doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.09.001

H 桥级联 STATCOM 自适应死区补偿方法

徐 榕,于 泳,杨荣峰,于雁南,徐殿国

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院,150001 哈尔滨)

摘 要: 为消除死区效应对H桥级联静止同步补偿器(STATCOM)输出电压及电流的影响,提出一种新的死区补偿方法. 根据离散扰动观测器的工作原理,设计相应的观测器,对由于死区效应引起的STATCOM输出电压与参考电压的差值进行实时在线观测,并将观测到的差值作为补偿量,引入到无差拍控制系统中,实现对死区的自适应补偿. 仿真与实验结果表明,该方法可以有效地提高死区补偿效果,消除零点电流箝位现象,降低STATCOM输出电流的谐波含量.

关键词: H桥级联;静止同步补偿器;无差拍控制;死区补偿;离散扰动观测器

中图分类号: TM76 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2015)09-0001-07

Adaptive dead-time compensation of H-bridge cascaded STATCOM

XU Rong, YU Yong, YANG Rongfeng, YU Yannan, XU Dianguo

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China)

Abstract: In this paper, in order to eliminate the effect of STATCOM dead-time effect on the voltage and current, a new dead-time compensation method was proposed. According to the principle of discrete-time disturbance observer, corresponding observer was designed. The D-value of STATCOM output voltage and reference voltage caused by dead-time effect can be real-time observed on line. The D-value as a compensation value feeds back to the dead-beat control system to realize the self-adaption dead-time compensation. Simulation and experimental results show that it can effectively improve the effect of dead-time compensation, eliminate the phenomenon of the zero current clamping, and reduce current harmonic content of STATCOM.

Keywords: H-bridge cascaded; static synchronous compensator; dead-beat control; dead-time compensation; discrete-time disturbance observer

在工业应用中,随着电网中非线性负载的广泛使用,所产生的无功和谐波电流对电网造成严重冲击,为了保证较好的电能质量,需要对6 kV和10 kV电网进行无功补偿和谐波消除,以提高电网的可靠性与稳定性. H桥级联静止同步补偿器(STATCOM)利用多电平变换技术,将开关器件电压应力降低,通过级联,使整个装置可以输出高电压,并具有损耗低、响应快、储能元件体积小和输出电流谐波含量低等优点,成为动态无功补偿装置发展的重要方向,在中高压大容量场合得到了迅速的发展[1-5].

但由于H桥功率单元每个桥臂的功率管具有互补的驱动信号,为避免开关器件的直通现象,必须在互补的两路信号间插入死区. 然而死区时间的设置和开关器件的非理想特性,必然造成了输出电压与参考电压之间的误差,导致功率单元输出电流的谐波含量增大[6-10].

针对上述问题,国内外学者提出了多种补偿方法来消除死区效应所引起的对逆变器输出电压的影响,但鲜有文献介绍H桥级联STATCOM的死区补偿策略. 文献[11]提出了一种无死区的正弦脉宽调制方法,通过禁止实际不导通电流的功率管驱动信号,使对管之间不用再设置死区,实现无死区正弦脉宽调制;文献[12]根据各相电流大小动态调整逆变器各桥臂的死区时间,但需要增加额外的硬件;文献[13]提出一种采用两相调制策略的空间矢量方法,无需检测电流的极性;文献[14]将死区效应看成一种周期性扰动,利用重复控制加以补偿,但校正时间较长,动态响应较慢;文献[15]提出了对死区效应

收稿日期: 2014-05-16.
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51237002);
台达电力电子科教发展计划重大项目(DREM2012001).
作者简介: 徐 榕(1984—),男,博士研究生;
徐殿国(1960—),男,教授,博士生导师.
通信作者: 于 泳,yuyong@hit.edu.cn.

的在线补偿方法,但其内部的低通滤波器会造成输出电压的滞后.

针对上述问题,本文提出一种新的死区补偿方法. 根据离散扰动观测器的工作原理,设计相应的观测器,对由于死区效应引起的 STATCOM 输出电压与参考电压的差值进行实时的在线观测,并将观测到的差值作为补偿量,引入到无差拍控制系统中,实现对死区的自适应补偿. 最后仿真与实验结果证明了该方法的正确性和有效性.

1　H 桥级联 STATCOM 的无差拍控制原理

H 桥级联 STATCOM 的主电路拓扑结构如图 1 所示. STATCOM 采用星型接法,通过连接电抗器并联于电网与负载之间,STATCOM 通过注入与负载类型相反的无功电流,补偿负载的无功,提高电网输电质量,使电网只提供有功电流. 每相桥臂由 N 个 H 桥逆变单元级联而成. 设功率开关器件在理想状态下工作, u_{sa}、u_{sb}、u_{sc} 为网侧三相电压, u_a、u_b、u_c 为 STATCOM 输出三相电压, i_{sa}、i_{sb}、i_{sc} 为网侧三相电流, i_a、i_b、i_c 为 STATCOM 输出三相补偿电流, i_{la}、i_{lb}、i_{lc} 为负载三相电流, U_{dc} 为直流侧电容电压参考值, C 为直流侧电容, L 为电感, R_s 为充电电阻.

