

基于复合控制的改进型级联 STATCOM 控制策略

赵学华, 史丽萍, 陈丽兵

(中国矿业大学信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 作为当前广泛应用的无功补偿装置, 静止同步补偿器(STATCOM)在进行无功补偿的同时, 还可以实现对谐波及不对称分量的补偿功能。STATCOM 进行多目标补偿时, 比例积分(Proportion-Integral, PI)控制难以实现对谐波及不对称分量的无静差控制。为此, 提出将一种改进型重复控制技术引入谐波及不对称分量的跟踪控制中, 建立了基于重复控制和 PI 控制的复合控制器的模型, 该控制器既可实现对直流信号的快速跟踪控制, 又能显著加快对交流信号的响应速度。针对特征谐波的选择性补偿, 采用 dq 坐标变换及递归傅立叶变换(DFT)相结合的电流检测方法。最后, 基于多 FPGA 控制架构搭建了基于 H 桥的级联 STATCOM 仿真与实验平台, 并通过仿真及实验来验证控制策略的合理性。

关键词: 静止同步补偿器; 谐波及不对称分量补偿; 重复控制; 电流检测; 多 FPGA 架构

A new current control strategy of cascaded STATCOM with composite control

ZHAO Xuehua, SHI Liping, CHEN Libing

(School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: As one of the widely used reactive compensation equipment, the static synchronous compensator (STATCOM) can simultaneously realize the compensation of reactive, harmonic and asymmetric currents. It is difficult to eliminate the steady-state error by using traditional PI controller when STATCOM needs to provide the compensation of harmonic and asymmetric currents. In order to solve these problems, the composite controller model composed of the repetitive and PI controllers is established, which not only fast tracks DC currents, but also significantly accelerates the response speed to AC current. To realize the selective harmonic compensation, a detection approach of reference harmonics based on the dq synchronous reference frame and DFT is proposed and applied to STATCOM. Moreover, based on the combined circuit topology with multi-field programmable gate array (FPGA), the simulation and experiment platform is employed to verify the feasibility and effectiveness of the control strategy.

This work is supported by the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (No. 20110095110014).

Key words: static synchronous compensator; harmonic and asymmetric currents compensation; repetitive control; reference current detection; multi-FPGA structure

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)17-0098-09

0 引言

静止同步补偿器(Static Synchronous Compensator, 简称 STATCOM, 又称 SVG)被广泛应用于电网中来实现动态无功调节及解决电压稳定性问题。目前企业中, 非线性、冲击性及不平衡负荷的使用日益增

多, 于是无功补偿、谐波治理及解决不平衡问题成为当前研究的热点, STATCOM 由其具备的突出性能而具有广阔的应用前景^[1-4]。

STATCOM 的补偿效果主要取决于其控制器的性能。调节装置根据对负载电流的实时检测与处理而得到的电流指令, 对其进行电流补偿的控制方法主要有两种: 间接电流控制和直接电流控制。间接电流控制具有简单、成熟的特点, 但其动态跟踪性能不佳, 而本文 STATCOM 要求具有无功补偿、消

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20110095110014)

除谐波以及补偿不平衡分量的能力, 所以必须实现快速响应, 因此本文采用直接电流控制。比例积分 (Proportion-Integral, PI) 控制是电流控制过程中应用最广泛的一种调节方法。STATCOM 只进行无功补偿时, 在 dq 坐标系下的电流指令为直流信号量, PI 控制器就能实现无静差跟踪控制。当 STATCOM 还需要进行谐波及不对称分量的综合补偿时, dq 坐标系中电流指令将变为交流周期信号, PI 控制效果变差。为此, 文献[5-6]提出利用多同步旋转坐标变换, 把指定次谐波全部变为直流量而实现 PI 控制, 但该方法必须在多个频率下进行坐标变换, 且需要多个 PI 控制器, 计算复杂, 不利于实际应用。另一种解决办法是使用具备同时补偿两种谐波功能的谐振控制器, 此时不需要电网电压前馈和交叉解耦环节, 但补偿谐波次数较多时同样需要较多的控制器, 控制仍较复杂^[7]。

针对 PI 控制无法消除稳态误差及重复控制存在响应速度问题, 本文提出了 STATCOM 的 PI 控制中叠加改进型重复控制技术的控制算法。改进型重复控制与 PI 控制串联构成的双闭环复合控制系统能够迅速跟踪直流信号, 而交流信号的响应延迟时间也只有传统重复控制的一半, 因此可以显著加快系统的动态响应速度。另外, 本文还提出了一种基于 dq 坐标变换及 DFT 相结合的电流检测方法, 可实现装置对谐波电流的选择性补偿, 提高了补偿的灵活性。

本文以 ± 3 Mvar 的中压 H 桥级联多电平 STATCOM 的研制为背景, 搭建了用来验证控制算法合理性的仿真与实验平台, 并通过分析其动态及静态性能来验证电流控制的响应特性。

1 级联 STATCOM 的结构及模型分析

1.1 STATCOM 主电路拓扑结构

图 1 为采用星形连接结构的级联 STATCOM 主电路结构。图中, v_{sa}, v_{sb}, v_{sc} 是系统侧三相电压; i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} 是系统侧三相电流; i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc} 为负荷三相对称电流; i_{ca}, i_{cb}, i_{cc} 是 STATCOM 三相输出电流; v_{ca}, v_{cb}, v_{cc} 是 STATCOM 三相输出电压。STATCOM 的每一相由多个 H 桥功率单元级联而成, 三相系统通过连接电抗并采用星形连接方式接入电网。

