

基于级联 H 桥换流器的 APF-STATCOM 的控制与调制

林志勇, 江道灼, 周月宾, 郭捷, 胡鹏飞, 梁一桥

(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 有源滤波器 (APF) 和静止同步补偿器 (STATCOM) 在电力系统应用中都是独立开来, 分别进行谐波抑制和无功补偿。将 APF 和 STATCOM 功能结合起来, 以级联 H 桥换流器构成 APF-STATCOM 装置, 同时实现无功补偿和谐波抑制。在分析级联 H 桥 APF-STATCOM 拓扑及其工作原理的基础上, 提出了一种简单有效的控制策略; 针对级联 H 桥换流器各子模块间的电容电压均衡问题, 采用最近电平逼近调制 (NLM) 并提出了一种适用于级联 H 桥换流器的电容电压均衡控制策略。利用 PSCAD/EMTDC 对 36 级联 H 桥 APF-STATCOM 进行了建模仿真, 结果验证了该控制策略和电容电压均衡控制策略的可行性和有效性, 并表明所提出的电容电压均衡策略能有效避免 H 桥模块 IGBT 不必要的频繁开关, 减少器件的开关频率。

关键词: 级联 H 桥 APF-STATCOM; 无功补偿; 谐波抑制; 最近电平调制; 电压均衡控制策略

Control and modulation for APF-STATCOM based on cascaded H-bridge converter

LIN Zhi-yong, JIANG Dao-zhuo, ZHOU Yue-bin, GUO Jie, HU Peng-fei, LIANG Yi-qiao

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Active power filter (APF) and static synchronous compensator (STATCOM) are indispensable elements in power system. APF can be used to suppress the harmonics, while STATCOM can be used to compensate reactive power. In this paper, the functions of APF and STATCOM are combined in a single unit by controlling a three-phase cascaded H-bridge converter, i.e. APF-STATCOM. This paper introduces topology and working principle of cascaded H-bridge APF-STATCOM and puts forward a control strategy. In order to balance DC capacitor voltages of cascaded H-bridge converter, balancing control strategy for cascaded H bridge converters based on nearest voltage level modulation (NLM) is proposed. 36 cascaded H-bridge APF-STATCOM model is set up in PSCAD/EMTDC. And by the simulation, the feasibility and effectiveness of control strategy and balance control strategy are verified. The proposed capacitor voltage balancing strategy can avoid unnecessary frequent switch of H bridge module IGBT.

Key words: cascaded H-bridge APF-STATCOM; reactive power compensation; harmonic suppression; nearest voltage level modulation (NLM); voltage balancing control strategy

中图分类号: TM76; TM714 文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)07-0091-06

0 引言

随着电力电子装置的广泛应用, 配电网中存在大量非线性负载, 大量的无功流动和谐波电流对电网造成较严重的冲击, 造成供电的污染和电能质量的恶化^[1]。因此目前广泛应用有源滤波器^[2-3](Active Power Filter, APF)滤除谐波和静止同步补偿器^[4-6](Static Synchronous Compensator, STATCOM)补偿无功电流。

目前 APF 和 STATCOM 在电力系统应用中都是独立开来, 如果将两者结合起来, 同时进行谐波抑制和无功补偿, 将有效降低成本及提高工作效率。文献[7]将 APF 和 STATCOM 结合起来, 对同时实

现无功补偿和谐波抑制进行了理论分析和试验验证。文献[8]对以四桥臂变换器构成的三相四线并联型 APF-STATCOM 装置同时实现谐波抑制、无功和负载不平衡补偿进行研究。本文将 APF 和 STATCOM 功能结合起来, 以级联 H 桥换流器构成 APF-STATCOM 装置, 同时实现无功补偿和谐波抑制, 并给出了一个切实可行的控制方案。

在级联 H 桥换流器中, 各模块直流侧电容互相独立, 且又存在混合型损耗差异、并联损耗差异以及脉冲延时等, 导致直流侧电容电压不平衡是级联 H 桥换流器需要解决的首要问题^[9-11]。目前对于直流侧电容电压平衡控制, 主要有两种思路: 通过外加硬件电路实现均压^[12]以及通过自身的平衡控制

