

DOI: 10.7667/PSPC151127

结合空间矢量法的 D-STATCOM 滞环电流控制方法

常鲜戎, 殷绕方

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: D-STATCOM 的控制方法直接影响其补偿精度、开关频率和功率损耗。为保证 D-STATCOM 具有较高的补偿精度并降低开关频率, 提出了结合空间矢量法的滞环电流控制新方法。通过滞环电流控制法与空间矢量法结合, 将 D-STATCOM 跟踪误差进行分区域处理, 针对不同大小的跟踪误差采用不同的控制方法降低开关频率。同时, 考虑到采用不同控制方法时 D-STATCOM 具有不同的补偿延时, 对电流误差限值的确定方法进行了分析。仿真和试验样机表明, 该方法能有效降低 D-STATCOM 开关频率且具有较高的补偿精度, 证明了方法的正确性和可行性。
关键词: 配电网静止无功发生器; 三相四桥臂; 滞环电流控制; 空间矢量滞环控制; 开关频率

A hysteresis current control method combined with SVPWM for D-STATCOM

CHANG Xianrong, YIN Raofang

(School of Electric and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The control strategy of D-STATCOM directly influence its compensation accuracy, switch frequency and power loss. A novel control strategy is proposed to reduce the switch frequency on the assurance of its compensation accuracy. Combining hysteresis current control method with SVPWM, the control strategy proposes that different current size uses different control method to realize fast track and low switch frequency; at the same time, the determination of current error threshold method is analyzed considering different control strategy has different compensation delay for D-STATCOM. Simulation and experiment show this method can reduce switch frequency efficiently and high compensation accuracy, so the correctness and feasibility of the proposed method is proved.

Key words: D-STATCOM; three-phase-four leg; hysteresis current control; space-vector-based hysteresis control; switch frequency

0 引言

随着经济的发展和自动化设备的大量投入, 电能质量越来越受到广大电力用户的重视。不同用户对电能质量的要求不同, 定制电力技术向用户提供用户所要求的电能质量。D-STATCOM(配电网静止无功发生器)具有优异的补偿系统无功功率、滤除谐波和补偿系统不对称电流的能力, 能动态跟踪补偿指令电流, 是定制电力技术的重要研究内容。同时 D-STATCOM 也是建设智能电网、提高电力供应的可靠性和经济性、保证电能质量的重要设备。

由于 D-STATCOM 所使用的控制方法直接影响其补偿性能, 因此, 良好的控制策略是提高 D-STATCOM 的前提和关键。目前常用的控制方法有三角波比较法、空间矢量法和滞环电流控制法三种^[1-6]; 另外无差拍控制、模糊控制、自适应控制等

新型控制方法^[7-11]也有学者提出, 目前较少使用这类控制方法。三角波比较法具有输出开关频率固定、跟踪精度较低的特点; 空间矢量法的开关频率较低、但计算量大控制较为复杂; 滞环电流控制实现简单、控制精度高但开关频率不固定。

由于滞环电流控制具有对非线性系统优越的控制性能及较好的鲁棒性等优点, 在 D-STATCOM 等电力电子设备的电流跟踪控制中得到了广泛的应用。针对滞环电流控制开关频率不固定的缺陷, 主要的解决方法有以下几种: (1) 采用变环宽的方法, 通过对 D-STATCOM 系统进行电路等效, 并以此获得滞环环宽与开关频率的关系, 并根据这种关系来改变环宽, 从而限制开关频率^[12-14]; (2) 采用恒频或者准恒频的滞环电流控制, 通过定时滞环比较的方法来使开关频率固定^[15-16]; (3) 将滞环电流控制与空间矢量法结合, 利用空间矢量法的优点来降低开关

频率^[17]。本文详细分析了传统的滞环电流控制方法, 在此基础上提出三维电压空间矢量滞环电流控制方法, 为进一步减小开关频率, 提出针对不同大小的 D-STATCOM 电流跟踪误差采用不同的控制策略。通过仿真和试验验证该方法的有效性。