1.2 dq 坐标系下的 STATCOM 数学模型

假设三相电网平衡, 只考虑基波分量, 于是 A、B、C 三相在 abc 坐标系中等效简化模型为

$$L \frac{di_{cabc}(t)}{dt} = v_{sabc}(t) - v_{cabc}(t) - Ri_{cabc}(t) \quad (1)$$

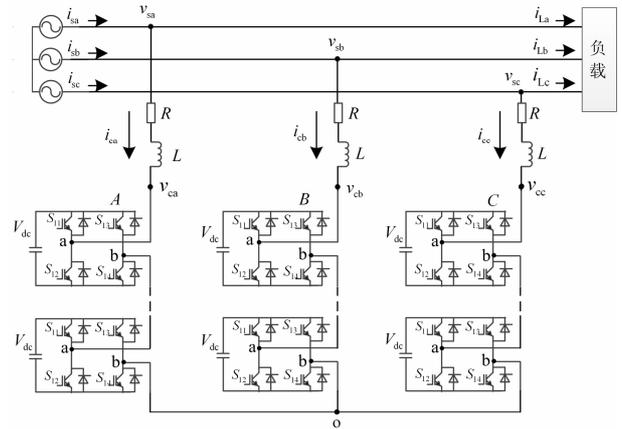


图 1 级联 STATCOM 主电路结构图

Fig. 1 Main circuit structure of cascaded STATCOM

$v_{sabc} = \langle v_{sa}, v_{sb}, v_{sc} \rangle$ 和 $v_{cabc} = \langle v_{ca}, v_{cb}, v_{cc} \rangle$ 分别表示电网电压和装置输出电压; $i_{cabc} = \langle i_{ca}, i_{cb}, i_{cc} \rangle$ 表示从电网流入的相电流; L 为等效电抗, R 为线路损耗等效电阻。三相三线制电路中, 有两相为独立变量, 只需对两相电流进行控制即可完成三相电流的控制。为此, 将式(1)变换到两相 dq 坐标系下, 可得:

$$\begin{cases} L \frac{di_{cd}}{dt} = v_{sd} - v_{cd} - Ri_{cd} + \omega Li_{cq} \\ L \frac{di_{cq}}{dt} = v_{sq} - v_{cq} - \omega Li_{cd} - Ri_{cq} \end{cases} \quad (2)$$

对式(2)进行拉氏变换得到:

$$Ls \begin{bmatrix} I_{cd}(s) \\ I_{cq}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{sd}(s) \\ V_{sq}(s) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{cd}(s) \\ V_{cq}(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -R & \omega L \\ -\omega L & -R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{cd}(s) \\ I_{cq}(s) \end{bmatrix} \quad (3)$$

由式(3)可得到 STATCOM 在 dq 坐标系下的数学模型如图 2 所示。

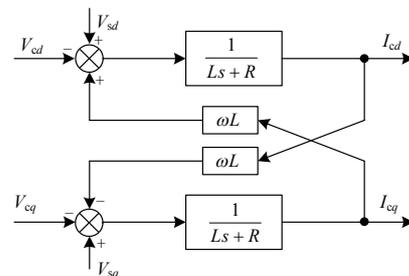


图 2 dq 坐标系下的 STATCOM 数学模型

Fig. 2 Mathematic model of STATCOM in dq coordinate

2 STATCOM 控制策略

2.1 基于 PI 控制的指令电流跟踪控制策略

三相三线制系统中, 负载电流不包括零序分量,

负载电流表示为

$$\begin{cases} i_{La} = \sum_{n=1}^{\infty} [I_{Ln+} \cos(n\omega t + \theta_{n+}) + I_{Ln-} \cos(n\omega t + \theta_{n-})] \\ i_{Lb} = \sum_{n=1}^{\infty} \left[I_{Ln+} \cos(n\omega t + \theta_{n+} - \frac{2\pi}{3}) + I_{Ln-} \cos(n\omega t + \theta_{n-} + \frac{2\pi}{3}) \right] \\ i_{Lc} = \sum_{n=1}^{\infty} \left[I_{Ln+} \cos(n\omega t + \theta_{n+} + \frac{2\pi}{3}) + I_{Ln-} \cos(n\omega t + \theta_{n-} - \frac{2\pi}{3}) \right] \end{cases} \quad (4)$$

式中, I_{Ln+} 、 I_{Ln-} 分别表示在 abc 坐标下第 n 次谐波的正、负序分量的幅值。三相负载电流经过旋转变换后, 得:

$$\begin{cases} i_{Ld} = \sqrt{\frac{3}{2}} \sum_{n=1}^{\infty} \{ I_{Ln+} \cos[(n-1)\omega t + \theta_{n+}] + I_{Ln-} \cos[(n+1)\omega t + \theta_{n-}] \} \\ i_{Lq} = \sqrt{\frac{3}{2}} \sum_{n=1}^{\infty} \{ I_{Ln+} \sin[(n-1)\omega t + \theta_{n+}] - I_{Ln-} \sin[(n+1)\omega t + \theta_{n-}] \} \end{cases} \quad (5)$$