算法^[13-14]来实现均压。引入外部硬件均压电路, 增加工程的成本和复杂性, 降低了系统的可靠性。利用自身的均压控制算法则不存在上述问题, 成本降低, 但控制相对复杂。本文结合 H 桥模块工作模式, 采用最近电平逼近调制 (Nearest Voltage Level Modulation, NLM), 提出了一种 H 桥子模块电容电压均衡策略, 能有效避免 H 桥模块 IGBT 不必要的频繁开关, 减少器件的开关频率。

1 电路拓扑与工作原理

1.1 主电路拓扑

图 1 所示为级联 H 桥 APF-STATCOM 的拓扑原理结构。\$u_{sa}\$、\$u_{sb}\$、\$u_{sc}\$ 和 \$i_{sa}\$、\$i_{sb}\$、\$i_{sc}\$ 为网侧三相输入电压和电流; \$u_{ca}\$、\$u_{cb}\$、\$u_{cc}\$ 为级联 H 桥换流器三相输出电压; \$Z_s\$ 为网侧等效电抗; \$L\$ 为连接电感; \$R\$ 为等效电阻; \$i_{ca}\$、\$i_{cb}\$、\$i_{cc}\$ 为级联 H 桥换流器补偿三相电流; \$i_{la}\$、\$i_{lb}\$、\$i_{lc}\$ 为非线性负载电流。图 1 中级联 H 桥换流器每相由 \$N\$ 个 H 桥子模块串联而成。H 桥子模块由一个四臂的换流桥和一个电容器构成, 每个桥臂又由一个自换相的 IGBT 开关和一个二极管反并联组成。正常工作时, 每个 H 桥子模块有三种工作模式: 正投入、负投入和切除 (旁路)。

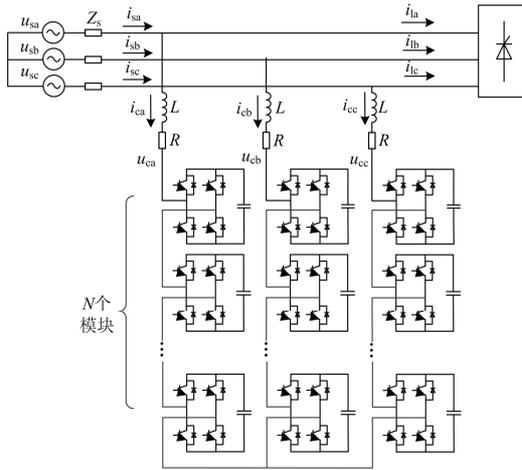


图 1 三相级联 H 桥 APF-STATCOM 主电路拓扑
Fig. 1 Main circuit configuration of three-phase cascaded H-bridge APF-STATCOM

1.2 工作原理

由图 1 所示电路得到电压电流方程, 如式 (1)。

$$\begin{cases} u_{sa} - u_{ca} = Ri_{ca} + L \frac{di_{ca}}{dt} \\ u_{sb} - u_{cb} = Ri_{cb} + L \frac{di_{cb}}{dt} \\ u_{sc} - u_{cc} = Ri_{cc} + L \frac{di_{cc}}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

当级联 H 桥 APF-STATCOM 仅用于补偿基波无功功率时, 对等式 (1) 施加 dq 坐标变换, 得到动态微分方程为

$$\begin{cases} \frac{di_{cd1}}{dt} = \frac{u_{sd} - u_{cd1}}{L} - \frac{R}{L} i_{cd1} + \omega i_{cq1} \\ \frac{di_{cq1}}{dt} = \frac{u_{sq} - u_{cq1}}{L} - \frac{R}{L} i_{cq1} - \omega i_{cd1} \end{cases} \quad (2)$$

式中: \$i_{cd1}\$ 和 \$i_{cq1}\$ 分别为级联 H 桥换流器的基波有功、无功电流; \$u_{sd}\$ 和 \$u_{sq}\$ 分别为系统电压的 dq 轴分量; \$u_{cd1}\$ 和 \$u_{cq1}\$ 分别为级联 H 桥换流器输出电压基波的 dq 轴分量。