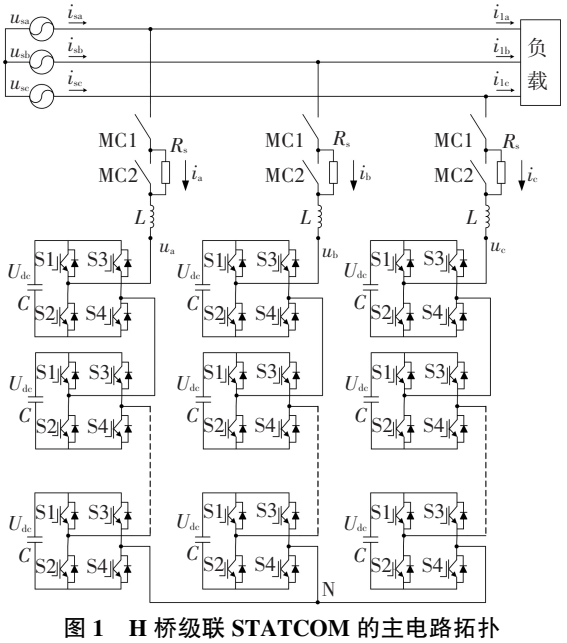


图 1　H 桥级联 STATCOM 的主电路拓扑

对图 1 所示的电路应用基尔霍夫电压电流定律及能量关系,可得 STATCOM 数学模型为

$$\begin{cases} L\dfrac{\mathrm{d}i_a}{\mathrm{d}t} = u_{sa} - u_a - Ri_a, \\ L\dfrac{\mathrm{d}i_b}{\mathrm{d}t} = u_{sb} - u_b - Ri_b, \\ L\dfrac{\mathrm{d}i_c}{\mathrm{d}t} = u_{sc} - u_c - Ri_c. \end{cases} \tag{1}$$

其中: R 为系统的等效损耗电阻.

设采样周期为 T_s, 将式(1)离散化并整理得

$$\begin{cases} u_a(k) = u_{sa}(k) - \dfrac{L}{T_s}[i_a(k+1) - i_a(k)] - Ri_a(k), \\ u_b(k) = u_{sb}(k) - \dfrac{L}{T_s}[i_b(k+1) - i_b(k)] - Ri_b(k), \\ u_c(k) = u_{sc}(k) - \dfrac{L}{T_s}[i_c(k+1) - i_c(k)] - Ri_c(k). \end{cases} \tag{2}$$

由式(2)可以看出,根据 k 时刻采样的 $i(k)$, $u_s(k)$ 和 $k+1$ 时刻的参考指令电流预测值,可以计算出 k 采样时刻 STATCOM 参考输出的指令电压 $u(k)$. 但由于数字系统的延时性,计算出指令电压的时刻要滞后采样时刻一拍,所以 $k+1$ 时刻的指令电压是由 k 时刻的采样值计算得到的,由此式(2)可改写为

$$\begin{cases} u_a^*(k+1) = u_{sa}(k) - \dfrac{L}{T_s}[i_a(k+1) - i_a(k)] - Ri_a(k), \\ u_b^*(k+1) = u_{sb}(k) - \dfrac{L}{T_s}[i_b(k+1) - i_b(k)] - Ri_b(k), \\ u_c^*(k+1) = u_{sc}(k) - \dfrac{L}{T_s}[i_c(k+1) - i_c(k)] - Ri_c(k). \end{cases} \tag{3}$$

由于器件的开关频率很高,令 $i(k+1) = i^*(k)$, 则系统可以在下一采样时刻达到电压指令量,实现无差拍控制,带"*"的量为指令量. 同时,由于电阻很小,在模型建立的过程中忽略不计,得到

$$\begin{cases} u_a^*(k+1) = u_{sa}(k) - \dfrac{L}{T_s}[i_a^*(k) - i_a(k)], \\ u_b^*(k+1) = u_{sb}(k) - \dfrac{L}{T_s}[i_b^*(k) - i_b(k)], \\ u_c^*(k+1) = u_{sc}(k) - \dfrac{L}{T_s}[i_c^*(k) - i_c(k)]. \end{cases} \tag{4}$$

在数字化实现过程中,控制器在输入采样点的时刻计算其输出,在相邻采样点之间的时间段内维持输出值不变,相当于通过一个零阶保持器进行离散. 所以由式(4)结合零阶保持器,得到离散状态下的传递函数为

$$G(z) = Z[H_0(s)\cdot G(s)] = Z\left[H_0(s)\cdot\left(\frac{I_x(s)}{V_x(s) - E_x(s)}\right)\right] = Z\left[H_0(s)\cdot\left(-\frac{1}{Ls}\right)\right] = \frac{-T_2}{L(z-1)}. \tag{5}$$

其中 $H_0(s) = \dfrac{1 - \mathrm{e}^{-T_s s}}{s}$ 为零阶保持器连续状态下的

传递函数；T_s 为采样周期；x 代表 a，b 或 c 相.