可见, 变换后, 正序分量降低一阶次, 负序分量升高一阶次。因此, STATCOM 只补偿基波无功时, 包含基波正序分量的指令电流在 dq 坐标系下为直流量, PI 控制就可实现无静差跟踪。当考虑对谐波电流及不平衡分量进行补偿时, 指令电流含有交流分量。在三相三线制系统中, 正序分量主要包括 $6n+1$ 次特征谐波, 负序分量主要包括 $6n-1$ 次特征谐波。由式(5)可知, dq 变换使 abc 下的 $6n \pm 1$ 次特征谐波变为 $6n$ 次分量。另外, 在出现负载不平衡情况下, 还存在 dq 坐标系下的 2 次谐波的基波负序分量, 因此, STATCOM 进行多目标补偿时, 普通 PI 控制将无法实现很好地无静差跟踪补偿效果, 为此, 本文引入重复控制技术。

2.2 基于改进型复合控制的电流控制策略

2.2.1 基于重复控制的复合控制器设计

重复控制系统模型如图 3 所示。图中, $P(z)$ 为被控对象的传递函数; $Q(z)$ 将重复控制器从理想积分变为准积分; $C(z)$ 为重复控制补偿器^[8-9]。

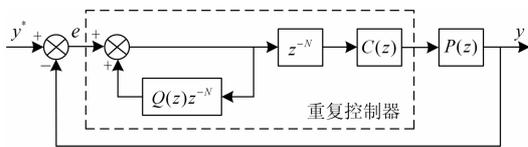


图 3 重复控制系统框图

Fig. 3 Block diagram of typical repetitive controller

重复控制具有较好的稳态跟踪控制性能, 但由于其内模调节后的输出控制量需要以基波周期的步长对反馈误差累加处理, 于是重复控制的动态响应时间会延迟一个基波周期^[9]。针对重复控制在负载指令电流发生变化时存在动态延迟的问题, 本文提出了以 PI 控制为内环, 重复控制为外环的控制器设

计。PI 控制和重复控制通过串联架构组成了双闭环复合控制系统, 其中, PI 控制具有较快的动态响应, 可以对变化的负荷指令电流实现快速跟踪控制, 而重复控制进一步对 PI 控制内环的跟踪误差进行调整, 进一步提高系统的控制性能。此时, 控制内环为外环建立了稳定的控制对象, 控制对象 $P(z)$ 为其开环传递函数。

2.2.2 基于改进型双闭环复合控制器的设计

由于跟踪的指令电流信号是在 dq 坐标系下实现的, 其指令误差的重复周期并不是电网的基波周期。通过前面分析可知, 进行多目标补偿时, 指令误差信号除了直流分量, 还应包括 2 次交流分量, 所以实际的误差指令的重复周期为电网基波周期的 1/2。于是, 本文在上述提出的双环控制器的基础上对延时环节 z^{-N} 进行改进, 实际变为 $z^{-N/2}$, 进一步加快了控制的动态响应, 其延迟时间变为普通控制的 1/2, 改进型双环控制框图如图 4 所示。

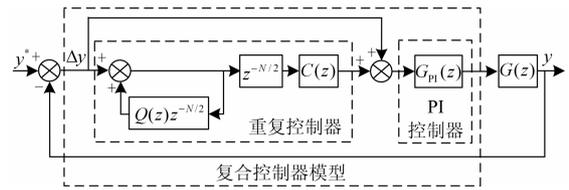


图 4 改进的双环控制器结构框图

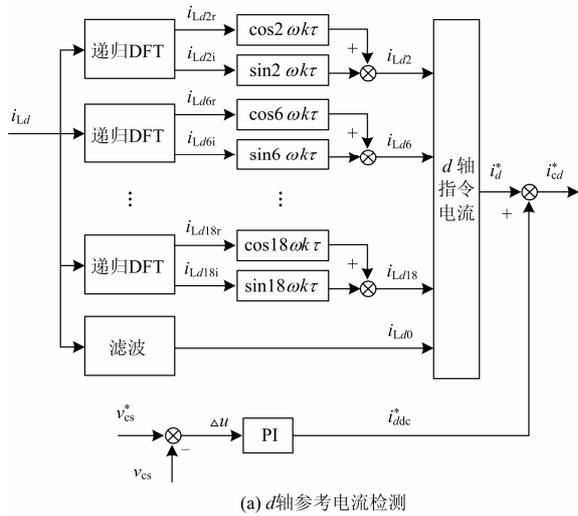
Fig. 4 Block diagram of improved dual-loop controller

2.3 补偿电流检测算法

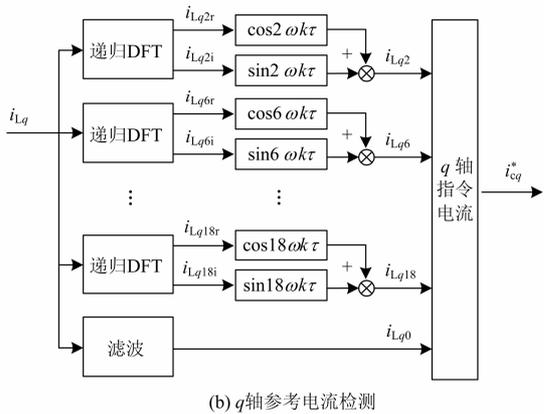
本文 STATCOM 进行无功补偿时, 同时要求具备灵活地消除特定次谐波及补偿不对称分量的能力。针对 STATCOM 有限的输出频带, 本文基于 dq 坐标变换及 DFT 相结合, 提出了一种对特定次谐波电流进行选择性的检测方法^[10-11]。如前所述, dq 坐标系下的指令电流除了直流分量外, 还包括 2 次及 $6n$ 次谐波, 利用这一特性, 可以在对负载电流进行 dq 变换后, 利用递归 DFT 算法对得到的 i_{Ld} , i_{Lq} 进一步运算, 得出 dq 坐标系下的 2 次及 $6n$ 次特征谐波, 即 abc 坐标系下 $6n \pm 1$ 次特征谐波及基波负序分量的指令电流^[12-15]。