从式 (2) 通过有功、无功电流交叉解耦控制可以得到 \$u_{cd1}\$ 和 \$u_{cq1}\$, 再经过 dq-abc 变换, 得到级联 H 桥换流器三相交流输出相电压的基波分量, 即调制波的基波分量。

当级联 H 桥 APF-STATCOM 仅考虑补偿负载谐波电流时, 系统的单相等效电路^[3]如图 2 左图所示, \$Z_{sh}\$ 为电网的等效谐波阻抗, \$Z_{ch}\$ 为补偿支路的等效谐波阻抗, \$i_{sh}\$、\$i_{ch}\$、\$i_{lh}\$ 为分别为电网电流、补偿支路电流和负载电流中的谐波分量。H 桥级联换流器输出电压控制为

$$u_{ch} = Ki_{sh} \quad (3)$$

其中, \$K\$ 为谐波补偿增益。

假设 H 桥级联换流器输出电压 \$u_{ch}\$ 能够无静差地跟踪指令, 则由图 2 左图可以得出

$$i_{sh} = \frac{Z_{ch}}{Z_{sh} + Z_{ch} + K} i_{lh} \quad (4)$$

由式 (4), 可以将图 2 左图等效为右图。这就相当于在电网侧串联了一个电阻 \$K\$, 控制 \$K\$ 可以抑制谐波电流。如果 \$K \gg |Z_{ch}|\$, 则滤波特性由 \$K\$ 决定, 电网电流谐波分量 \$i_{sh}\$ 趋向于 0, 谐波电流流入补偿支路中。

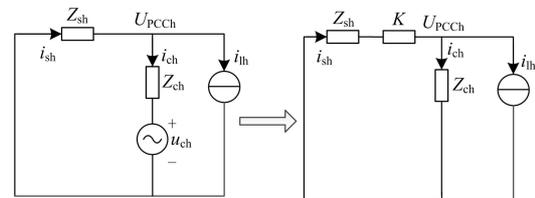


图 2 单相谐波等效电路图
Fig. 2 Single-phase equivalent circuit for harmonics

2 控制方案

图 3 所示为本文所提级联 H 桥 APF-STATCOM 装置的控制系统结构图。该控制系统有三个功能: 无功功率补偿控制、谐波抑制控制、级联 H 桥换流

器电容电压稳定控制。

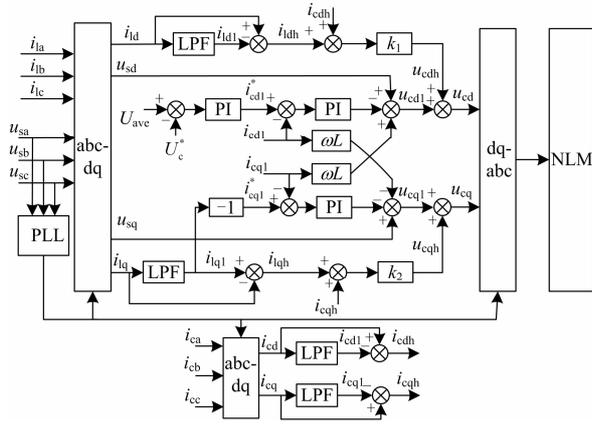


图 3 系统整体控制框图

Fig. 3 Block diagram of overall system control

3 级联 H 桥换流器的调制策略

3.1 级联 H 桥换流器的调制方法

应用于多电平换流器的调制方法主要有脉宽调制 (PWM) 和阶梯波调制两种。在大功率场合由于电平数较多, 谐波问题已经不再严重, 需要尽可能降低的是开关损耗, 故阶梯波调制具有较大优势。

本文采用基于阶梯波调制的最近电平调制 (NLM) [15-17], 图 4 为其调制流程图。图中: u_{ci_ref} 为正弦调制参考波电压值; U_c 为级联 H 桥子模块电容额定电压值; $NINT(x)$ 为取整函数; N_{on} 为换流器每相输出电平数, 并且 N_{on} 满足 $-N \leq N_{on} \leq N$ 。得到各相电平数指令 N_{on} 后, 根据检测到的各子模块电容电压和桥臂电流值, 应用电压均衡控制算法, 来确定子模块的投入与切除。