1 传统的滞环电流控制方法

D-STATCOM 补偿非线性负载的拓扑结构如图 1 所示。D-STATCOM 采用三相四桥臂结构。图中, $u_{si}(i=a, b, c)$ 为系统电源电压, $u_{ci}(i=a, b, c, n)$ 为 D-STATCOM 输出滤波电抗器端电压, $i_{si}(i=a, b, c, n)$ 为系统电流, $i_{ci}(i=a, b, c, n)$ 为补偿电流。D-STATCOM 通过霍尔元件对系统电压电流以及补偿电流进行测量并提供给 DSP 进行指令电流的计算。DSP 将计算出来的指令电流通过电流的跟踪控制形成 IGBT 的驱动信号。滞环电流跟踪控制将计算出的指令电流 i_c^* 与实际输出电流 i_c 相比较, 差值 Δi_c 作为输入信号, 通过滞环比较电路形成脉冲驱动信号。滞环电流控制的开关频率 f 与环宽的关系由式(1)给出。

$$f = \frac{u_{dc}^2 - u_s^2}{4hLu_{dc}} \quad (1)$$

其中: u_{dc} 为直流侧电容电压; h 为滞环宽度。

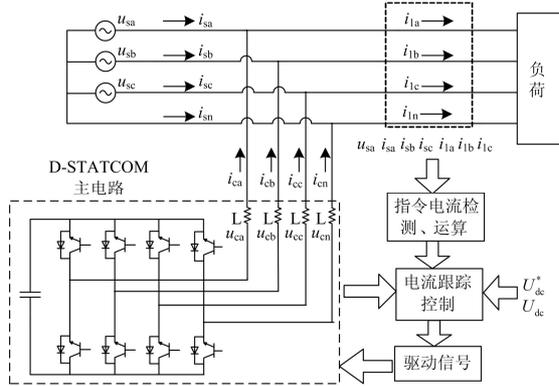


图 1 D-STATCOM 补偿系统结构

Fig. 1 Topology of D-STATCOM compensation system

可以看出, 滞环宽度大, 开关频率低, 但滞环宽度过大必然会导致跟踪误差过大, 达不到所需要的补偿效果。通常, 滞环宽度取负载峰值电流的 1%~10%。对于采用三相四桥臂结构的 D-STATCOM 来说, 每个桥臂都需要设置滞环电流比较器, 由于各相滞环比较器之间独立工作, 开关频率较大。

2 新型控制方法

2.1 基于三维电压空间矢量滞环电流控制方法

为保留滞环电流控制精度高的优点, 弱化开关

频率高的缺陷, 将空间矢量法与滞环电流控制结合, 分析基于三维电压空间矢量滞环电流控制方法。

为了方便分析, 将并联 D-STATCOM 的等效电路简化为图 2。用理想开关 (S_a, S_b, S_c, S_n) 等效 IGBT 并忽略电抗器的电阻则有:

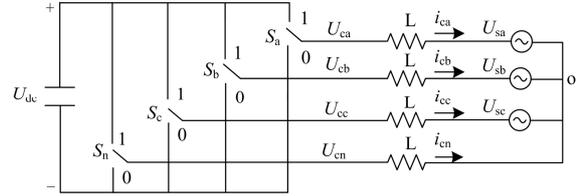


图 2 D-STATCOM 的等效电路

Fig. 2 Equivalent of D-STATCOM

$$S_i = \begin{cases} 1 & (i \text{ 相上桥臂导通}) \\ 0 & (i \text{ 相下桥臂导通}) \end{cases} \quad (i = a, b, c, n) \quad (2)$$