补偿 abc 坐标下 20 次以内特征谐波的 dq 变换与递归 DFT 相结合的指令电流信号检测原理, 如图 5 所示。

图中, V_{cs}^* 为每一相电容电压的参考值, $V_{cs} = (\sum_{n=1}^8 V_{dcan} + \sum_{n=1}^8 V_{dcbn} + \sum_{n=1}^8 V_{dccn}) / 3$ 为每一相实时电容电压的平均值, i_{ddc}^* 为电压控制外环的输出, i_{Ldnr} 、 i_{Ldni} 与 i_{Lqnr} 、 i_{Lqni} 分别为 dq 坐标系下的 2 次



(a) d轴参考电流检测



(b) q轴参考电流检测

图 5 基于 dq 变换及 DFT 相结合的参考电流检测法Fig. 5 Reference current detection method based on dq transformation and DFT

及 $6n$ 次谐波分量的系数, i_{cd}^* , i_{cq}^* 为指令电流信号的参考值。由以上可以看出, 该策略能够实现特定次谐波的选择性提取, 从而可以实现特征谐波分量的选择性补偿。

2.4 基于采样点数固定的锁相环设计

上述算法要求采样周期与电网电压的基波正序分量的周期保持同步, 即必须保持每个基波周期内有固定的采样点数。针对实际电网频率有变化而偏离工频的情况, 可通过调整采样的周期来满足以上要求。同时, 重复控制是基于工频来设计的, 其内模发生器的周期与实际电网周期不相等时, 其控制能力将会下降。于是本文提出了基于采样点数固定的锁相环的设计, 该算法可根据电网基波周期对采样周期的实时调整, 同时保证重复控制的内模中采样点数保持固定, 起到改善本文重复控制器频率适应性的作用。

基于固定采样点数的锁相环的原理如图 6 所示。

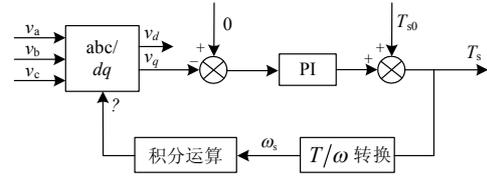


图 6 基于固定采样点数的锁相环

Fig. 6 PLL with fixed number of sampling points

首先通过查表法获得当前的 $\sin\omega t$ 和 $\cos\omega t$ 值, 在三相电压平衡时, 假如当前 ωt 和 a 相电网电压相位一致, 应满足 $v_q = 0$ 。本文通过 PI 控制器对误差信号运算后得到新的采样周期, 然后经过新的采样周期进行新的锁相运算, 最终通过调整采样周期使当前 ωt 和 a 相电网电压相位保持一致^[16-17]。

3 仿真实验

为验证控制策略的正确性, 利用 Matlab 仿真平台搭建了 6 kV STATCOM 仿真模型。仿真参数如表 1 所示。

表 1 系统仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数名称	数值
结构形式	星形级联方式
单元数量	8 个
单元电容容量	3 000 μF
电容电压参考值	750 V
连接电感值	6 mH
采样频率	10.8 kHz
开关频率	5.4 kHz
电抗器等效电阻	0.6 Ω

3.1 基于复合控制的仿真平台

由于电网中存在电压扰动以及电流耦合的影响, STATCOM 电流控制采用电网电压前馈和输出电流解耦控制。控制结构采用外环为电容电压控制环, 内环为电流控制环的双环控制策略, 控制原理框图如图 7 所示。

图 7 中 i_{cd}^* 为有功电流指令, i_{cq}^* 为无功电流指令。STATCOM 输出电流 i_{ca}, i_{cb}, i_{cc} 通过 abc 与 dq 变换可得到 i_{cd}, i_{cq} 信号, 分别为 STATCOM 实际有功及无功电流, 再分别与参考电流信号 i_{cd}^* 和 i_{cq}^* 比较, 经 PI 控制并进行前馈解耦就可得到 STATCOM 输出信号 v_{cd}^*, v_{cq}^* , 图中 v_{c0}^* 为稳定相间平衡注入零序分量, abc 与 dq0 变换后可得三相电压调制波为 $v_{ca}^*, v_{cb}^*, v_{cc}^*$, 最后经过同层载波层叠调制输出 PWM 波形, 完成电流补偿。