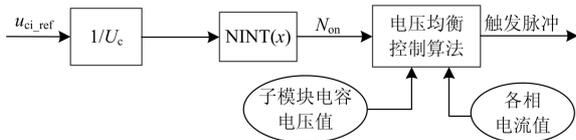


图 4 NLM 调制流程框图

Fig. 4 NLM modulation block diagram

3.2 H 桥子模块电容电压均衡策略

子模块电容电压是否均衡是影响级联 H 桥换流器运行的一个重要因素。本文提出一种新的基于 NLM 电容电压均衡控制策略, 相比 PWM 调制, 能有效减少器件的开关频率, 降低开关损耗。

同相各子模块之间的最大电压偏差定义为

$$\Delta U_{\max} = U_{c_max} - U_{c_min} \quad (5)$$

式中, U_{c_max} , U_{c_min} 分别为同一时刻, 同相各子模块电容电压的最大值和最小值。

本文设定同相子模块最大电压偏差的允许值为 ΔU_{\max_ref} 。当 $\Delta U_{\max} < \Delta U_{\max_ref}$ 时, 尽量避免不必要的开关动作, 当需要投入的子模块数增加时, 保持已投入的子模块不再进行切除操作; 当需要投入的子模块数减少时, 保持已切除的子模块不再进行投入。当 $\Delta U_{\max} > \Delta U_{\max_ref}$ 时, 应采取相应措施使得各子模块之间的电压偏差缩小。

根据 H 桥的工作特性, 当相电流 $i_{phase} > 0$ 时, 正投入的子模块电容充电, 负投入的子模块电容放电; 当 $i_{phase} < 0$ 时, 情况正好相反。当 $\Delta U_{\max} > \Delta U_{\max_ref}$ 时, 假设共有 N_A 对子模块电容电压偏差超过 ΔU_{\max_ref} 。可以将这些子模块按照相电流方向正投入或负投入, 电容电压大的放电、电压小的充电, 从而达到各子模块之间的电压偏差缩小的目的。由于正投入与负投入子模块均为 N_A , 不会影响换流器的输出电平数, 文章中将 N_A 称作互补系数。

因此本文提出的电容电压均衡控制策略具体如下: 首先接收上层控制器根据 NLM 方法得到的各相输出电平数指令 N_{on} , 若 $N_{on} = 0$, 则切除所有的子模块; 若 $N_{on} = N$ 或 $N_{on} = -N$ 时, 则正投入或负投入所有的子模块。如果, $0 < N_{on} < N$ 或 $-N < N_{on} < 0$ 时, 则要进一步判断。

当 $0 < N_{on} < N$, 电容电压均衡控制算法的具体实现流程如图 5 所示。首先接收电平数指令 N_{on} 、上一控制周期互补系数 N_{A_old} 。若 $\Delta U_{\max} > \Delta U_{\max_ref}$ 或 $|N_{on}| + 2N_{A_old} > N$, 先将 N_{A_old} 对正投入与负投入的子模块切除, 消除上一控制周期互补系数对这一控制周期投切子模块的影响。具体做法是: 先切除 N_{A_old} 个负投入的子模块, 若 $i_{phase} > 0$ 时, 切除 N_{A_old} 个正投入、电压最大的子模块; 若 $i_{phase} < 0$ 时, 切除 N_{A_old} 个正投入、电压最小的子模块。然后计算这一控制周期子模块电压偏差大于 ΔU_{\max_ref} 的互补系数 N_A 。当 $i_{phase} > 0$ 时, 正投入 N_A 个电压最小的子模块, 负投入 N_A 个电压最大的子模块; 当 $i_{phase} < 0$ 时, 正投入 N_A 个电压最大的子模块, 负投入 N_A 个电压最小的子模块。