以系统中性点 O 为参考点, 有:

$$\begin{bmatrix} U_{can} \\ U_{cbn} \\ U_{ccn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{ca} - U_{cn} \\ U_{cb} - U_{cn} \\ U_{cc} - U_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L \frac{di_{ca}}{dt} + u_{sa} - L \frac{di_{cn}}{dt} \\ L \frac{di_{cb}}{dt} + u_{sb} - L \frac{di_{cn}}{dt} \\ L \frac{di_{cc}}{dt} + u_{sc} - L \frac{di_{cn}}{dt} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中式(3)中电压 U_{can} 、 U_{cbn} 、 U_{ccn} 可以由开关函数表示为

$$U_{cin} = (S_i - S_n)U_{dc} \quad (i = a, b, c) \quad (4)$$

将 U_{can} 、 U_{cbn} 、 U_{ccn} 经 $\alpha\beta\gamma$ 变换可得到 $\alpha\beta\gamma$ 复平面上的 U_α 、 U_β 、 U_γ :

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \\ U_\gamma \end{bmatrix} = C_{33} \begin{bmatrix} U_{can} \\ U_{cbn} \\ U_{ccn} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} S_a - (1/2)S_b - (1/2)S_c \\ (\sqrt{3}/2)S_b - (\sqrt{3}/2)S_c \\ (1/2)(S_a + S_b + S_c) - (3/2)S_n \end{bmatrix} U_{dc}$$

$$\text{其中, } C_{33} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix}$$

由于四桥臂主电路共有 $2^4=16$ 种开关状态, 将 16 种不同的开关模式带入式(5), 可以得到不同开关模式下 $\alpha\beta\gamma$ 复平面的 D-STATCOM 输出端电压 U_α 、 U_β 、 U_γ , $U_k(k=0\sim 15)$ 为与开关状态 $S_{abcn}(0000\sim 1111)$ 对应的电压空间矢量, 并满足:

$$U_k = iU_\alpha + jU_\beta + kU_\gamma \quad (6)$$

$U_k(k=0\sim 15)$ 的 16 种开关模式所对应的电压空间矢量 $U_0\sim U_{15}$ 形成 $\alpha\beta\gamma$ 复平面 1 个空间正六棱柱, 其中 U_0 、 U_{15} 位于整个区域的中心, $U_1\sim U_{14}$ 位于空间正六棱柱的 6 个正三棱柱区域。每个正三棱柱区域

包含 8 个电压空间矢量, 并且都含电压矢量 U_0 、 U_1 、 U_{14} 和 U_{15} , 如图 3 所示。

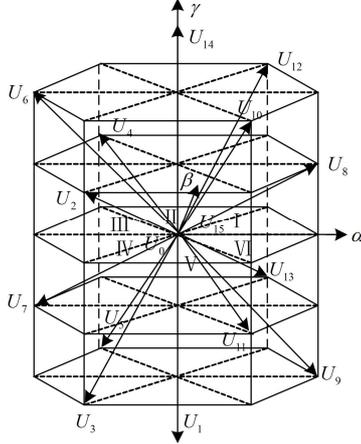


图 3 $\alpha\beta\gamma$ 复平面三维电压空间矢量图

Fig. 3 Three dimensional voltage space vector diagram in $\alpha\beta\gamma$ complex plane

由于 D-STATCOM 输出补偿电流满足:

$$i_{ca} + i_{cb} + i_{cc} + i_{cn} = 0 \quad (7)$$

将式(3)经过矩阵 C_{33} 变换, 并结合式(7), 可得:

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \\ U_\gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & 4L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_\alpha}{dt} \\ \frac{di_\beta}{dt} \\ \frac{di_\gamma}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \\ u_{s\gamma} \end{bmatrix} \quad (8)$$

并将式(8)写成矢量方程:

$$U_{\alpha\beta\gamma} = L \frac{di_{\alpha\beta\gamma}}{dt} + u_s \quad (9)$$

设 $i_{\alpha\beta\gamma}^*$ 是由 D-STATCOM 检测运算并经过矩阵 C_{33} 变换得到的 $\alpha\beta\gamma$ 复平面的补偿指令电流矢量, $U_{\alpha\beta\gamma}^*$ 是与指令电流矢量 $i_{\alpha\beta\gamma}^*$ 对应的 $\alpha\beta\gamma$ 复平面下的 D-STATCOM 输出端指令电压矢量, 满足:

$$U_{\alpha\beta\gamma}^* = L \frac{di_{\alpha\beta\gamma}^*}{dt} + u_s \quad (10)$$