2　自适应死区补偿方法

2.1　死区效应对 H 桥单元输出电压的影响

H 桥单元结构如图 2 所示. 由于开关管开通与关断过程需要一定时间，为防止桥臂直通造成电容短路而损坏开关管，需加入死区时间 T_d，防止由于器件的非理想性而导致直通. 但是死区的加入造成输出畸变，产生新的谐波分量，降低无功补偿与有源滤波的效果. 以单元输出正电压状态为例进行分析，图 3 为单元输出正电压状态时的各开关管的状态，可以看出，加入死区后开关管 S3 和 S4 的状态并不会随指令脉冲信号立刻发生变化，在死区时间内，两个管子均处于关断状态.

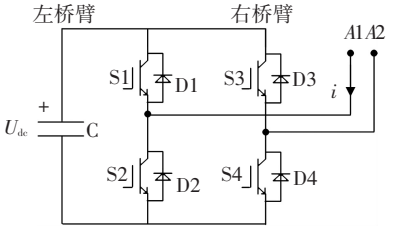


图 2　H 桥单元结构

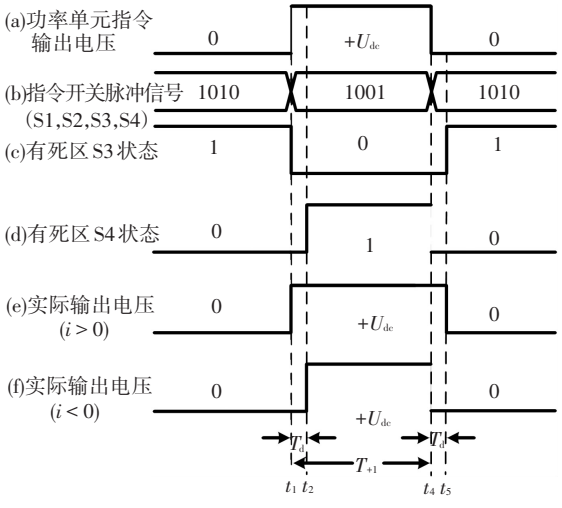
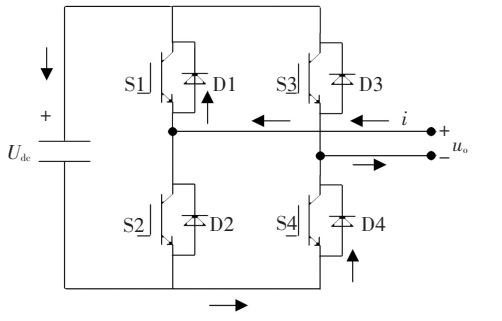


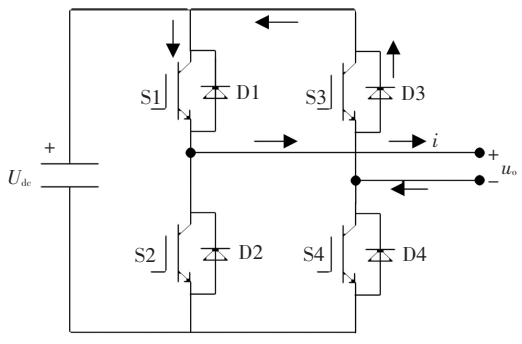
图 3　单元输出正电压状态

在死区时间内，S1 和 S2 分别处于开通和截止状态，S3 和 S4 处于关断状态时. 由于电流流向不同，功率单元输出电平将不同. 如图 4 所示，当流经功率单元电流 $i > 0$ 时，功率单元输出电压为 U_{dc}. 反之，当流经功率单元电流 $i < 0$ 时，功率单元输出 0 电平. 因此死区时间内，由于电流流向不同，功率单元实际输出电压如图 3(e)、3(f) 所示. 可以看到，功率单元电流 $i > 0$ 时，实际输出电压将增加 $U_{dc}T_d/T_s$，而功率单元电流 $i < 0$ 时，实际输出电压将减少 $U_{dc}T_d/T_s$.