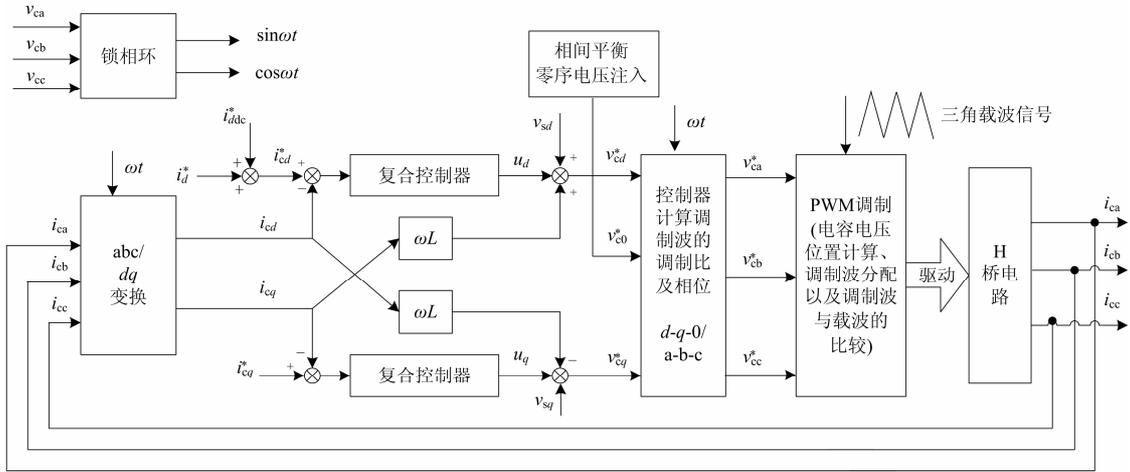


图 7 搭建的系统仿真原理图

Fig. 7 Control diagram of cascaded STATCOM

3.2 基于零序电流注入及单极性载波层叠调制的电容电压平衡控制环的设计

3.2.1 整体直流电压控制

对总直流侧电容电压平均值 v_{cs} 和指令电压值 v_{cs}^* 进行 PI 控制得到 d 轴有功分量 i_{ddc}^* ，与负载电流整体有功分量 i_d^* 共同组成 d 轴电流指令信号，其整体控制如图 8 所示。

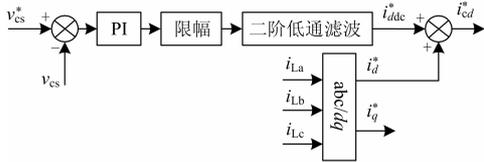


图 8 整体电容电压控制

Fig. 8 Block diagram of whole DC voltage control

3.2.2 基于零序注入法的相间直流侧平衡控制

图 9 为零序分量注入法的提取控制框图，在不影响整体有功的前提下，实现了链节间有功的交换，从而完成相间直流侧电压的平衡控制。本文结合 DFT 的方法，提取到的零序电流实部与虚部的差值通过 PI 及滤波得到零序电流注入需要的注入指令值，与 d 轴及 q 轴指令信号一起最终得到 STATCOM 输出信号。

3.2.3 基于单极性载波层叠调制的相内电压平衡

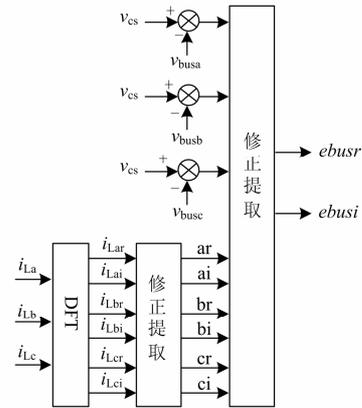
基于 H 桥能量自平衡原理如图 10 所示，当 u_c 与 i_s 同向时处于充电状态，而当 u_c 与 i_s 反向时处于充电状态。本文采用单极性载波层叠调制，于是充放电期间分配给 H 桥单元调制波不尽相同，所以电容之间的充放电时间或者状态各不相同，最终导致相内电压不平衡。因此，本文提出了根据电容电压值位置排序的方法来调整主控制器发出的不同调制波的分配次序来控制投入或者切除状态以及充放电时

间，从而使功率单元的电容电压最终趋于平衡的调制策略。在调制过程中，每个控制周期内根据电压的大小进行一次排序，调制波分配策略如图 11 所示。

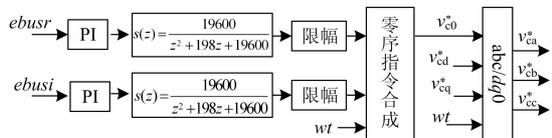
3.3 仿真过程

仿真过程：(1) 为验证对基波无功及谐波电流的补偿性能，0.5 s 之前负载电流为 100 A 感性无功，0.5 s 后，投入整流负载，此时，负载的无功为 110 A，其电流畸变率为 16.15%；(2) 为观察不对称分量的补偿效果，在 0.7 s 时，在 A、C 两相间接入一个电阻模拟不对称分量，其阻值为 100 Ω 。

PI 控制器的参数可通过零极点对消法，按典型 I 型系统设置，取 $k_p = 20$ ， $k_i = 2000$ 。本文采样频率为 10.8 kHz，所以重复控制器周期延迟系数 $N=216$ ，



