

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.03.003

改进的级联 STATCOM 直流侧均压控制策略

李圣清, 杨 潇

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 针对级联静止同步补偿器 (STATCOM) 直流侧各 H 桥模块因损耗差异易产生电压不平衡的问题, 在分层控制及能量交换思想的基础上, 提出一种改进的相间及相内均压控制策略。在全局稳压控制所得的调制波基础上, 通过在相间、相内均压控制时分别叠加一个与有功电流方向平行的误差分量, 使触发角微小相移, 从而使能量在各相、各 H 桥模块之间合理分配, 达到均衡相间及同相各 H 桥模块直流侧电压的目的。仿真结果表明, 所提方法可以有效均衡 STATCOM 直流侧相间、相内电压。

关键词: 级联静止同步补偿器; 直流侧电压; 均压控制

中图分类号: TM761⁺.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)03-0013-05

An Improved STATCOM DC Side Voltage Control Strategy

LI Shengqing, YANG Xiao

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of the flaw of voltage imbalance due to differences in loss exhibited by H bridge module on the DC side of the cascade static synchronous compensator (STATCOM), and based on the notion of hierarchical control and energy exchange, an improved interphase voltage equalization control strategy has thus been proposed. Based on the modulation wave obtained from the global voltage regulation control, an error component parallel to the direction of the active current has been superimposed, thus shifting the tiny angle of the trigger angle, which enables a reasonable allocation of the energy between each phase and each H bridge module, and thus achieving the purpose of balancing the DC side voltage of H bridge modules. The simulation results show that the control strategy can effectively balance the inter-phase and phase voltage on the DC side of STATCOM.

Keywords: cascade static synchronous compensator; DC side voltage; even pressure control

1 研究背景

级联静止同步补偿器 (static synchronous compensator, STATCOM) 作为柔性交流技术的核心装置, 能够动态、快速、大范围地调节无功, 在提高系统静态、暂态稳定性, 改善系统电能质量等方面起到了重

要作用^[1-2]。高压系统中, STATCOM 常采用级联结构, 且各级联 H 桥模块具有独立性, 彼此之间不存在能量交换。各模块直流侧的损耗差异累积后易产生电容电压不平衡问题, 从而导致输出电压波形畸变, 影响装置甚至系统的安全可靠运行^[3-6]。因此, 级联

收稿日期: 2018-04-03

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (2017JJ4024), 湖南省教育厅开放基金资助项目 (15kj036), 湖南省重点实验室基金资助项目 (2016TP1018)

作者简介: 李圣清 (1961-), 男, 湖南永兴人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事新能源发电与微电网技术方面的教学与研究, E-mail: 582775244@qq.com

STATCOM 直流侧电压平衡问题是研究此领域必须要解决的问题。

不少专家学者针对上述问题提出了相应的控制方法。杨波等^[7]以不同工作区间各模块电容电压大小为依据,选择相应导通角,通过调节电容充放电电量以使电压均衡。该方法对输出相电压波形影响较小,不改变开关频率等参数,但将其将1个周期分为4个区间,各区间分别选择最适合平衡电压的导通角,增加了算法的复杂程度,降低了系统容错性。李一丹等^[8]通过调节 STATCOM 输出电压与系统电压间的相位角调节电容充放电,以稳定电容电压。该方法控制变量较少,算法较为简单,但只解决了同相各 H 桥间的电压均衡问题,未考虑相间电压不平衡问题。刘桂英等^[9]通过分别调节正、负序电流控制全局电压及相间电压的平衡,并通过调节各 H 桥输出电压的幅值及其与输入电流的相位差来均衡相内电压。该方法虽然同时均衡了相间与相内电压,但其控制变量较多,且正序电流也会影响相间电压平衡,存在耦合性。姚钢等^[10]通过叠加有功电压矢量,在各 H 桥模块间按需分配有功功率,实现了电容电压的均衡。但该方法改变了调制比等参数,增大了装置输出电压谐波畸变率。

在上述各方法的启发下,本研究拟构建一个 STATCOM 数学模型,并分析各 H 桥能量交换与调节的原理,提出一种改进的相间及相内均压控制方法。该方法的算法简洁,物理意义明确,控制量不存在耦合,因而能有效解决级联 STATCOM 直流侧相间、相内的均压问题。