同理可以分析功率单元在输出负电压时的状态，如图 5 所示. 当功率单元电流 $i > 0$ 时，实际输出电压将增加 $U_{dc}T_d/T_s$，而功率单元电流 $i < 0$ 时，实际输出电压将减少 $U_{dc}T_d/T_s$.

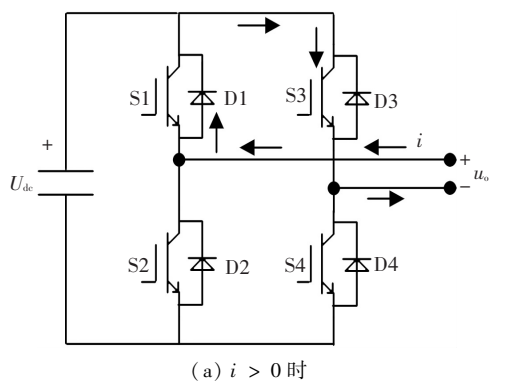


(a) $i > 0$ 时

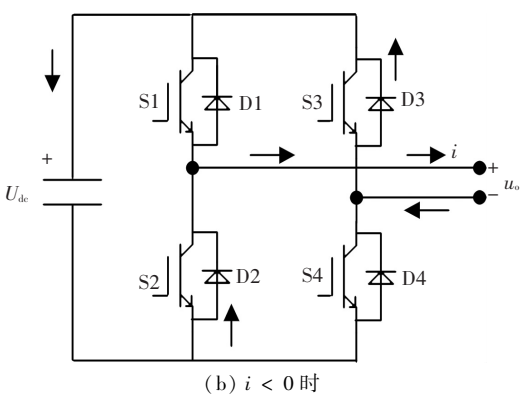


(b) $i < 0$ 时

图 4　功率单元输出正电压死区时状态



(a) $i > 0$ 时



(b) $i < 0$ 时

图 5　功率单元输出负电压死区时状态

2.2　离散扰动观测器

离散扰动观测器是将被控对象的实际输出与标称模型的输出之差作为等效扰动，利用离散扰动观测器进行实时的在线观测，并将观测到的差值作为补偿量，引入到原控制系统中，具体实现如图 6 所示.

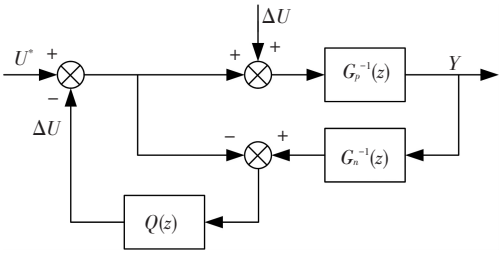


图6　离散扰动观测器

在图6中，U^*、ΔU、$\Delta\hat{U}$、Y分别为输入、扰动、观测的扰动、输出，$G_p(z)$为系统的实际模型，$G_n^{-1}(z)$为系统的标称模型的倒数，$Q(z)$为采用双线性变换离散化后的一阶低通滤波器.

先令$Q(z)=1$，由图6可以得到

$$(G_p(z)\cdot G_n^{-1}(z)-1)U^*=G_p(z)\cdot G_n^{-1}(z)(\Delta\hat{U}-\Delta U). \tag{6}$$

当系统的实际模型和标称模型的倒数之积为1时(即系统的实际模型和标称模型相同时)，观测的扰动与实际的扰动相等. 因此可以将死区效应引起的STATCOM输出电压与参考电压的偏差视为外界的扰动，并应用离散扰动观测器对其误差进行实时的在线观测.

2.3　自适应死区补偿原理

根据离散扰动观测器的工作原理，设计相应的观测器，对由于死区效应引起的STATCOM输出电压与参考电压的差值进行实时的在线观测，并将观测到的差值作为补偿量，引入到无差拍控制系统中，实现对死区的自适应补偿. 结合式(4)、(5)与图6，并重新定义各个变量，得到引入离散扰动观测器的无差拍死区补偿控制系统框图，如图7所示.

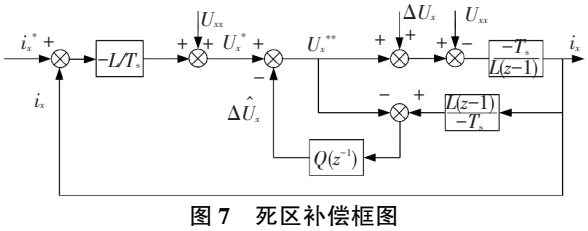


图7　死区补偿框图

图7中，i_x^*、i_x、U_x、U_x^*、ΔU_x、$\Delta\hat{U}_x$、U_x^{**}和U_{sx}(x代表a,b或c相)分别为STATCOM三相参考电流、输出电流、输出电压、参考电压、扰动电压、观测的扰动电压、死区补偿后的参考电压和网侧电压.

