

三相并网逆变器的控制与死区补偿

王 璐, 朱晓亮, 龚春英, 肖 岚

(南京航空航天大学, 自动化学院, 江苏 南京 210016)

摘要:针对三相并网逆变器,详细分析了空间矢量脉宽调制(SVPWM)中死区效应对并网电流的影响,对死区效应引起的误差矢量进行数学建模,讨论了误差矢量与三相电流方向的关系。采用电流矢量来判断电压补偿扇区,避免了电流检测中出现多个过零点的现象,提高了补偿精度。最后,采用 TMS320F2812 控制芯片,结合功率解耦、电压前馈等控制方法补偿死区效应,在应用于风力发电的逆变器上得到了很好的效果。

关键词:三相并网逆变器;空间矢量调制;死区补偿

中图分类号:TM464;TN787

文献标识码:A

文章编号:1000-100X(2010)09-0001-03

Control and Dead-zone Compensation on Three-phase Grid-connected Inverter

WANG Lu, ZHU Xiao-liang, GONG Chun-ying, XIAO Lan

(Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract:Based on three-phase grid-connected inverter,this paper analyses the dead-zone effect on network current in space vector PWM,set up the mathematical model of error vector caused by dead-zone effect,and discusses the relationship between error vector and the direction of three-phase current.A voltage compensation method by using current vector to determine the compensation sector is applied to avoid the phenomenon of multiple zero-crossing current detection and improve the compensation accuracy.A wind power inverter controlled by TMS320F2812 is designed with control strategies of power decoupling,voltage feed-forward and dead-zone compensation,then simulations and experiments prove satisfied results.

Keywords:three-phase grid-connected inverter; space vector pulse width modulation; dead-zone compensation

Foundation Project:Supported by the National Basic Research Program(No.2007CB210303)

1 引言

风能在全球范围内有巨大蕴藏量,是可再生能源发展的重要方向。在电力电子变换装置中,三相并网逆变器能将电能回馈到电网,在电网侧获得近似正弦的电流波形,功率因数接近 1,对电网的污染很小,在新能源的利用中得到了广泛应用。在此研究的应用于风力发电的三相并网逆变器采用三相桥式结构、空间矢量调制,并进行功率解耦和电压前馈。

为防止同一桥臂的 2 个开关管直通,必须在开关动作期间插入死区时间,这势必导致输出电压的误差。该误差不但增加了系统损耗,还可能造成系统失稳。随着电力电子变换器的高频化,死区效应的影响越来越大。为解决该问题,通常的方法是针对由死区引起的电压误差,根据相电流极性对每相进行预测然后进行反馈补偿^[1]。但该死区补偿方法要求知道电流方向信息,在电流过零点附近并不能很好地工作。在此采用电流矢量判断补偿扇区的方法,无需检测三相电流过零点。详细分析了死区效应和补偿原理,并对补偿方法进行了实验验证,所有补偿算法都由 DSP 完成,无需添加其他硬件,易于实现。

2 逆变器工作原理的分析

2.1 SVPWM 空间矢量算法

空间电压矢量脉宽调制(SVPWM)技术由于具有较低的谐波输出含量和较高的母线电压利用率,在逆变器中得到广泛应用。三相并网逆变器拓扑如图 1 所示,系统直流侧电压 U_d 由再生能源发电设备提供,拓扑采用三相全桥式拓扑,逆变桥输出经过滤波电感 L 连接到电网上。