用式(10)减去式(9)可得:

$$U_{\alpha\beta\gamma}^* - U_{\alpha\beta\gamma} = L \frac{d\Delta i_{\alpha\beta\gamma}}{dt} \quad (11)$$

式(11)可以看出电流误差矢量 $\Delta i_{\alpha\beta\gamma}$ 变化率的大小由指令电压矢量和 D-STATCOM 实际输出端电压矢量的差值所决定。在运算出指令电流以后, 通过式(10)可以算出同一时刻的指令电压矢量 $U_{\alpha\beta\gamma}^*$ 。再结合同一时刻的补偿误差电流, 确定出合适的 D-STATCOM 输出电压矢量 $U_{\alpha\beta\gamma}$, 使输出补偿电流

的跟踪误差尽可能小。对于指令电压矢量 $U_{\alpha\beta\gamma}^*$ 所在正三棱柱区域的判断, 只需考虑每个电压矢量的 α 、 β 分量, 见表 1。

表 1 $U_{\alpha\beta\gamma}^*$ 区域判定表

Table 1 $U_{\alpha\beta\gamma}^*$ regional decision table

$U_{\alpha\beta\gamma}^*$ 的判定条件	$U_{\alpha\beta\gamma}^*$ 所在三棱柱区域
$U_\beta > 0$ $U_\beta > \sqrt{3} U_\alpha $	II
$U_\beta > 0$ $U_\beta \leq \sqrt{3} U_\alpha $ $U_\alpha > 0$	I
$U_\beta > 0$ $U_\beta \leq \sqrt{3} U_\alpha $ $U_\alpha \leq 0$	III
$U_\beta \leq 0$ $U_\beta < -\sqrt{3} U_\alpha $	V
$U_\beta \leq 0$ $U_\beta \geq -\sqrt{3} U_\alpha $ $U_\alpha > 0$	VI
$U_\beta \leq 0$ $U_\beta \geq -\sqrt{3} U_\alpha $ $U_\alpha \leq 0$	IV

在判断出指令电压矢量 $U_{\alpha\beta\gamma}^*$ 所在三棱柱区域后, 将电流误差矢量 Δi_{abcn} 的四组分量分别通过一个滞环比较器, 得到一组状态比较值 (A_a 、 A_b 、 A_c 、 A_n)。其中 Δi_{abcn} 可表示为式(12)。

$$\Delta i_{abcn} = \begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \\ i_{cn}^* \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \\ i_{cn} \end{bmatrix} \quad (12)$$

设定滞环比较器上限阈值和下限阈值分别为 h_1 和 $-h_1$ ($h_1 > 0$), 且满足:

$$A_i = \begin{cases} 1 & \Delta i_{ci} > h_1 \\ 0 & \Delta i_{ci} < -h_1 \end{cases} \quad (i = a, b, c, n) \quad (13)$$

结合此刻 (A_a 、 A_b 、 A_c 、 A_n) 的状态值以及 $U_{\alpha\beta\gamma}^*$ 所在三棱柱区域, 可以选择合适的电压空间矢量 U_k , 进而确定在该时刻主电路的开关模式 (S_a 、 S_b 、 S_c 、 S_n)。假如此刻 $U_{\alpha\beta\gamma}^*$ 在三棱柱 I 区域, (A_a 、 A_b 、 A_c 、 A_n) 的状态值为 (1、0、0、0), 那么此刻应该选择电压空间矢量 U_8 ; 如果此刻 (A_a 、 A_b 、 A_c 、 A_n) 的状态值在 I 区域没有与之对应的电压矢量, 则选择输出零电压矢量 U_0 或 U_{15} 。整个基于三维电压空间矢量的滞环电流控制的流程如图 4 所示。