1)不考虑死区效应的影响时，由式(4)可得

$$\begin{cases} U_a^*=U_a=U_{sa}-\dfrac{L}{T_s}[i_a^*-i_a], \\ U_b^*=U_b=U_{sb}-\dfrac{L}{T_s}[i_b^*-i_b], \\ U_c^*=U_c=U_{sc}-\dfrac{L}{T_s}[i_c^*-i_c]. \end{cases} \tag{7}$$

此时，STATCOM输出的三相电压和指令电压相等.

2)考虑死区效应的影响，但未采取补偿方法时，由式(4)可得

$$\begin{cases} U_a^*=U_{sa}-\dfrac{L}{T_s}[i_a^*-i_a]-\Delta U_a, \\ U_b^*=U_{sb}-\dfrac{L}{T_s}[i_b^*-i_b]-\Delta U_b, \\ U_c^*=U_{sc}-\dfrac{L}{T_s}[i_c^*-i_c]-\Delta U_c. \end{cases} \tag{8}$$

此时，由于死区效应的影响，STATCOM输出的三相电压和指令电压存在电压差，因此，若要消除死区效应对输出电压及电流的影响，必须要对其进行补偿.

3)考虑死区效应的影响，且采取本文提出的自适应补偿方法时，由式(4)可得

$$\begin{cases} U_a^*-\Delta\hat{U}_a=U_{sa}-\dfrac{L}{T_s}[i_a^*-i_a]-\Delta U_a, \\ U_b^*-\Delta\hat{U}_b=U_{sb}-\dfrac{L}{T_s}[i_b^*-i_b]-\Delta U_b, \\ U_c^*-\Delta\hat{U}_c=U_{sc}-\dfrac{L}{T_s}[i_c^*-i_c]-\Delta U_c. \end{cases} \tag{9}$$

此时，离散扰动观测器对由于死区效应引起的STATCOM输出的三相电压与其参考电压的差值进行实时的在线观测，并将观测到的差值作为补偿量，引入到无差拍控制系统中. 如果观测到的差值与实际的差值相等，就可以消除死区效应对输出电压及电流的影响.

$$\begin{cases} \Delta\hat{U}_a=Q(z)\left[\dfrac{i_aL_n(z-1)}{-T_s}-U_a^{**}\right], \\ \Delta\hat{U}_b=Q(z)\left[\dfrac{i_bL_n(z-1)}{-T_s}-U_b^{**}\right], \\ \Delta\hat{U}_c=Q(z)\left[\dfrac{i_cL_n(z-1)}{-T_s}-U_c^{**}\right]. \end{cases} \tag{10}$$

根据图7所示的补偿原理，利用式(10)就可以得到利用离散扰动观测器观测到补偿量，其中L_n为标称模型中的标称电感.

由于本文所提出的基于扰动观测器的死区补偿方法对控制模型及电感参数的灵敏度具有较高的依赖性，在实际应用中需要解决模型中电感参数选取的问题. 结合式(6)与图7，得到关于标称电感L_n和实际电感L的关系式为

$$\Delta\hat{U}=\left(1-\frac{1}{G_p(z)\cdot G_n^{-1}(z)}\right)U^*+\Delta U=$$

$$\left(1-\frac{-Ts/L_n(z-1)}{-Ts/L(z-1)}\right)U^*+\Delta U=$$

$$\left(1-\frac{L}{L_n}\right)U^* + \Delta U. \tag{11}$$

这里只考虑参考电压 $U^* > 0$ 的情况，相反的情况可采用同样的方法进行分析. 当 $L_n = L$ 时，$L/L_n = 1$，由式(11)得到 $\Delta\hat{U} = \Delta U$. 观测到的扰动电压与实际扰动电压相等，此时，本文提出的控制方法能够对死区进行完美的补偿. 当 $L_n > L$ 时，$L/L_n < 1$，由式(11)得到 $\Delta\hat{U} < \Delta U$. 观测到的扰动电压小于实际的扰动电压，此时，本文提出的控制方法将出现欠补偿的现象，使补偿效果不能达到最佳. 当 $L_n < L$ 时，$L/L_n > 1$，由式(11)得到 $\Delta\hat{U} > \Delta U$. 观测到的扰动电压大于实际的扰动电压，此时，本文提出的控制方法将出现过补偿的现象，使得在补偿原有死区效应的同时，又引入了新的干扰.

所以在采用本文提出的补偿方法对死区效应进行补偿的时候，选取模型中电感参数等于实际电感值，以实现补偿死区的同时，保证良好的补偿效果，又不会引入新的干扰.