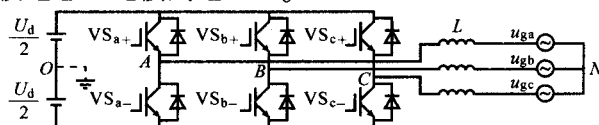


图 1 三相并网逆变器原理图

网侧三相电压矢量 u_{ga}, u_{gb}, u_{gc} 可合成为一个旋转的空间矢量 u_s ,如图 2a 所示,其幅值为相电压峰值,以电网频率为电气角速度作恒速同步旋转。对于三相电压型逆变器,6 个开关管一共有 8 种开关组合状态,构成了 8 个基本空间电压矢量。除零矢量 U_0, U_7 外,其余 6 个有效空间电压矢量幅值均为 $2U_d/3$,在空间中相位相差 60° ,将空间分为 6 个扇区。以扇区 I 为例,利用最近的两个矢量 U_4, U_6 ,按照伏秒面积平衡原则合成 u_s ,一个开关周期 T_s 内 u_s 可看成恒定值,得到:

$$T_4 \frac{2U_d}{3} + T_6 \left(\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \frac{2U_d}{3} + T_0(T) \cdot 0 = |u_s| e^{j\theta} T_s \quad (1)$$

式中: $T_0 + T_4 + T_6 = T_s; 0 \leq \theta \leq \pi/3$ 。

基金项目:国家“973”项目(2007CB210303)

定稿日期:2010-04-02

作者简介:王 璐(1988-),女,江苏东台人,硕士,研究方向为新能源技术和逆变技术。

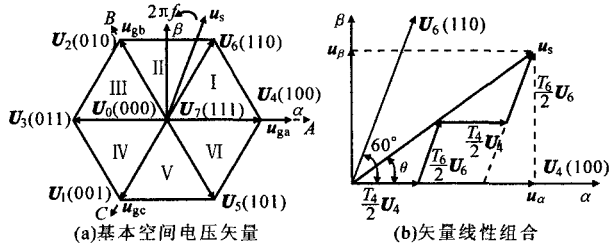


图 2 基本空间电压矢量及扇区 I 内矢量线性组合

可见 u_s 在 T_s 内所产生的积分效果与 U_4, U_6 及零矢量作用 T_4, T_6, T_0 (或 T_7) 时间的积分效果相同。

式(1)中实部与实部相等,虚部与虚部相等,得:

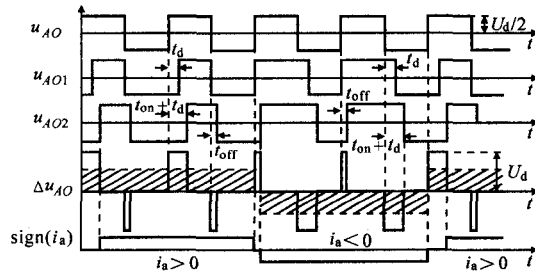
$$T_4 = \frac{\sqrt{3} |u_s| T_s \sin(\pi/3 - \theta)}{U_d}, T_6 = \frac{\sqrt{3} |u_s| T_s \sin \theta}{U_d} \quad (2)$$

求出各扇区内两相邻矢量作用时间后,通常采用七段对称式空间矢量合成方法^[2]来分配各矢量,一个周期内只有 3 次开关管切换。图 2b 中,各矢量的作用顺序为 U_0, U_4, U_6 , 作用时间依次为 $T_0/4, T_4/2, T_6/2, T_0/2, T_6/2, T_4/2, T_0/4$ 。并网逆变器中,逆变器输出端与电网电压同步,采样电网电压相位,控制输出正弦电流并与电网电压同相位。

2.2 死区效应的产生

由于死区时间 t_d 的存在,使得在 t_d 内输出电压的大小不受开关管控制,由输出电流的流向来决定;另外 IGBT 的开通和关断都需要一定的时间,再考虑到 IGBT 和反并联二极管的通态管压降,这些因素的共同作用使输出电压产生了一定误差。

选取 a 相桥臂为例, t_d 内,两个功率管都停止导通,输出电流 i_a 通过续流二极管进行流通。尽管 t_d 很小,仅占 T_s 的百分之几,单个脉冲不足以影响系统的性能,但考虑连续一个周期的效应,死区的积累作用足以使输出电压畸变,如图 3 所示。由于死区的影响,当 $i_a > 0$ 时,等效正的输出电压下降;当 $i_a < 0$ 时,等效负的电压减小^[3]。此外,当 i_a 在 t_d 内接近于零时,还存在着零电流箝位现象。



u_{AO} 为桥臂 A 点与 U_d 中点 O 之间的电压差; u_{AO1} 为加入死区时间后的桥臂电压; u_{AO2} 为考虑死区与开关管开关时间后的桥臂电压