然后计算正投入、负投入和切除子模块的个数分别为 N_+ 、 N_- 、 N_0 , 则有效电平数为 $N_+ - N_-$ 。将电平数指令 N_{on} 与有效电平数 $N_+ - N_-$ 作差, 得到电平数变化量 ΔN 。若 $\Delta N = 0$, 则都保持现有的触发脉冲不变。当 $\Delta N > 0$ 时, 若 $i_{phase} > 0$ 则在已切除的 N_0 个子模块中正投入 ΔN 个电容电压最小的子模块, 若 $i_{phase} < 0$ 则在已切除的 N_0 个子模块中正投入 ΔN 个电容电压最大的子模块; 当 $\Delta N < 0$ 时, 若 $i_{phase} > 0$ 则在 N_+ 个已正投入的子模块中切除 $-\Delta N$ 个电容电压最大的子模块, 若 $i_{phase} < 0$ 则在 N_+ 个已正投入的子模块中切除

$-\Delta N$ 个电容电压最小的子模块。

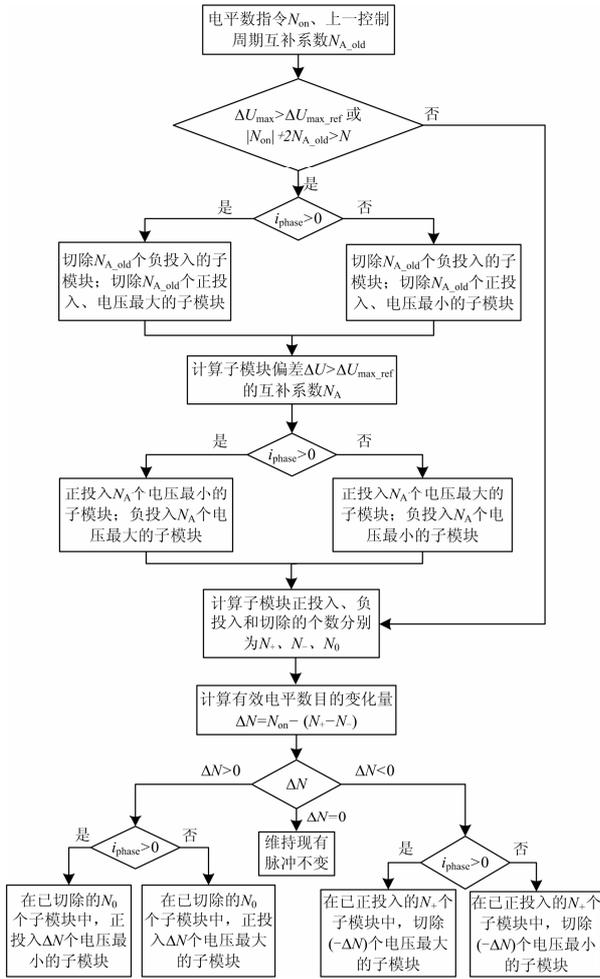


图 5 子模块电压均衡算法流程 ($0 < N_{on} < N$)
Fig. 5 Flow chart of voltage balancing control method ($0 < N_{on} < N$)

当 $-N < N_{on} < 0$, 情况与 $0 < N_{on} < N$ 类似, 但有几点不同: 第一是, 若 $\Delta U_{max} > \Delta U_{max_ref}$ 或 $|N_{on}| + 2N_{A_old} > N$, 消除上一控制周期互补系数 N_{A_old} 对投切子模块的影响的具体做法是: 切除 N_{A_old} 个正投入的子模块, 若 $i_{phase} > 0$ 时, 切除 N_{A_old} 个负投入、电压最小的子模块; 若 $i_{phase} < 0$ 时, 切除 N_{A_old} 个负投入、电压最大的子模块。第二是, 当 $\Delta N > 0$ 时, 若 $i_{phase} > 0$ 则在 N_+ 个已负投入的子模块中切除 ΔN 个电容电压最小的子模块, 若 $i_{phase} < 0$ 则在 N_+ 个已负投入的子模块中切除 ΔN 个电容电压最大的子模块; 当 $\Delta N < 0$ 时, 若 $i_{phase} > 0$ 则在 N_0 个已切除的子模块中负投入 $-\Delta N$ 个电容电压最大的子模块, 若 $i_{phase} < 0$ 则在 N_0 个已切除的子模块中负投入 $-\Delta N$ 个电容电压最小的子模块。