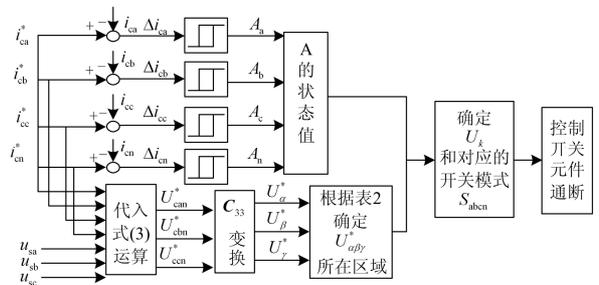


图 4 基于三维电压空间矢量滞环电流控制的流程图

Fig. 4 Hysteresis current control flowchart based on three dimensions voltage space vector

表 2 给出了在确定 $U_{\alpha\beta\gamma}^*$ 所在的三棱柱区间以及 (A_a 、 A_b 、 A_c 、 A_n) 的状态值时对应输出的电压空间矢量 $U_k(k=0\sim 15)$ 的选择表。

表 2 U_k 的选择表Table 2 U_k selection table

$U_{\alpha\beta\gamma}^*$ 区间	A 状态值	U_k	$U_{\alpha\beta\gamma}^*$ 区间	A 状态值	U_k
不考虑	(0,0,0,1)	U_1	不考虑	(1,0,0,0)	U_{14}
	(1,0,0,0)	U_8		(0,1,1,0)	U_6
	(1,1,0,0)	U_{12}		(0,0,1,0)	U_2
I	(1,0,0,1)	U_9	IV	(0,1,1,1)	U_7
	(1,1,0,1)	U_{13}		(0,0,1,1)	U_3
	其他	U_0 或 U_{15}		其他	U_0 或 U_{15}
	(1,1,0,0)	U_{12}		(0,0,1,0)	U_2
	(0,1,0,0)	U_4		(1,0,1,0)	U_{10}
II	(1,1,0,1)	U_{13}	V	(0,0,1,1)	U_3
	(0,1,0,1)	U_5		(1,0,1,1)	U_{11}
	其他	U_0 或 U_{15}		其他	U_0 或 U_{15}
	(0,1,0,0)	U_4		(1,0,1,0)	U_{10}
	(0,1,1,0)	U_6		(1,0,0,0)	U_8
III	(0,1,0,1)	U_5	VI	(1,0,1,1)	U_{11}
	(0,1,1,1)	U_7		(1,0,0,1)	U_9
	其他	U_0 或 U_{15}		其他	U_0 或 U_{15}

2.2 电流分区域控制方法

由上分析可知, 由于滞环电流控制方法采用的各相滞环控制器相互独立, 没有考虑相间影响, 导致开关频率较高; 基于三维电压空间矢量滞环电流控制通过系统分配零序电压矢量, 能有效地降低开关频率。因此, 滞环电流跟踪控制方法具有控制精度高, 响应速度快, 程序开销小但开关频率较高, 损耗大的特点; 而基于三维电压空间矢量滞环电流控制计算较多, 程序开销大但具有较低的开关频率。为进一步降低开关频率并结合两种控制方法的优点, 可以针对不同大小的电流跟踪误差采用不同的控制策略的方法。

具体做法如下: 设容许的跟踪误差为 $|\epsilon|$, 将计算出的指令电流与输出电流差 Δi_c 分为三个区域: (1) Δi_c 处于滞环之外(即 $|\Delta i_c| > h$); (2) Δi_c 处于滞环内但大于容许的跟踪误差(即 $|\epsilon| < |\Delta i_c| < h$); (3) Δi_c 处于滞环内且小于容许的跟踪误差(即 $|\epsilon| > |\Delta i_c|$)。算出指令电流与输出电流差 Δi_c 之后, 先判断 Δi_c 所在的区域, 根据 Δi_c 所在的区域不同选择不同的控制方法: 当 Δi_c 处于区域(1)时, 跟踪误差较大, 采用滞环电流控制方法迅速减小输出电流误差; 当 Δi_c 处于区域(2)时, 跟踪误差相对较小, 采用三维电压空间矢量滞环电流控制方法, 在减小输出电流误差的同时减小开关