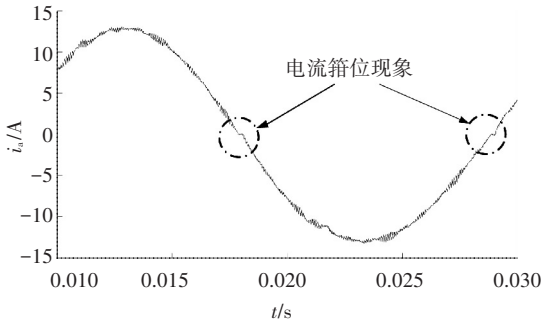
3　仿真和实验验证

为了验证本文提出的新方法，根据 H 桥级联 STATCOM 的数学模型，在 MATLAB/Simulink 环境中建立三相星型连接的 STATCOM 仿真模型，仿真参数：每相 $N = 12$ 个 H 桥单元，网侧电压 $u_s = 400$ V，$f = 50$ Hz，单元直流侧电容 $C = 5\,600$ μF，H 桥单元直流侧电压参考值 $U_{dc} = 200$ V，连接电抗器 $L = 10$ mH，等效开关频率 $f = 1$ kHz，死区时间 $T_d = 6$ μs. 为方便观察死区补偿效果，负载采用纯无功负载，电流以 a 相为例.

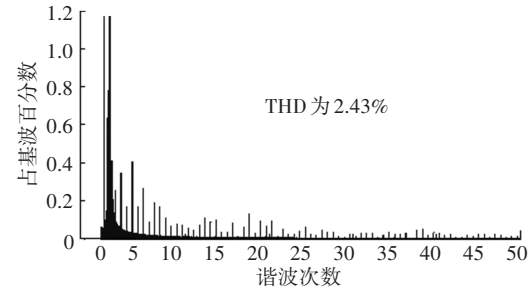
图 8、9 分别为死区补偿前后 STATCOM 输出电流波形及谐波畸变 THD. 图 8(a)为死区补偿前的电流波形，图 8(b)的 THD 为 2.43%，可以看出电流波形明显的畸变，存在零点电流箝位现象；图 9(a)为死区补偿后的电流波形，消除了零点电流箝位现象，图 9(b)的 THD 仅为 1.75%.

为进一步验证新方法的正确性和有效性，本文搭建最高电压等级为 10 kV，额定容量为 2 MVar 的 H 桥级联 STATCOM 实验平台，并完成网侧电压 $u_s = 400$ V 的低压实验和网侧电压 $u_s = 10$ kV 的高压实验. 具体过程是使用两台相同的 H 桥 STATCOM 进行对拖实验，其中一台作为补偿装置，用于发出补偿电流；而另一台则作为负载，用于产生无功电流.

具体实验参数：每相 $N = 12$ 个 H 桥单元，$f = 50$ Hz，单元直流侧电容 $C = 5\,600$ μF，连接电抗器 $L = 10$ mH，等效开关频率 $f = 1$ kHz，死区时间 $T_d = 6$ μs. 控制器中的 DSP 选择 TI 公司的 TMS320F28335 芯片，负责无功电流检测，参考指令电流计算和直流电压控制；FPGA 选择 Altera 公司的 Cyclone Ⅲ系列的 EP3C25 芯片，负责产生 36 路 PWM 脉冲控制信号，并通过光纤将脉冲触发信号送到每个 H 桥单元. 测得的实验波形均为 a 相电流波形.