图 3 a 相死区效应示意图

3 死区效应补偿

3.1 死区效应的数学模型建立

为补偿逆变器的死区效应,在基于 SVPWM 控制的并网系统中,电流调节器的输出指令应加上误差电压 $\Delta U_{AO}, \Delta U_{AO}$ 是一个 T_s 中的平均值,如图 3 中

Δu_{AO} 的斜线阴影部分。由上述分析可得:

$$\Delta U_{AO} = \frac{T_c}{T_s} U_d \text{sign}(i_a) \quad (3)$$

式中: T_c 为死区效应时间, $T_c = t_{d+} + t_{d-} - t_{off}$ 。

可见, t_d 越长、 U_d 越大、频率越高,死区效应现象越明显。同理可求出 b, c 相的误差电压,对各相对于 O 点的三相误差电压进行傅里叶分解可得:

$$\begin{cases} \Delta U_{AO} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4T_c}{nT_s} U_d \sin n\omega t \\ \Delta U_{BO} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4T_c}{nT_s} U_d \sin \left(n\omega t - \frac{2}{3}\pi \right) \\ \Delta U_{CO} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4T_c}{nT_s} U_d \sin \left(n\omega t + \frac{2}{3}\pi \right) \end{cases} \quad (4)$$

式中: ω 为电网电压角频率。

可见加入死区后,桥臂输出电压存在较大的低次谐波,由于三相星形连接,3 及 3 的倍数次谐波抵消。滤波器两端承受桥臂电压和网侧电压,桥臂电压的畸变导致并网电流中存在相应的低次谐波,并且对滤波器的设计要求较高,需采取相应的死区补偿措施。合成得到桥臂输出电压的误差综合矢量:

$$\begin{aligned} \Delta u &= \frac{2}{3} \left(\Delta u_{AN} e^{j0} + \Delta u_{BN} e^{j\frac{2}{3}\pi} + \Delta u_{CN} e^{j\frac{4}{3}\pi} \right) = \\ &= \frac{2}{3} \left(\Delta u_{AO} e^{j0} + \Delta u_{BO} e^{j\frac{2}{3}\pi} + \Delta u_{CO} e^{j\frac{4}{3}\pi} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

由式(3), (5)得到一个 T_s 内的误差电压矢量为:

$$\Delta u = \frac{2T_c}{3T_s} U_d \left[\text{sign}(i_a) e^{j0} + \text{sign}(i_b) e^{j\frac{2}{3}\pi} + \text{sign}(i_c) e^{j\frac{4}{3}\pi} \right] \quad (6)$$

3.2 补偿扇区的选择

由式(6)可得表 1 所示不同电流极性组合的 Δu 表, Δu 的幅值 $A = 4T_c U_d / (3T_s)$ 。根据三相电流的极性,可得到 6 种不同的组合,将 Δu 分为 6 个扇区。

表 1 电流极性和误差电压矢量关系

电流矢量扇区	电流极性	Δu
1	$i_a < 0, i_b < 0, i_c > 0$	$A(-1 - \sqrt{3}j)/2$
2	$i_a < 0, i_b > 0, i_c < 0$	$A(-1 + \sqrt{3}j)/2$
3	$i_a < 0, i_b > 0, i_c > 0$	$-A$
4	$i_a > 0, i_b < 0, i_c < 0$	A
5	$i_a > 0, i_b < 0, i_c > 0$	$A(1 - \sqrt{3}j)/2$
6	$i_a > 0, i_b > 0, i_c < 0$	$A(1 + \sqrt{3}j)/2$