2 级联 STATCOM 的结构及数学模型

本研究采用星型连接的 n 级模块级联 STATCOM 主电路拓扑结构,如图 1 所示。

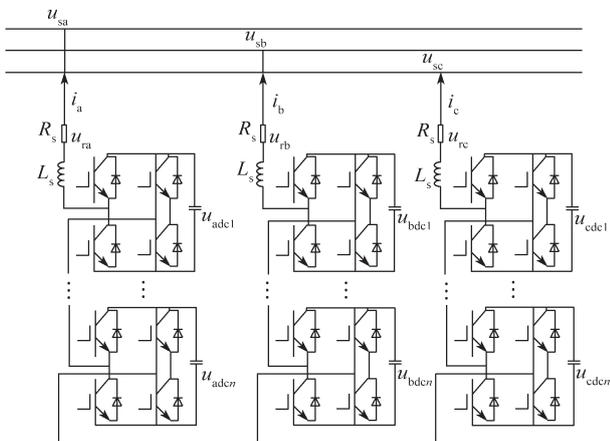


图 1 级联 STATCOM 主电路拓扑结构图

Fig. 1 Topology diagram of cascaded STATCOM main circuit

图 1 中, u_{sa} 、 u_{sb} 、 u_{sc} 分别为 STATCOM 输出电压, i_a 、 i_b 、 i_c 分别为 STATCOM 的补偿电流, u_{adci} 、 u_{bdci} 、 $u_{cdci}(i=1, 2, \dots, n)$ 分别为各 H 桥直流侧电压, L_s 和 R_s 分别为等效连接电抗器电感和并联损耗电阻。

由图 1 可得级联 H 桥 STATCOM 的三相线性数学模型如下^[11-12]:

$$\begin{cases} L_s \frac{di_a(t)}{dt} = u_{ra}(t) - u_{sa}(t) - R_s i_a(t), \\ L_s \frac{di_b(t)}{dt} = u_{rb}(t) - u_{sb}(t) - R_s i_b(t), \\ L_s \frac{di_c(t)}{dt} = u_{rc}(t) - u_{sc}(t) - R_s i_c(t). \end{cases} \quad (1)$$

将式 (1) 进行 dq 轴解耦后, 可得 dq 坐标系下的表达式为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & \omega \\ \omega & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_{rd} + u_{sd} \\ u_{rq} + u_{sq} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

式中: i_d 、 i_q 分别为 STATCOM 补偿电流的 d 、 q 轴分量, 即补偿电流的有功与无功分量; u_{rd} 、 u_{rq} 分别为 STATCOM 输出电压的 d 、 q 轴分量; u_{sd} 、 u_{sq} 分别为系统电压的 dq 轴分量; $\omega=2\pi f$ 为电网基波角频率。

从式 (2) 中可以看出, 有功与无功分量因电感 L_s 存在耦合, 故引入有功与无功电流的预期值 i_d^* 和 i_q^* 解除耦合^[9], i_d^* 与 i_q^* 可表示如下:

$$i_d^* = \left(K_{dp} + \frac{K_{di}}{s} \right) \cdot \Delta u_d, \quad (3)$$

$$i_q^* = \left(K_{qp} + \frac{K_{qi}}{s} \right) \cdot \Delta u_q. \quad (4)$$

式 (3) ~ (4) 中: K_{dp} 、 K_{di} 、 K_{qp} 、 K_{qi} 分别为 PI 控制器 d 轴及 q 轴的比例系数和积分系数; Δu_d 为直流侧电压变化量; Δu_q 为交流侧电压变化量。

将式 (3) 和 (4) 代入式 (2), 可得:

$$\begin{cases} u_{rd} = \left(K_p + \frac{K_{di}}{s} \right) (i_d^* - i_d) - \omega L_s i_q + u_{sd}, \\ u_{rq} = \left(K_p + \frac{K_{qi}}{s} \right) (i_q^* - i_q) + \omega L_s i_d + u_{sq}. \end{cases} \quad (5)$$

从式 (5) 可以得出 dq 轴下级联 STATCOM 的电流与电压关系, 通过控制有功电流分量即可控制装置输出电压。

3 级联 STATCOM 分层控制策略

3.1 直流侧全局稳压控制策略

级联 STATCOM 通过与系统交换有功功率稳定

真参数设置如表 1 所示。

表 1 级联 STATCOM 仿真系统主要参数
Table 1 Main parameters of cascade STATCOM simulation system

参数	取值	参数	取值
系统线电压 u_s/V	2 500	电网频率 f_s/Hz	50
链结直流侧电容 $C_{dc}/\mu F$	1 000	并网电感 L_s/mH	8
链结直流侧额定电压 u_{dc}/V	750	级联模块数 $N/\text{个}$	3