频率; 当 Δi_c 处于区域(3)时, 由于跟踪误差很小, 为了降低开关频率, 应保持开关状态不变。控制流程图如图 5 所示。

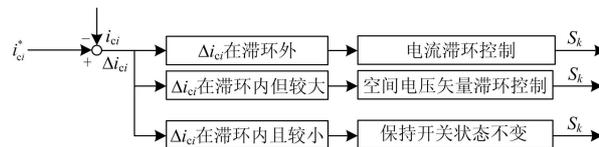


图 5 电流分区域控制流程图

Fig. 5 New control strategy control flowchart

2.3 考虑补偿延时电流误差限值的确定

由于电流传感器、AD 采样、指令电流计算、驱动控制以及开关信号的开关动作延迟的影响, 电流控制策略可能产生错误的驱动脉冲信号致使输出电流不能实时跟踪指令电流。因此, 在确定电流误差限值时需要考虑补偿延时的影响。为方便分析, 这里将用滞环电流控制时的补偿延时记为 t_{dhcc} , 用空间矢量滞环电流控制时产生的补偿延时记为 t_{dsvpwm} 。在 ccs 编程软件中, 可以通过断点设置和 Clock 工具获得 t_{dhcc} 和 t_{dsvpwm} 。

图 6 表示电流误差随时间的变化关系。为方便分析, 选取电流误差 $\Delta i_c < 0$ 的部分进行分析。由图可以看出, 最优的电流跟踪误差应处于 $-\epsilon \sim 0$ 之间(即(1)区), 此时电流跟踪误差很小, 只需保持开关状态不变; 但是由于没有对开关状态进行更新, 随时间推移, 电流跟踪误差必然会进入 $-h \sim -\epsilon$ 的区域((2)区), 实际上(1)区域是一个不稳定的区域。

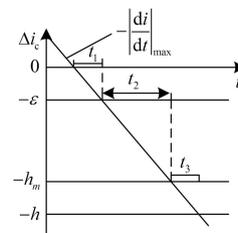


图 6 电流误差与时间关系

Fig. 6 Current error and time relationship

当电流误差处于(2)区域时, 采用基于空间矢量的滞环电流比较法减小电流跟踪误差。但是, 当 Δi_c 接近 $-h$ 时, 由于 t_{dsvpwm} 相对比较大, 这时会由于补偿延时导致跟踪误差电流越过 $-h$ 进入(3)区, 导致电流误差过大。为了防止这种情况, 可以在 $-h$ 和 $-\epsilon$ 之间确定 $-h_m$, 在 $\Delta i_c < -h_m$ 时使用滞环电流比较法, 并且使得当 $\Delta i_c < -h_m$ 时, 使用基于空间矢量的滞环电流比较法时误差电流进入(3)区, 而当 $\Delta i_c \geq -h_m$ 时使用基于空间矢量的滞环电流比较法误差电流在(1)区或(2)区。由上分析有:

$$\left| \frac{di}{dt} \right|_{\max} \cdot t_{\text{dsvpwm}} < h - \varepsilon \quad (14)$$

$$\left| \frac{di}{dt} \right|_{\max} \cdot t_{\text{dhcc}} < h - h_m \quad (15)$$

3 仿真分析

将滞环电流控制方法与本文所提的新型电流控制方法在 Matlab 上进行仿真分析。仿真系统拓扑如图 1 所示。仿真参数为：系统电压有效值为 380 V，D-STATCOM 直流侧电容为 15 mF，电容电压 800 V，滤波电感为 2.5 mH。负载侧为三相整流桥带 250 Ω 电阻的纯阻性负载。滞环宽度取系统电流峰值的 1%，允许电流误差为系统电流峰值的 0.4%。仿真结果如图 7 所示。