(a) 零序注入分量的提取



(b) 零序注入分量的跟踪控制

图 9 相间电压控制

Fig. 9 Control diagram of zero sequence component

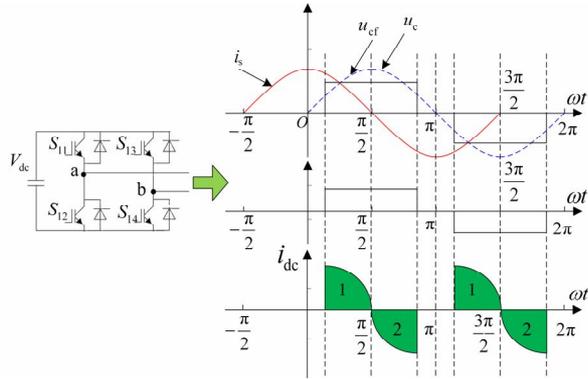


图 10 基于 H 桥能量平衡的充放电原理图

Fig. 10 Principle of charging and discharging of the capacitors

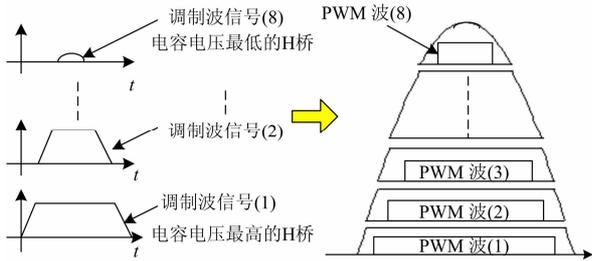


图 11 基于单极性载波调制的调制波分配策略原理图

Fig. 11 Principle of modulation allocation

$Q(z)$ 可以按低通滤波器设计, 但实际使用时, 一般直接取略小于 1 的常数, 于是 $Q(z)$ 取 0.96。 $C(z)$ 的设计首要考虑的是对高频信号的有效衰减, 实现时可直接使用二阶低通滤波器。另外, 为进一步提高系统的跟踪精度, 需要补偿闭环系统对低次谐波的相位滞后, 方法是在 $C(z)$ 中加入超前校正环节。综上所述, $C(z)$ 可设计如式(6)。

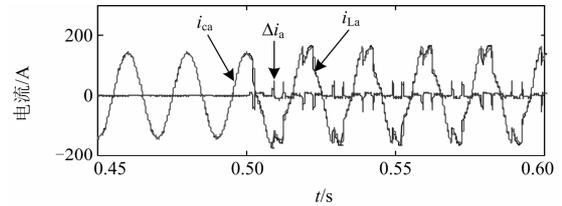
$$C(z) = k_r z^k S(z) \quad (6)$$

其中: $k_r = 0.5$, 相位超前拍数 $k = 4$ 。本文 STATCOM 要求具备 20 次以内谐波补偿能力, 所以二阶低通滤波器 $S(z)$ 的截止频率应满足不低于 20 次谐波频率。取截止频率为 2.2 kHz, 二阶低通滤波器传递函数为

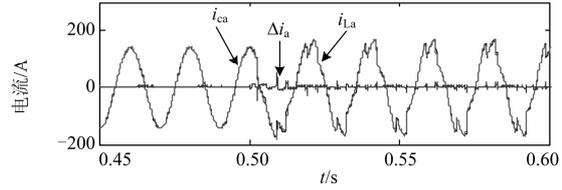
$$S(z) = \frac{0.2066z^2 + 0.4132z + 0.2066}{z^2 - 0.3695z + 0.1958} \quad (7)$$

为了比较 PI 控制与本文提出的复合控制的控制效果, 对两种控制方法分别进行了仿真, 以 A 相为例, 仿真波形如图 12~图 15 所示。

由图 12 可知, 0.5 s 之前, 只补偿无功时, 两种控制都具有较好的补偿效果, 其跟踪误差较小; 加入谐波后 PI 控制的跟踪误差明显增大, 而复合控制时, 在经过不到两个工频周期的动态调整后, 误差很小, 这说明本文提出的复合控制策略较好地解决了周期信号控制问题, 且具有较快的动态响应特性。