图 7 所示为缺少相间均压控制时, STATCOM 各相直流侧电压波形。

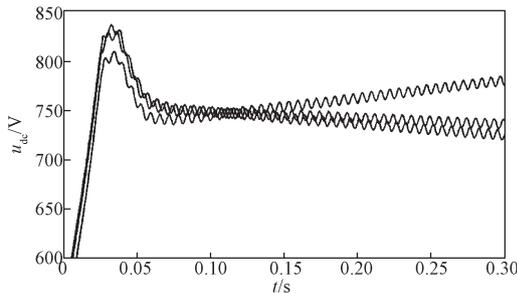


图 7 缺少相间均压控制的各相直流侧电压波形
Fig. 7 DC side voltage waveforms without the interphase pressure control

由图 7 可知, 直流侧整体电压稳定在 750 V 左右, 证明全局稳压控制是有效的。各相电压波形不存在多重波形, 这在一定程度上证明了相内均压控制是有效的。但各相直流侧电压大小存在明显差异, 说明各相损耗差异累积后确实会造成较大的相间电压误差。

图 8 为各级控制均投入后的各相直流侧电压波形。由图可知, 各相直流侧电压均稳定在 750 V, 证明了相间均压控制是有效可行且不可或缺的。

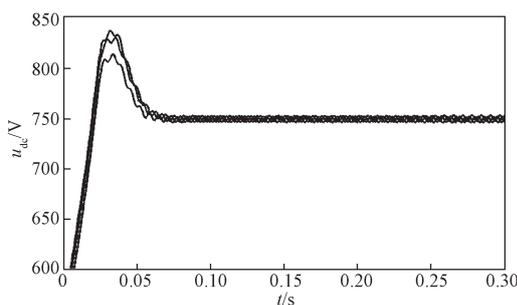


图 8 加入相间均压控制的各相直流侧电压波形
Fig. 8 Waveforms of the dc side voltage of each phase with the addition of the phase average voltage

为了进一步验证本文所提出相内均压控制的正确性及有效性, 对 B 相中 3 个 H 桥模块的直流侧电压进行了测试。图 9 为缺少相内均压控制时各 H 桥模块的直流侧电压波形。

由图 9 可以看出, 各 H 桥模块直流侧电压存在明显差异, 说明各 H 桥损耗差异累积后确实会造成较大的相内电压误差。

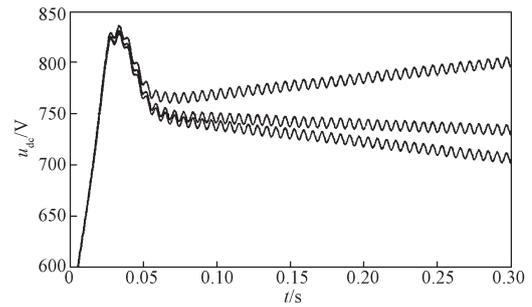


图 9 缺少相内均压控制各 H 桥直流侧电压波形
Fig. 9 Waveforms of the dc side of each H bridge without the phase average voltage

图 10 为各级控制均投入后各 H 桥模块的直流侧电压波形。由图可知, 各 H 桥模块的直流侧电压均稳定在 750 V, 证明了本文所提出的相内均压控制是有效可行且不可或缺的。

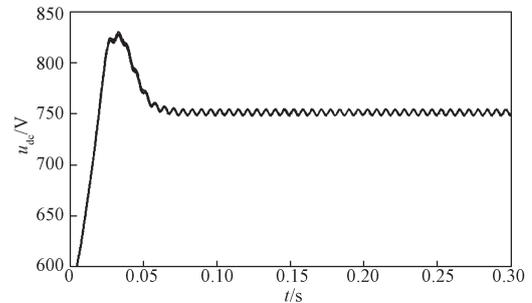


图 10 加入相内均压控制各 H 桥直流侧电压波形
Fig. 10 Waveform of the dc side of each H bridge with the addition of the phase average voltage

5 结论

本文通过分析 STATCOM 的数学模型以及各 H 桥能量交换与调节的原理, 提出一种改进的相间及相内均压控制策略。

1) 在原有调制波上叠加一个与有功电流方向平行的误差分量, 可使各级联模块触发角微小相移, 均衡了各相、各 H 桥模块之间的直流侧电压。

2) 该控制策略能够灵活、平滑地控制交、直流侧进行能量交换, 实现微小、精确调节。

3) 仿真结果验证了本文所提方法可以有效均衡 STATCOM 直流侧相间、相内电压。

但所提方法也存在一定的缺陷, 如误差分量的叠加运用了较多的控制模块, 这在一定程度上增加了系统的复杂性, 在调节速度上有待增强。

参考文献:

- [1] 赵波, 郭剑波, 周飞. 链式 STATCOM 相间直流

- 电压平衡控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 36-42.
- ZHAO Bo, GUO Jianbo, ZHOU Fei. DC Voltage Balance Control Strategy Among Phases for Cascaded STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32 (34): 36-42.
- [2] 陈晓菊, 王建华, 张抗, 等. 基于准PR控制的STATCOM直流电容电压平衡策略[J]. 电力电子技术, 2016, 50(3): 54-57.
- CHEN Xiaoju, WANG Jianhua, ZHANG Kang, et al. DC Capacitor Voltage Balance Strategy of Chain-Circuit Static Synchronous Compensator Based on Quasi-PR Controller[J]. Power Electronics, 2016, 50(3): 54-57.
- [3] 刘钊, 刘邦银, 段善旭, 等. 链式静止同步补偿器的直流电容电压平衡控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(30): 7-12.
- LIU Zhao, LIU Bangyin, DUAN Shanxu, et al. DC Capacitor Voltage Balancing Control for Cascade Multilevel STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(30): 7-12.
- [4] 史丽萍, 曹雪祥, 陈丽兵, 等. 改进的STATCOM相内直流电容电压平衡控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(2): 119-126.
- SHI Liping, CAO Xuexiang, CHEN Libing, et al. An Improved DC Capacitor Voltage Balance Control Strategy Among Phases for STATCOM[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2): 119-126.
- [5] 王宝安, 白晨阳, 陈豪, 等. 基于CPS-SVPWM调制的链式STATCOM直流侧电压控制策略[J]. 高压电器, 2015, 51(12): 168-173.
- WANG Bao'an, BAI Chenyang, CHEN Hao, et al. Cascaded-STATCOM DC Voltage Control Strategy Based on CPS-SVPWM Modulation[J]. High Voltage Electric Appliance, 2015, 51(12): 168-173.
- [6] 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): 15-22.
- XU Rong, YU Yong, YANG Rongfeng, et al. DC Capacitor Voltage Balance Control of H-Bridge Cascade STATCOM[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 15-22.
- [7] 杨波, 曾光, 钟彦儒, 等. 阶梯波调制法链式STATCOM直流电容电压平衡控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 280-287.
- YANG Bo, ZENG Guang, ZHONG Yanru, et al. DC Capacitor Voltage Balance Control Strategy of Cascade STATCOM Based on Step Wave Modulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 280-287.
- [8] 李一丹, 卢文生, 彭秀艳, 等. 级联型静止同步补偿器的直流电压检测及控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(3): 14-19.
- LI Yidan, LU Wensheng, PENG Xiuyan, et al. DC Voltage Measurement and Control for Cascaded STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(3): 14-19.
- [9] 刘桂英, 邓明锋, 粟时平, 等. H桥级联STATCOM直流侧电压控制新方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(10): 48-55.
- LIU Guiying, DENG Mingfeng, SU Shiping, et al. Novel DC Voltage Control Method of H Bridge Cascaded STATCOM[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(10): 48-55.
- [10] 姚钢, 方瑞丰, 李东东, 等. 链式静止同步补偿器的直流电容电压平衡控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 23-30.
- YAO Gang, FANG Ruifeng, LI Dongdong, et al. DC Capacitor Voltage Balancing Control of Cascaded Static Synchronous Compensator[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 23-30.
- [11] 李圣清, 徐文祥, 栗伟周, 等. 风电场中级联STATCOM直流侧电压控制方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 248-253.
- LI Shengqing, XU Wenxiang, LI Weizhou, et al. DC Capacitor Voltage Balancing Control for Cascade STATCOM in Wind Farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 248-253.
- [12] 孙毅超, 赵剑锋, 季振东, 等. 基于 $d-q$ 坐标系的单相链式STATCOM直流电压平衡控制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2500-2506.
- SUN Yichao, ZHAO Jianfeng, JI Zhendong, et al. A Balance Control Strategy of DC-Link Voltages for Single Phase Cascaded STATCOM Based on $d-q$ Coordinates[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2500-2506.

(责任编辑: 廖友媛)