1} \quad (12)$$

式中: T_f —滤波电路的时间常数, $T_f = R_f C_f$ 。

直流侧电压 PI 闭环控制框图如图 1 所示。

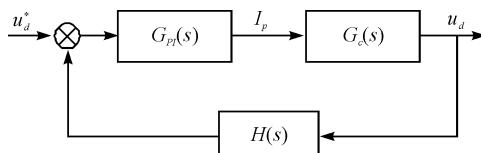


图 1 直流侧电压 PI 闭环控制框图

对应的系统开环传递函数 $G(s)$ 可表示为:

$$G(s) = G_{PI}(s)G_c(s)H(s) \quad (13)$$

另外,闭环传递函数 $\Phi(s)$ 可表示为:

$$\Phi(s) = \frac{G_{PI}(s)G_c(s)}{1 + G_{PI}(s)G_c(s)H(s)} \quad (14)$$

将式(10~12)分别代入式(13)和(14),整理可得:

$$G(s) = \frac{K_{dp}NU_s(sT_{di} + 1)}{Cu_d^*T_{di}s^2(sT_f + 1)} \quad (15)$$

$$\Phi(s) = \frac{NU_sK_{dp}(sT_{di} + 1)}{s^3T_fT_{di}Cu_d^* + s^2T_{di}Cu_d^* + sT_{di}NU_sK_{dp} + NU_sK_{dp}} \quad (16)$$

2.3 稳定判据

若将滤波环节考虑在内,那么级联 STATCOM 直流侧电容电压控制系统则是一个典型三阶系统,其特征方程可表示为:

$$s^3T_fT_{di}Cu_d^* + s^2T_{di}Cu_d^* + sT_{di}NU_sK_p + NU_sK_p = 0 \quad (17)$$

根据劳思 - 赫尔维茨稳定判据,三阶系统稳定的充分必要条件为:

$$\begin{cases} T_fT_{di}Cu_d^* > 0 \\ T_{di}Cu_d^* > 0 \\ T_{di}NU_sK_p > 0 \\ NU_sK_p > 0 \\ T_{di}Cu_d^*T_{di}NU_sK_p - T_fT_{di}Cu_d^*NU_sK_p > 0 \end{cases} \quad (18)$$

由方程组(18)可得系统稳定的充分必要条件为:滤波环节时间常数小于 PI 控制器积分时间常数,即 $T_f < T_{di}$ 。

同时,经过根轨迹分析可知:当 $T_f > T_{di}$ 时,共轭复数根位于 s 平面右半侧,系统不稳定;当 $T_{di} = T_f$ 时,共轭复数根位于虚轴上,系统临界稳定;当 $T_f < T_{di}$ 时,共轭复数根位于 s 平面左半侧,系统趋于稳定。

3 实验验证

为验证所述电压检测系统的有效性和稳定性分析的正确性,本研究搭建了多电平 STATCOM 实验样机,并进行了相关实验。

级联多电平 STATCOM 实验样机的主电路结构框图如图 2 所示,包括级联单元、驱动板、驱动扩展板和控制板等。级联单元采用半桥 IGBT 模块作为开关器件,并配套使用驱动板进行半桥 IGBT 模块的驱动。驱动扩展板可用于实现控制板和驱动板的光纤连接,驱动扩展板具有光电信号转换、取能、直流侧电压检测、驱动板故障信号综合等功能。其中取能模块由 DC/DC 电源模块和外围电路构成,可从级联单元直流侧获取能量,并转化为稳压电源,供驱动扩展板和驱动板使用;直流侧电压检测模块由光电转换电路、电压频率转换电路和分压电路组成。

控制板主要实现多路 PWM 脉冲信号的实时输出,基于 DSP 和 FPGA 进行搭建。其中 DSP 作为主控单元,可实现以下功能:电网和直流侧电压信号采集、直流侧电压稳定控制、系统电流跟踪控制、装置启动和保护等。作为多路 PWM 脉冲发生器,FPGA 主要负责脉冲信号的产生。为保证良好电气隔离,所述样机控制板采用光纤与各级联单元相连。