通常,判断电压补偿扇区都是通过判断电流过零点的方法来实现。但在死区效应的影响下,电流过零时会存在一个平台,尤其是当电流在零附近时,使电流方向的判断出现错误,从而使过零时死区效应更加恶化。参考电机中补偿方法^[4],针对所研究的并网逆变器,采样逆变器输出电流经坐标变换得到空间电流矢量,由电流矢量的相角判断电流的方向。

$$i(t) = \frac{2}{3} \left[i_a(t) + i_b(t) e^{j\frac{2}{3}\pi} + i_c(t) e^{j\frac{4}{3}\pi} \right] = \sqrt{2} I e^{j2\pi ft} \quad (7)$$

通过电流矢量的电角度 $\sigma = 2\pi ft$, 可以判断出 Δu 的补偿扇区:

$$M = \begin{cases} \frac{1}{2}, \sigma \in \left[-\frac{1}{6}\pi, -\frac{1}{2}\pi\right] \cup \left[\frac{1}{6}\pi, \frac{1}{2}\pi\right] \\ -\frac{1}{2}, \sigma \in \left(-\frac{1}{2}\pi, -\frac{5}{6}\pi\right] \cup \left(\frac{1}{2}\pi, \frac{5}{6}\pi\right) \\ 1, \sigma \in \left(-\frac{1}{6}\pi, \frac{1}{6}\pi\right) \cup \left(\frac{5}{6}\pi, \pi\right] \cup \left[-\pi, -\frac{5}{6}\pi\right) \end{cases},$$

$$N = \begin{cases} \frac{\sqrt{3}}{2}, \sigma \in \left[-\frac{1}{6}\pi, \frac{5}{6}\pi\right] \\ -\frac{\sqrt{3}}{2}, \sigma \in \left[-\frac{5}{6}\pi, -\frac{1}{6}\pi\right] \\ 0, \sigma \in \left(-\frac{1}{6}\pi, \frac{1}{6}\pi\right) \cup \left(\frac{5}{6}\pi, \pi\right] \cup \left[-\pi, -\frac{5}{6}\pi\right) \end{cases} \quad (8)$$

得到 $\Delta u = \Delta u_\alpha + \Delta u_\beta = A(M + jN)$, 及 σ 与 Δu 在 α, β 坐标系下的关系, 便于编程实现。采用电流矢量寻找补偿扇区的方法比电流过零点检测法准确度更高, 且无需增加任何硬件。

4 系统控制原理

采用电压前馈的系统经坐标变换后得到 d, q 坐标系下的系统模型, 即:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_{gd} \\ u_{gq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega \\ -\omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (9)$$

可见 d, q 轴分量是耦合的, 这对系统的稳定性及动态特性不利, 因此需要进行解耦控制。解耦的过程实际上是在各轴电流 PI 输出中注入含有其他轴信息的分量, 注入的分量与被控对象产生的耦合量大小相等、方向相反, 如图 4 所示。解耦后得到:

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a & 0 \\ 0 & -a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + a \begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: $a = K_p + K_i/s$, K_p, K_i 为电流 PI 调节器的比例与积分系数。

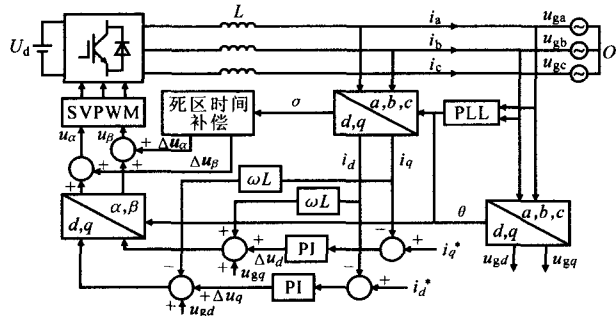


图 4 带死区补偿三相逆变并网系统的控制框图

可见, 由于引入了电流状态反馈, d, q 轴电流实现独立控制。同时引入电网电压作为前馈补偿, 进一步提高系统的动态性能。如图 4, 系统控制中采用无功电流 $i_q^* = 0$ 控制, 实现单位功率因数并网。