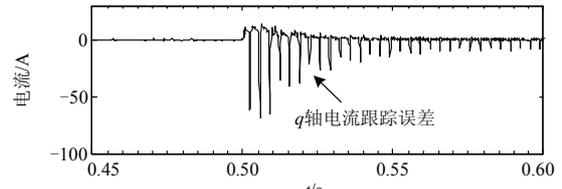
(a) 采用 PI 控制器时



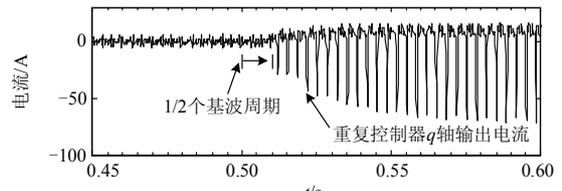
(b) 采用复合控制器时

图 12 装置指令电流、输出电流及跟踪误差

Fig. 12 Reference current, output current and tracking error



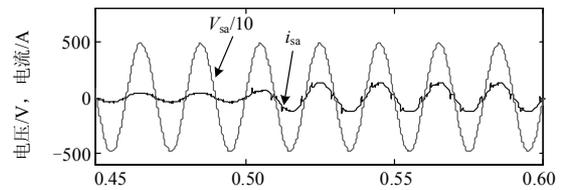
(a) q 轴指令电流跟踪误差



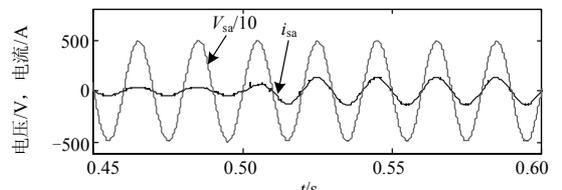
(b) q 轴重复控制器输出电流

图 13 q 轴电流跟踪误差及重复控制器输出信号

Fig. 13 Output current and tracking error of repetitive controller in q-axis



(a) 采用 PI 控制器时



(b) 采用复合控制器时

图 14 系统电流及系统电压

Fig. 14 System current and voltage

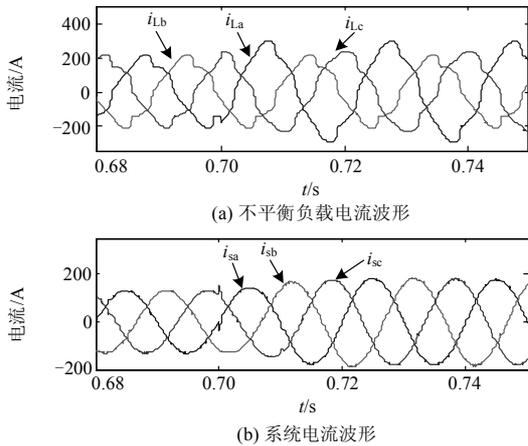


图 15 三相不平衡条件下负载及系统电流

Fig. 15 Three-phase currents of system and unbalance load

为了观察复合控制的控制效果，将 q 轴跟踪误差及重复控制器输出信号进行分析，波形如图 13 所示。0.5 s 以前，负载只有无功电流，PI 控制即可实现对其无静差跟踪控制，所以 q 轴电流跟踪误差非常小。在含有谐波负载投入后，此时 PI 控制无法实现对周期性信号的无静差控制， q 轴跟踪误差变大，重复控制器在经过约半个基波周期延时后， q 轴输出信号逐渐增大，而 q 轴电流跟踪误差则减小，重复控制器的输出稳定后系统进入稳定跟踪状态。

图 14 为系统电流及系统电压对照图，采用复合控制器时的电流波形明显比 PI 控制时好。通过其谐波成分分析可知 PI 控制时系统电流畸变率为 14.71%，而采用复合控制时电流畸变率仅为 2.25%，说明此时谐波补偿效果非常好。

图 15 为三相不平衡时的负载电流及系统电流的波形曲线。由结果看出，负载出现不平衡的情况下，系统三相系统有功电流保持了平衡，这说明对不平衡负载起到了很好的补偿作用。

4 实验验证

4.1 搭建实验平台

根据级联 STATCOM 的结构，搭建了基于多 FPGA 控制方式的实验平台，实验装置主要由一台启动柜、一台控制柜、多台功率柜及三相电抗器构成^[8]。

控制系统主要由主 FPGA 控制板、A/D 采样板、I/O 采样板、光纤接口板以及电源板等组成。核心控制器由现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)组成。主控制核心采用 Xilinx 公司的 FPGA 作为控制器，实现数据采样、算法控制(电流解耦控制、直流侧电压控制以及 IGBT 过流、过压等单元的保护)、人机交互等功能。功率柜中每

个功率模块上各有 1 片小容量 FPGA，实现对模块信号进行采样、滤波，将信号传给控制器的 FPGA，接收控制器 FPGA 发出的比较值，产生交错 PWM 信号。系统每相 8 级，共 24 个功率模块。

4.2 实验过程

实验过程如下：(1) 为验证基波无功及谐波电流的静态补偿性能，负载分别发出不含谐波的 120 A 无功电流和包含谐波成分的畸变电流；(2) 为进一步观察基波及谐波的动态补偿性能，负载发出含有谐波电流的 30~120 A 变化的感性无功。实验波形及结果分析如图 16 所示。

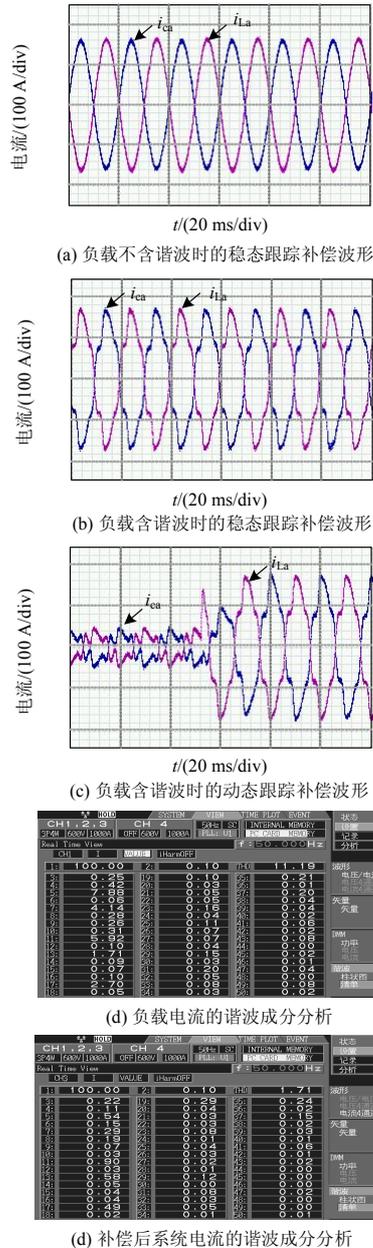


图 16 系统稳态、动态跟踪补偿波形及谐波电流成分分析

Fig. 16 Compensation performance and harmonic analysis

由图 16(a)~图 16(c)可见, 对于不含谐波的基波无功和存在电流畸变的负载, 系统都能够在稳态与动态过程中对负载发出的电流起到很好的跟踪补偿效果, 且具有较高的动态补偿精度。

含有谐波成分的负载电流及补偿后系统电流的谐波成分分析如图 16(d)、16(e)所示。由图可见, 负载电流除含一定的基波外, 还包含 5、7、11、13 等特征谐波, 其畸变率为 11.19%; 而补偿后的系统电流中含有很低的谐波分量, 其畸变率仅为 1.71%, 结果表明系统能够对负载电流起到很好的补偿效果, 同时也说明了本文提出控制策略的有效性。

5 结论

本文以级联 STATCOM 为研究对象, 对需要进行无功、谐波及不对称分量多目标补偿时的电流控制策略进行了研究。在采用 PI 控制与重复控制相结合的复合控制系统中, 较好地解决了负载变化以及周期性指令的跟踪控制问题, 实现了较快的动态响应, 提高了控制精度。针对进行选择性补偿特定次谐波问题, 提出一种 dq 坐标下实现递归 DFT 算法的检测方法。另外, 通过采用一种基于固定采样点数的软件锁相环, 既保证了上述 DFT 算法的准确性, 又提高了复合控制器的频率适应性。仿真及实验结果表明: 采用本文控制策略的 STATCOM 可实现较好的补偿效果, 同时具有很好的应用前景。