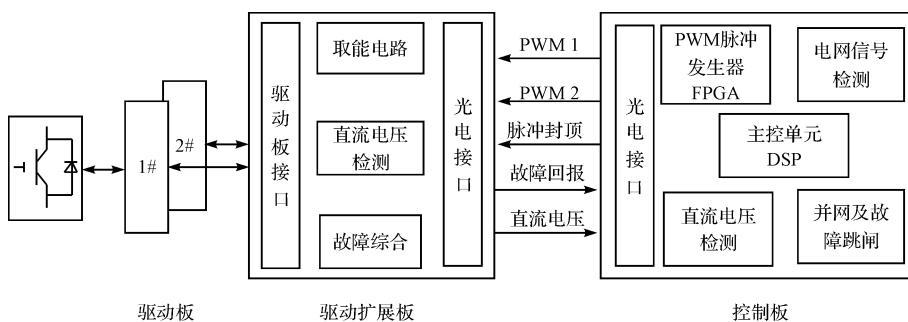


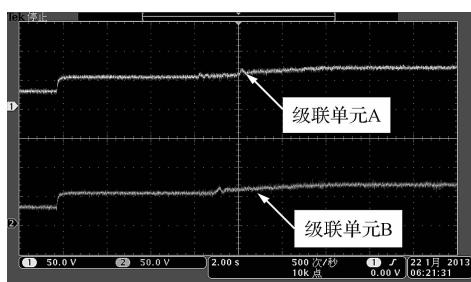
图2 主电路结构框图

笔者在本研究所述级联多电平 STATCOM 实验样机的基础上,进行低压并网实验,设置无功电流的峰值为 20 A,滤波时间常数为 0.01 s,积分时间常数为 0.05 s,其他实验参数设置如表 1 所示。

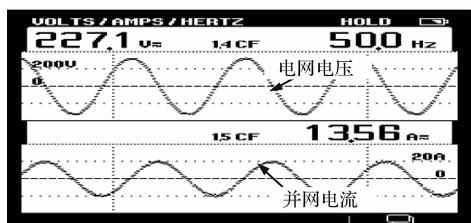
表1 实验参数设置

参数名称	数值大小
电网电压有效值/V	230
直流电压给定值/V	400
直流侧电容/ μ F	10 000
开关频率/kHz	1
滤波电容参数/ μ F	0.1
滤波电阻参数/k Ω	100
级联数	6
直流侧电压检测	光纤隔离

实验结果如图 3 所示。



(a) 并网过程直流侧电压波形



(b) 稳态时电网电压和并网电流波形

图3 $T_{di} = 0.05$ 时 STATCOM 低压实验波形

实验所测任选两个级联单元(以 A 和 B 表示)直流侧电压波形如图 3(a)所示;实验所测电网电压和并网电流稳态波形如图 3(b)所示。

通过分析可知:与电网电压相比,并网电流相位滞后 90° ;并网电流峰值为 20 A,与电流设定值一致;电网电压和并网电流波形比较理想;各级联单元直流侧

电压可以保持在 67 V 左右,偏差很小,相对比较稳定。

由实验可知,整个低压并网过程可以描述为:

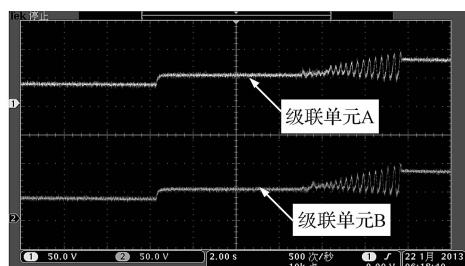
(1) 通过 IGBT 脉冲限制和不可控整流,可将级联单元直流侧电压抬升至 53 V 左右,那么直流侧总电压将被抬升至 320 V;

(2) 释放 IGBT 脉冲,在本研究所述直流侧电压稳定控制的作用下,可将各级联单元直流侧电压抬升至 67 V 左右,那么直流侧总电压会从 320 V 逐步过渡到设定值 400 V;

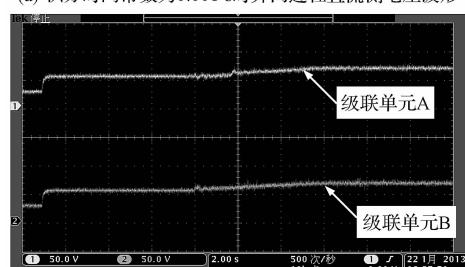
(3) 直流侧总电压稳定在 400 V,STATCOM 样机稳定工作。

另外,为验证前文所述稳定判据的正确性,并网实验中分别设定 PI 控制器的积分时间常数 T_{di} 为 0.008 s、0.02 s、0.05 s。

实验结果如图 4 所示。



(a) 积分时间常数为 0.008 s 时并网过程直流侧电压波形



(b) 积分时间常数为 0.02 s 时并网过程直流侧电压波形

图4 T_{di} 对系统稳定性的影响

$T_{di} = 0.008$ s 时并网过程直流侧电压波形如图 4(a)所示,STATCOM 样机无法顺利启动,振荡发散过程大约维持 5 s,通过保护电路将 STATCOM 从电网中