从上述均压算法可知, 每一个控制周期最后每相投入的子模块总数为 $|N_{on}| + 2N_A$, 而每相子模块总

数为 N , 则可以得到 N_A 的取值范围为

$$0 \leq N_A \leq \frac{N - |N_{on}|}{2} \quad (6)$$

4 仿真验证

利用 PSCAD/EMTDC 对三相 35 kV 系统, 36 级联 H 桥 APF-STATCOM 进行了建模仿真, 以验证其工作性能。仿真模型参数如下: 交流系统电压为 35 kV, 每相 H 桥子模块数 $N=36$, 子模块电容电压额定值 $U_c=0.9$ kV, 子模块电容为 15 000 μ F, 连接电感 $L=3$ mH, 等效电阻 $R=0.1$ Ω , 同相子模块最大电压偏差允许值 $\Delta U_{max_ref}=0.05$ kV。

图 6 所示为级联 H 桥 APF-STATCOM A 相电源电流、负载电流和补偿电流波形。负载电流波形为方波, 谐波含量较高, 为 20.51%; 经过级联 H 桥换流器滤波后电源电流已经基本为正弦波形, 谐波含量仅为 2.07%, 充分验证了本文控制策略及级联 H 桥 APF-STATCOM 滤波功能的有效性。

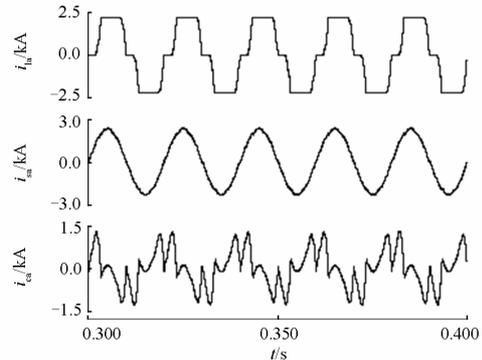


图 6 负载电流、电源电流、补偿电流仿真波形

Fig. 6 Waveforms of the load current, supply current and the compensation current

图 7 所示为级联 H 桥 APF-STATCOM 输出电压波形。可以看出输出电压波形是电平数较多的阶梯波形, 其形状基本接近正弦波, 其中的尖刺部分是由级联 H 桥换流器补偿无功的同时也滤除谐波电流造成的。

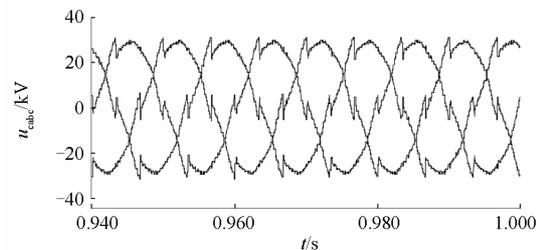


图 7 级联 H 桥 APF-STATCOM 输出电压波形

Fig. 7 Waveforms of APF-STATCOM output voltage

图 8 所示为级联 H 桥 APF-STATCOM 负载基波无功功率 Q_l 和级联 H 桥补偿无功 Q_c 波形图。在 0.3 s 时将负载消耗无功减半, 在 0.5 s 时恢复, 以观察级联 H 桥 APF-STATCOM 动态跟踪补偿无功功率的能力。从图中可以看出系统跟踪补偿基波无功能力良好, 动态响应快速。为此充分验证了控制方案的有效性和系统的无功功率补偿能力。