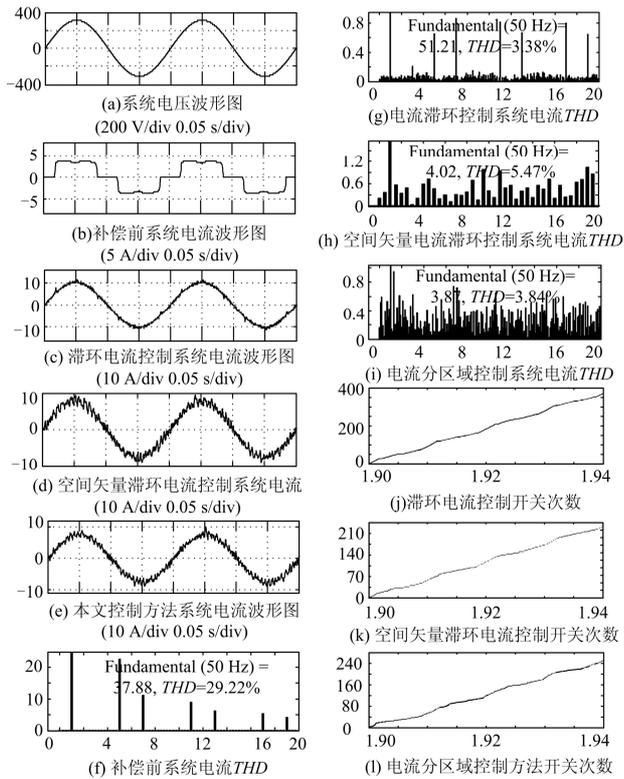


图 7 仿真结果

Fig. 7 Simulation results

从图中可以看出：D-STATCOM 补偿前，系统电流发生了严重的畸变，由 FFT 分析可以看出其畸变率为 29.22%，采用滞环电流跟踪控制之后系统电流畸变率变为 3.38%，此时开关频率约为 10 kHz，极大地改善了电能质量；采用基于空间矢量滞环电流跟踪控制之后系统电流畸变率变为 5.47%，此时开关频率约为 5.6 kHz；采用电流分区控制后其畸变率为 3.84%，开关频率约为 6 kHz。可以看出，采用

电流分区控制在减小系统电流谐波畸变率的性能上面与滞环电流跟踪控制的方法差别较小，与基于空间矢量滞环电流跟踪控制的开关频率相差不大，能有效地降低 D-STATCOM 的功率损耗。

根据上面的理论与仿真分析，研制了一台实验样机进行实验，实验结果如图 8 所示。

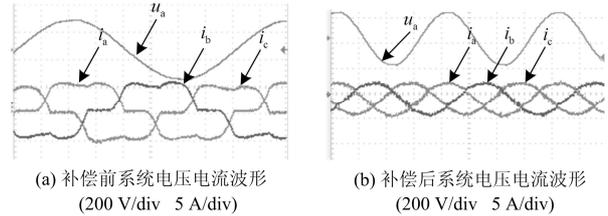


图 8 实验结果

Fig. 8 Experiment results

可以看出，补偿前系统电流发生了严重的畸变，补偿后系统电流波形基本为正弦波，所研制的 D-STATCOM 能有效地改善系统电流波形，从而证明了所用方法的有效性。

4 结论

结合滞环电流跟踪控制与空间矢量控制的优点，将计算出的跟踪误差电流分成在滞环外、滞环内较大和滞环内较小三种不同情况来采用不同的控制方法。该方法能有实现快速跟踪指令电流，改善电能质量，同时减小 D-STATCOM 的开关损耗，具有较好的实用性。

参考文献

- [1] 王伟, 周林, 徐明. 有源电力滤波器控制方法综述[J]. 继电器, 2006, 34(20): 81-86.
WANG Wei, ZHOU Lin, XU Ming. Control methods of active power filter[J]. Relay, 2006, 34(20): 81-86.
- [2] 冯德仁, 姚兆虎, 罗进, 等. DSP 技术应用于双重化有源电力滤波器[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(9): 71-75.
FENG Deren, YAO Zhaohu, LUO Jin, et al. Application of DSP technology on dual active power filter[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2014, 26(9): 71-75.
- [3] 侯冲, 肖铁军, 范岩, 等. 并联型有源电力滤波器的 MATLAB 仿真研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(9): 11-17.
HOU Chong, XIAO Tiejun, FAN Yan, et al. Research on shunt active power filter with MATLAB simulation[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(9): 11-17.
- [4] 黄传金, 宋海军, 陈铁军, 等. 三相四开关 APF 的 SVPWM 优化策略研究[J]. 电力电子技术, 2012, 46(8): 44-45.