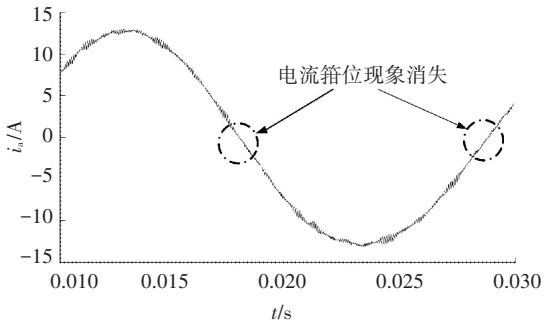


(a)电流波形

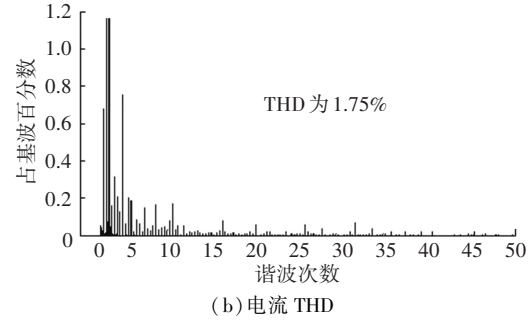


(b)电流 THD

图 8　补偿前 STATCOM 输出电流波形及 THD



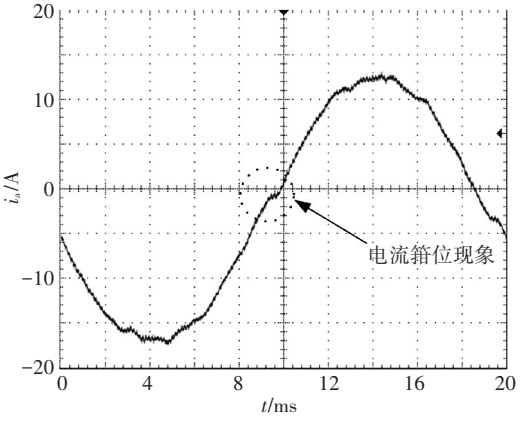
(a)电波波形



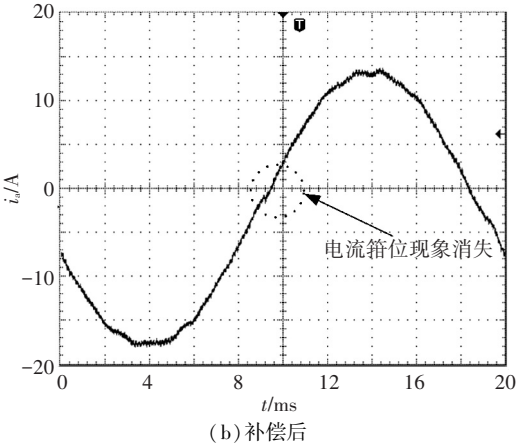
(b)电流 THD

图 9　补偿后 STATCOM 输出电流波形及 THD

当电网电压 $u_s = 400$ V，H 桥单元直流侧电压参考值 $U_{dc} = 200$ V 时. 图 10、11 分别为 STATCOM 输出的 a 相补偿电流和电压波形.

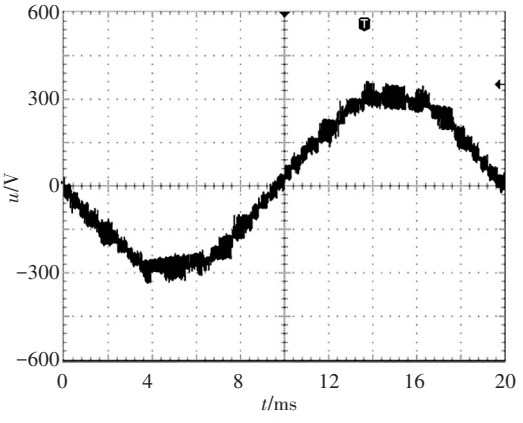


(a)补偿前

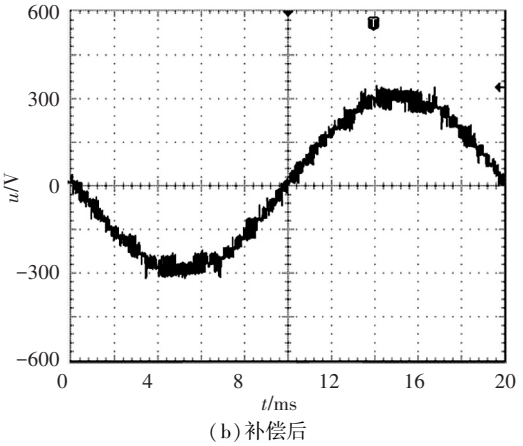


(b)补偿后

图 10　低压时 STATCOM 输出电流波形



(a)补偿前



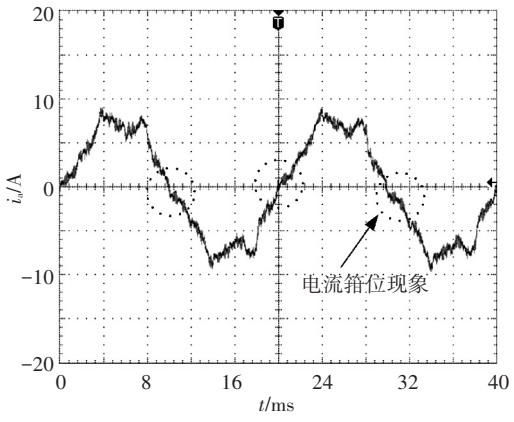
(b)补偿后

图 11　低压时 STATCOM 输出电压波形

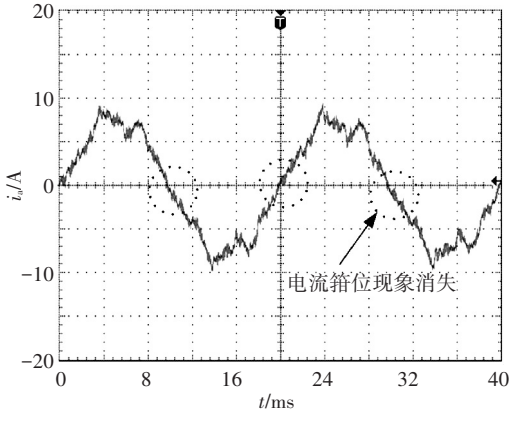
图 10 为 STATCOM 输出的 a 相补偿电流波形. 图 10(a)为未进行死区补偿时的电流波形,可以看出电流波形有明显畸变,出现了明显的零点电流箝位现象,并且在电流峰值处出现了较大的畸变;图 10(b)为采用死区补偿后的电流波形,电流波形正弦度得到了明显改善,畸变减小,有效地消除了零点电流箝位现象,且峰值处的波形平滑. 谐波畸变 THD 由未补偿时的 2.64%,下降到 1.53%.