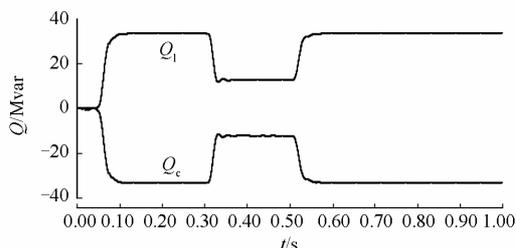


图 8 级联 H 桥 APF-STATCOM 无功响应

Fig. 8 APF-STATCOM reactive power response

图 9 所示为 A 相第一个 H 桥子模块触发脉冲波形。G=1、G=-1 和 G=0 分别表示子模块正投入、负投入和旁路。从图中可以看出触发信号有从 G=1 到 G=-1 及 G=-1 到 G=1 的变化, 说明电容电压均衡策略起到了作用。与 PWM 调制相比, 采用本文提出的基于 NLM 的电容均压策略明显降低了器件开关频率, 平均每个 IGBT 开关频率为 150 Hz 左右, 而一般采用 PWM 调制平均开关频率将达到 1 000~2 000 Hz。

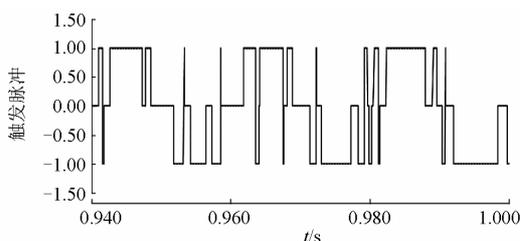


图 9 A 相第一个子模块触发脉冲

Fig. 9 The first sub-module firing pulses in phase A

图 10 所示为 A 相 36 个 H 桥子模块电容电压波形。可以看出采用本文所提出的电容电压均衡算法, 电容电压一致性能有所降低, 但是同一时刻子模块电容最大电压偏差基本保持在设定值 0.05 kV 内, 电容电压均在 0.9 kV 上下 +5% 范围内波动。证明本文提出的电容电压均衡控制策略能有效保证各子模块电容电压的均衡, 期间开关次数明显降低, 但是最大电压偏差设定值不宜过大, 会影响各子模块电容电压的均衡与一致性。

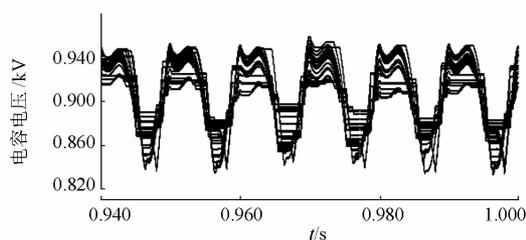


图 10 A 相子模块电容电压

Fig. 10 Sub-modules capacitor voltages of phase A

5 结论

1) 本文将 APF 和 STATCOM 结合起来, 以级联 H 桥换流器构成 APF-STATCOM 装置, 其同时具有谐波抑制和无功补偿的功能, 并提出了一种简单有效的控制方案。

2) 提出一种基于 NLM 调制的级联 H 桥换流器电容电压均衡控制策略, 应用于级联 H 桥 APF-STATCOM 中能够起到良好的平衡子模块电容电压作用, 并且可以通过改变最大电压偏差设定值改变器件的开关频率, 从而达到降低器件开关频率和损耗的目的。

3) 利用 PSCAD/EMTDC 对三相 35 kV 系统, 36 级联 H 桥 APF-STATCOM 进行了建模仿真, 结果验证了其拓扑和控制方案的可行性与电压均衡策略的有效性。

参考文献

- [1] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制与无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 328-385.
- [2] 陈国柱, 吕征宇, 钱照明. 有源电力滤波器的一般原理及应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 17-21.
CHEN Guo-zhu, Lü Zheng-yu, QIAN Zhao-ming. The general principle of active filter and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 17-21.
- [3] 乔鸣忠, 夏益辉, 梁京辉, 等. 基于重复-PI 的复合控制应用于并联有源滤波器研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 54-59.
QIAO Ming-zhong, XIA Yi-hui, LIANG Jing-hui, et al. Research on PI control based compound controller applying to shunt active filter[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 54-59.
- [4] 荣飞, 罗安, 范卿. 应用于不平衡系统的 STATCOM 电压控制新方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 138-143.
RONG Fei, LUO An, FAN Qing. A novel voltage control method applied in STATCOM under unbalanced system