参考文献

- [1] SINGH B, SAHA R, CHANDRA A, et al. Static synchronous compensators (STATCOM): a review[J]. Power Electronics, IET, 2009, 2(4): 297-324.
- [2] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 123-126.
YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid-connected technology of inverter based on quasi synchronous principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 123-126.
- [3] 郭源博, 周鑫, 张晓华, 等. 电网不平衡条件下 STATCOM 的非线性控制[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(2): 50-55.
GUO Yuanbo, ZHOU Xin, ZHANG Xiaohua, et al. Nonlinear control of STATCOM under unbalanced condition[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(2): 50-55.
- [4] 毛彦辉, 夏明超, 李晓亮, 等. 负载不平衡下 D-STATCOM 控制策略的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 132-137.
- MAO Yanhui, XIA Mingchao, LI Xiaoliang, et al. Simulation study of the control strategy of D-STATCOM in compensating unbalance load[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 132-137.
- [5] 张树全, 戴珂, 谢斌, 等. 多同步旋转坐标系下指定次谐波电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(3): 55-62.
ZHANG Shuquan, DAI Ke, XIE Bin, et al. Selective harmonic current control based on multiple synchronous rotating coordinates[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(3): 55-62.
- [6] 王跃, 杨昆, 钟晓剑, 等. 基于多同步旋转坐标变换的并联型 APF 补偿策略[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(4): 705-710.
WANG Yue, YANG Kun, ZHONG Xiaojian, et al. Shunt APF control strategy on multiple synchronous rotating transform[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2013, 47(4): 705-710.
- [7] 年珩, 程鹏. 电网电压不平衡时 PWM 整流器的谐振直接功率控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 86-97.
NIAN Heng, CHENG Peng. Resonant based direct power control strategy for PWM rectifier under unbalanced grid voltage condition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11): 86-97.
- [8] GRINO R, CARDONER R, COSTA-CASTELLO R, et al. Digital repetitive control of a three-Phase four-wire shunt active filter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(3): 1495-1503.
- [9] 杨昆, 陈国柱. 基于重复控制的 DSTATCOM 补偿电流控制[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(10): 80-85.
YANG Kun, CHEN Guozhu. Compensation current control for D-STATCOM based on repetitive control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(10): 80-85.
- [10] 徐宁, 徐和义, 黄海宏. 三相级联多电平并联有源电力滤波器[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(3): 57-60.
XU Ning, XU Heyi, HUANG Haihong. Three-phase cascaded multi-level shunt active power filter[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(3): 57-60.
- [11] 梁寰宇, 苏建徽, 秦喆, 等. 基于 MMC 模块化多电平 STATCOM 的环流抑制均压控制策略研究[J]. 高压电器, 2014, 50(12): 60-65.

- LIANG Huangyu, SU Jianhui, QIN Zhe, et al. Circulating current suppression and capacitance voltage balancing strategy for modular multilevel converter based STATCOM[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(12): 60-65.
- [12] 朱劲松, 李磊. 基于模块化多电平换流器的 STATCOM 分析与控制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 113-116.
ZHU Jinsong, LI Lei. Analysis and control of STATCOM based on modular multilevel converters[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 113-116.
- [13] 孙驰, 魏光辉, 毕增军. 基于同步坐标变换的三相不对称系统的无功与谐波电流的检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 43-48.
SUN Chi, WEI Guanghui, BI Zengjun. Detection for reactive and harmonic currents of unbalanced three-phase systems based on synchronous reference frame transformation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 43-48.
- [14] 刘春喜, 马伟明, 孙池, 等. 大容量 400 Hz 逆变器输出 LC 滤波器设计和低次谐波抑制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(6): 129-135.
LIU Chunxi, MA Weiming, SUN Chi, et al. Design of output LC filter and low order harmonics suppression in high power 400 Hz inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(6): 129-135.
- [15] SOZAŃSKI K P. Sliding DFT control algorithm for three-phase active power filter[C] // Applied Power Electronics Conference and Exposition, Twenty-First Annual IEEE. Dallas TX, USA: IEEE, 2006: 1223-1229.
- [16] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-32.
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-32.
- [17] 霍现旭, 胡书举, 许洪华. 电网不平衡下基于自适应观察器的锁相环研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 120-124.
HUO Xianxu, HU Shuju, XU Honghua. Phase-locked loop algorithm based on adaptive observer under unbalanced grid voltage condition[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 120-124.
- [18] 唐艳波, 张敬, 李文峰. 一种基于 FPGA 的 6 kV 链式 STATCOM 控制器设计[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(5): 43-48.
TANG Yanbo, ZHANG Jing, LI Wenfeng. 6 kV cascade STATCOM controller design based on FPGA[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(5): 43-48.

收稿日期: 2014-11-19; 修回日期: 2015-03-24

作者简介:

赵兴华(1983-), 男, 博士研究生, 研究方向为无功补偿及谐波治理; E-mail: cumtzh2013@126.com

史丽萍(1964-), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为煤矿机电设备及自动化、无功补偿及谐波治理;

陈丽兵(1979-), 男, 博士研究生, 研究方向为无功补偿及谐波治理。

(编辑 葛艳娜)