- HUANG Chuanjin, SONG Haijun, CHEN Tiejun, et al. Research on the SVPWM optimizational strategy of TFSAPF[J]. Power Electronics, 2012, 46(8): 44-45.
- [5] 李满, 钱平. 基于空间矢量控制策略实现的有源电力滤波器的建模与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 87-93.
- LI Man, QIAN Ping. Modeling and analysis of APF on the strategy of SVPWM[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 87-93.
- [6] 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.
- [7] 张晓, 李新宇, 周睿. 三相四桥臂并联型 APF 无差拍控制策略的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 78-83.
- ZHANG Xiao, LI Xinyu, ZHOU Rui. Study on a deadbeat scheme for three-phase-four-lag shunt active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 78-83.
- [8] 郭三明, 孙鹏荆, 敬树仁, 等. 基于预测模型的 STATCOM 功率控制策略建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 88-92.
- GUO Sanming, SUN Pengjing, JING Shuren, et al. Research on modeling and simulation of power control method for STATCOM based on predictive model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 88-92.
- [9] 伏祥运, 王建曠, 纪延超, 等. 静止坐标系下 D-STATCOM 自适应无差拍控制[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(8): 41-45.
- FU Xiangyun, WANG Jianze, JI Yanchao, et al. Adaptive deadbeat control in stationary reference frame for D-STATCOM[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(8): 41-45.
- [10] 郭喜峰, 王大志, 刘震, 等. 有源电力滤波器滞环电流的模糊控制策略[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2012, 33(8): 1098-1102.
- GUO Xifeng, WANG Dazhi, LIU Zhen, et al. Hysteresis current fuzzy control strategy for APF[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2012, 33(8): 1098-1102.
- [11] 江全才, 马骁旭, 李红刚. 新型三相三线制模糊滑模控制并联有源滤波器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 128-133.
- JIANG Quancai, MA Xiaoxu, LI Honggang. Novel fuzzy sliding mode control method for three-phase three-wire shunt active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 128-133.
- [12] 肖丽平, 童朝南, 高润泉. 改进的有源电力滤波器滞环电流控制策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(12): 119-124.
- XIAO Liping, TONG Chaonan, GAO Runquan. An improved hysteretic current method for active power filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(12): 119-124.
- [13] 徐永海, 刘晓博. 考虑指令电流的变环宽恒频滞环电流控制方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 90-95.
- XU Yonghai, LIU Xiaobo. A variable hysteresis-band and quasi-constant current controller with reference current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 90-95.
- [14] 杨凌霄, 和志威. 改进型有源滤波器滞环电流控制方法[J]. 工矿自动化, 2014, 40(7): 67-71.
- YANG Lingxiao, HE Zhiwei. Improved hysteresis circle current control method for active power filter[J]. Industry and Mine Automation, 2014, 40(7): 67-71.
- [15] 洪峰, 单任仲, 王慧贞, 等. 一种变环宽恒频滞环电流控制方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(1): 115-119.
- HONG Feng, SHAN Renzhong, WANG Huizhen, et al. A varied hysteresis-band current controller with fixed switching frequency[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(1): 115-119.
- [16] 马骁. 静止无功发生器联合补偿协调控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- MA Xiao. Research on coordination control of combined compensating by static VAR generator[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [17] 叶小军, 曾江, 王克英, 等. 并联有源电力滤波器双滞环电流控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(9): 60-64.
- YE Xiaojun, ZENG Jiang, WANG Keying, et al. Double hysteresis current control strategy for shunt active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(9): 60-64.

收稿日期: 2015-07-02; 修回日期: 2015-08-17

作者简介:

常鲜戎(1956-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统分析与控制;

殷绕方(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制。Email: 863517618@qq.com

(编辑 葛艳娜)