- [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(3): 138-143.
- [5] 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.
YANG Xiao-feng, FAN Wen-bao, WANG Xiao-peng, et al. Static synchronous compensator based on modular multilevel converter based STATCOM and its control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(8): 7-13.
- [6] 郑建, 陈劲操. 混合级联逆变器在 STATCOM 中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(18): 57-73.
ZHENG Jian, CHEN Jin-cao. Study of STATCOM based on hybrid cascaded multilevel inverter[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(18): 57-73.
- [7] JIN Tao-tao, CHEN Xiao-fan, SMEDLEY K M. A new one-cycle controlled FACTS element with the function of STATCOM and active power filter[C] // Industrial Electronics Society, 2003. IECON'03, The 29th Annual Conference of the IEEE, 2003: 2634-2638.
- [8] 刘海波, 毛承雄, 陆继明, 等. 四桥臂三相四线制并联型 APF-STATCOM[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 12-17.
LIU Hai-bo, MAO Cheng-xiong, LIU Ji-ming, et al. Three-phase four-wire shunt APF-SATACOM using a four-leg converter[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16): 12-17.
- [9] 刘文华, 宋强, 滕乐天, 等. 基于链式逆变器的 50 MVA 静止同步补偿器的直流电压平衡控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 145-150.
LIU Wen-hua, SONG Qiang, TENG Le-tian, et al. Balancing control of DC voltage of 50 MVA STATCOM based on cascade multilevel inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 145-150.
- [10] 耿俊成, 刘文华, 袁志昌. 链式 STATCOM 电容电压不平衡现象研究: (一) 仿真和实验[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(16): 53-58.
GENG Jun-cheng, LIU Wen-hua, YUAN Zhi-chang. Research on the voltage unbalance of DC capacitors of cascaded STATCOM: part one simulation and experiments[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(16): 53-58.
- [11] 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.
GENG Jun-cheng, LIU Wen-hua, YUAN Zhi-chang. Research on the voltage unbalance of DC capacitors of cascaded STATCOM: part two mathematical model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(17): 35-39.
- [12] HANSON D J, WOODHOUSE M L, HORWILL C, et al. STATCOM: a new era of reactive compensation[J]. Power Engineering Journal, 2002, 16(3): 151-160.
- [13] LIANG Yi-qiao, NWANKPA C O. A new type of STATCOM based on cascading voltage-source inverters with phase-shifted unipolar SPWM[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1999, 35(5): 1118-1123.
- [14] 宫力, 康勇, 陈晶晶, 等. 链式 STATCOM 直流电容电压分布式控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 217-223.
GONG Li, KANG Yong, CHEN Jing-jing, et al. DC capacitor voltage distributed control system for cascaded multilevel STATCOM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 217-223.
- [15] 郭捷, 江道灼, 周月宾, 等. 交直流侧电流分别可控的模块化多电平换流器控制方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(7): 42-47.
GUO Jie, JIANG Dao-zhuo, ZHOU Yue-bin, et al. AC and DC current hybrid control strategy for modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(7): 42-47.
- [16] 丁冠军, 汤广福, 丁明, 等. 新型多电平 VSC 子模块电容参数与均压策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(30): 1-6.
DING Guan-jun, TANG Guang-fu, DING Ming, et al. Submodule capacitance parameter and voltage balancing scheme of a new multilevel VSC modular[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(30): 1-6.
- [17] 江道灼, 张振华. 三相 H 桥级联静止同步补偿器的控制策略[J]. 高电压技术, 2011, 37(8): 2024-2031.
JIANG Dao-zhuo, ZHANG Zhen-hua. Control scheme of three-phase H-bridge cascaded STATCOM[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(8): 2024-2031.

收稿日期: 2013-07-02; 修回日期: 2013-11-08

作者简介:

林志勇 (1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为直流输电与柔性交流输电; E-mail: linzhuyong@zju.edu.cn

江道灼 (1960-), 男, 教授, 主要研究方向为交直流电力系统运行与控制技术、电力电子在电力系统中的应用技术、电力系统现场智能测控技术;

周月宾 (1987-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为直流输电与柔性交流输电。