5 实验分析

根据上述分析设计了一台三相并网逆变器原理样机, 功率器件选取了 BSM 100 GB 60DLC 智能功率模块, 典型的开通关断时间分别为 26 ns, 150 ns, 控制芯片采用 TMS320F2812, 并网电流有效值基准由 DSP 内部给定, 开关频率 20 kHz。

图 5 示出实验结果, 并网电流有效值 3 A, 考虑

IGBT 开关时间, 加入 $1.7 \mu s$ 死区。由图 5a 可见, 未加死区补偿时, a 相电流 $THD=8.1\%$, 电流过零点出存在明显的电流畸变; 由图 5b 可见, 采用电流过零点判断补偿后的 a 相电流 $THD=4.7\%$, 电流波形得到一定的改善, 5 次谐波含量明显降低; 由图 5c 可见, 采用电流矢量判断补偿后的 a 相电流 $THD=2.9\%$ 。可见软件补偿效果较好, 电流矢量判断扇区比电流过零点判断扇区更精确。稳态时并网电流波形畸变较小, 在小功率运行时并网电流已满足并网要求。该策略有快速的动态响应, 电感电流能很好地跟踪电网电压, 实现单位功率因数并网运行。因为实际的三相电网电压存在不对称等原因、三相电流也不是完全对称的, 电流中会存在 2, 3 及其倍数次谐波, 完全消除死区效应还比较困难。

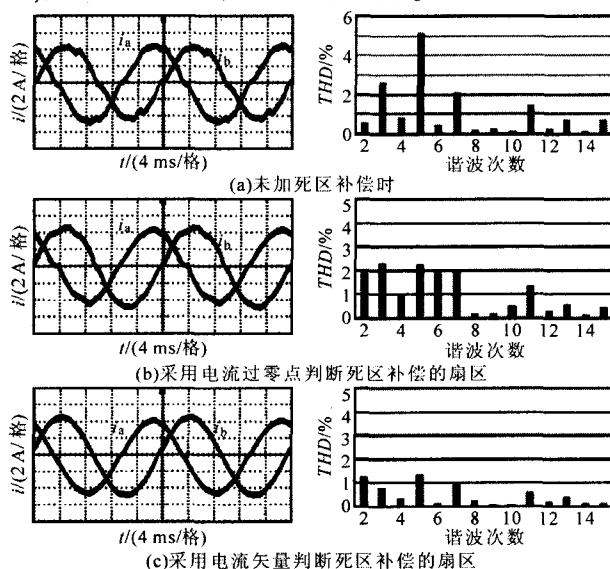


图 5 补偿前、后的并网电流及其频谱

6 结论

研究了一种三相并网逆变器的控制策略, 并在风力发电上进行了应用。对逆变器并网电流进行闭环控制, 实现了电流环的解耦, 引入了电网侧电压前馈补偿, 提高了系统动态响应; 分析了死区时间对逆变器输出电流的影响, 采用软件死区补偿算法消除了电流过零点箝位现象, 减小了电流谐波畸变率。

参考文献

- [1] Jeong G, Park M H. The Analysis and Compensation of Dead-time Effects in PWM Inverters[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 1991, 38(4): 108-114.
- [2] 肖春燕. 电压空间矢量脉宽调制技术的研究及其实现[D]. 南昌: 南昌大学, 2005.
- [3] Choi W, Sul S K. A New Strategy Reducing Voltage/current Distortion in PWM VSI Systems Operation with Low Output Voltages[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1995, 31(5): 1001-1008.
- [4] 胡庆波, 吕征宇. 一种新颖的基于空间矢量 PWM 的死区补偿方法[J]. 电机工程学报, 2005, 25(3): 15-19.