移除。

$T_{di} = 0.02$ s 时并网过程直流侧电压波形如图 4(b) 所示; 而 $T_{di} = 0.05$ s 时, 并网过程直流侧电压波形如图 3(a) 所示。这两种情况 STATCOM 实验样机均可顺利启动并稳定运行。通过实验对比可知: 积分时间常数 T_{di} 会影响到级联多电平 STATCOM 的稳定性, 与稳定性分析结果相符。

4 结束语

在现有研究的基础上, 本研究并将电压检测中滤波环节考虑进去, 分析了级联多电平 STATCOM 直流侧电容电压的稳定性问题。基于能量平衡原理, 以单相级联型 STATCOM 为例, 进行了直流侧电压波动分析, 并建立了相应的能量平衡模型。采用 PI 闭环实现了直流侧电压均衡控制, 并利用劳思-赫尔维茨稳定判据进行了稳定性分析。从理论上阐述了积分时间常数 T_{di} 对系统稳定性的影响。最后, 设计了级联多电平 STATCOM 实验样机, 并通过相关实验验证了本文所述内容的可行性和有效性。

本研究所述级联多电平 STATCOM 稳定控制方法具有一定的参考意义, 可以满足一些特殊场合的应用要求。

参考文献(References):

- [1] 房金兰. 我国电力电容器技术的发展[J]. 电力电容器与无功补偿, 2010, 31(1): 1-8.
- [2] 许树楷, 陈名, 傅闯, 等. 南方电网 ±200Mvar 静止同步补偿装置系统调试[J]. 南方电网技术, 2012, 6(2): 21-25.
- [3] YANG XIANGZHEN, SU JIANHUI, DU YAN, et al. Research on master-slave control strategy of capacitor voltage for cascade STATCOM[C]. The Third International Conference on Deregulation and Reconstruction and Power Technologies. Nanjing, IEEE, 2008: 6-9.
- [4] QIANG SONG, WENHUA LIU. Multilevel optimal modulation and dynamic control strategies for STATCOMs using cascaded multilevel Inverters[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(3): 1937-1946.
- [5] 马伏军, 罗安, 曾灿林, 等. 基于快速等效电纳计算的静止无功补偿器复合控制方法[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 140-145.
- [6] 杨晓峰, 范文宝, 王晓鹏, 等. 基于模块组合多电平变换器的 STATCOM 及其控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(8): 7-13.
- [7] SIXING DU, JINJUN LIU, JILiang LIN, et al. Control strategy study of STATCOM based on cascaded PWM H-bridge converter with delta configuration [C]. 7th International Power Electronics and Motion Control Conference, Harbin, IEEE, 2012: 345-350.
- [8] 王轩, 林嘉扬, 滕乐天, 等. d-q-0 坐标系下链式 STATCOM 电流控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(15): 48-54.
- [9] HAGIWARA M, MAEDA R, AKAGI H. Negative-sequence reactive-power control by a PWM STATCOM based on a modular multilevel cascade converter (MMCC-SDBC)[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(2): 720-729.
- [10] DU S X, LIU J J, LIN J L. A novel DC voltage control method for STATCOM based on hybrid multilevel H-bridge converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(1): 101-111.
- [11] 王立峰, 郑建勇, 梅军, 等. 有源滤波装置直流侧电压控制瞬时能量平衡建模[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 229-242.
- [12] 耿俊成, 刘文华, 袁志昌. 链式 STATCOM 电容电压不平衡现象研究(一) 仿真和试验[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(16): 53-57, 86.
- [13] 耿俊成, 刘文华, 袁志昌. 链式 STATCOM 电容电压不平衡现象研究(二) 数学模型[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(17): 35-39.
- [14] 徐榕, 于泳, 杨荣峰, 等. H 桥级联 STATCOM 直流侧电容电压平衡控制方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 15-21.
- [15] LIU W H, ZHAO X H, SONG Q. Research on unbalance load compensation by cascaded STATCOM with star configuration[C]. 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Montreal, Canada: IEEE, 2012: 734-738.
- [16] 孙海. 单相 SVG 三次谐波电流产生及抑制研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(5): 1-5.
- [17] 刘钊, 刘邦银, 段善旭, 等. 系统电压不平衡下链式静止同步补偿器控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(9): 1-7.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

谢天才, 张玉娟, 张君泉, 等. 级联多电平 STATCOM 直流侧电容电压稳定性分析[J]. 机电工程, 2016, 33(8): 1016-1020.

XIE Tian-cai, ZHANG Yu-juan, ZHANG Jun-quan, et al. DC capacitor voltage stability analysis for cascade multilevel STATCOM[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016, 33(8): 1016-1020.