图 11 为 STATCOM 输出的 a 相电压波形. 图 11(a)为未进行死区补偿时的输出电压波形,可以看出电压含有很大的谐波,并且在电压峰值处,阶梯波形严重畸变;图 11(b)为采用死区补偿后的输出电压波形,电压所含谐波降低,在峰值处,波形平滑,畸变减小,波形的正弦度得到了明显改善.

当电网电压为 10 kV,H 桥单元直流侧电压参考值 U_{dc} = 800 V 时. 图 12 为 STATCOM 发出的 a 相补偿电流波形. 同样可以在图 12(a)中看到,未进行死区补偿时,a 相输出电流波形出现了微小的零点电流箝位现象;图 12(b)为采用死区补偿后的电流波形,微小的零点电流箝位现象基本消失.



(a)补偿前



(b)补偿后

图 12　高压时 STATCOM 输出电流波形

4　结　论

1）根据离散扰动观测器的工作原理，设计了离散扰动观测器，对由于死区效应引起的 STATCOM 输出电压与参考电压的差值进行实时在线观测，并将观测到的差值作为补偿量，引入到无差拍控制系统中，能够实现对死区的自适应补偿.

2）提出的死区补偿新方法可以有效地改善 STATCOM 输出电流的波形，消除零点电流箝位现象，提高 STATCOM 的补偿效果.

参考文献

[1] HATANO N，ISE T. A configuration and control method of cascade H-bridge STATCOM[C]//Proceedings of General Meeting of the IEEE Power and Energy Society. Pittsburgh：IEEE，2008：1885-1892.

[2] COLLINS C D，BATHURST G N，WATSON N R，et al. Harmonic domain approach to STATCOM modeling[J]. IEEE Proceedings Generation Transmission Distribution，2005，152(2)：194-200.

[3] GRUNBAUM R，HASLER J P，LARSSON T，et al. STATCOM to enhance power quality and security of rail traction supply[C]//Proceedings of Electromotion 2009. Lille，France：IEEE，2009：69-74.[4]王奎，郑泽东，李永东.一种新型的无变压器级联型多电平变换器拓扑[J].电工技术学报，2011，26(8)：1-6.

[5]刘文华，宋强，滕乐天，等.基于集成门极换向晶闸管与链式逆变器的±50 MVar 静止同步补偿器[J].中国电机工程学报，2008，28(15)：55-60.

[6]王高林，于泳，杨荣峰，等.感应电机空间矢量 PWM 控制逆变器死区效应补偿[J].中国电机工程学报，2008，28(15)：79-83.

[7]孙向东，钟彦儒，任碧莹，等.一种新颖的死区补偿时间测量方法[J].中国电机工程学报，2003，23(2)：103-107.

[8] LAZHAR B B. On the compensation of dead time and zero-current crossing for a PWM-inverter-controlled AC servo drive[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics，2004，51(5)：1113-1118.

[9] CICHOWSKI A，NIEZNANSKI J. Self-tuning dead time compensation method for voltage-source inverters[J]. IEEE Power Electronics Letter，2005，3(2)：72-75.

[10]吴茂刚，赵荣祥，汤新舟.正弦和空间矢量 PWM 逆变器死区效应分析与补偿[J].中国电机工程学报，2006，26(12)：101-105.

[11] CHEN L H，PENG F Z. Dead-time elimination for voltage source inverters[J]. IEEE transactions on power electronics，2008，23(2)：574-580.

[12]何正义，季学武，瞿文龙.一种新颖的基于死区时间在线调整的 SVPWM 补偿算法[J].电工技术学报，2009，24(6)：42-47.

[13]程小猛，陆海峰，瞿文龙.用于逆变器死区补偿的空间矢量脉宽调制策略[J].清华大学学报：自然科学版，2008，48(7)：1077-1080.

[14]段善旭，孙朝晖，张凯，等.基于重复控制的 SPWM 逆变电源死区效应补偿技术[J].电工技术学报，2004，19(2)：52-57.

[15] KIM H S，KIM K H，YOUN M J. On-line dead-time compensation method based on time delay control[J]. IEEE TRANS Control System，2003，11(2)：279-285.

（编辑　魏希柱）