

引用格式:Li Wei, Zhang Jinjing. H Bridge Inverter Dead Zone Compensation Based on Current Zero-crossing Area Detection[J]. Journal of Gansu Sciences, 2018, 30(2): 119-123. [李巍, 张津京. 基于电流过零区域检测的 H 桥逆变器死区补偿[J]. 甘肃科学学报, 2018, 30(2): 119-123.]
doi: 10.16468/j.cnki.issn1004-0366.2018.02.025.

基于电流过零区域检测的 H 桥逆变器死区补偿

李 巍, 张津京

(兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要 通过对 H 桥逆变器中的死区进行分析, 研究了一种基于电流过零区域检测的平均电压前馈补偿法。该方法针对传统的平均电压前馈补偿法在电流过零区域内存在误补偿的现象, 将 H 桥逆变器中输出电流的过零区域进行了精确的划分。在电流过零区域范围外使用平均电压前馈补偿法, 在电流过零区域内, 由于死区不会对输出电压产生影响, 所以无需进行补偿。结果表明该方法有效地避免了传统的平均电压前馈补偿法在电流过零区域内因对电流方向的误判断而导致的误补偿现象。最后, 利用 MATLAB/Simulink 软件对该死区补偿方法进行了仿真验证。

关键词 死区; 逆变器; 补偿方法; H 桥; 过零区域

中图分类号: TM464

文献标志码: A

文章编号: 1004-0366(2018)02-0119-05

相比半桥逆变器结构简单、应用于小功率电路的特点^[1-2], H 桥逆变器则因输出电压幅值大等优点, 在大功率场合得到了广泛应用。H 桥逆变器中由于功率器件存在着一定的开通和关断时间, 为了防止桥臂发生直通短路, 需要在功率器件切换的过程中加入死区时间。而死区时间的加入会导致逆变器输出产生基波电压损失、低次谐波增加, 从而导致系统输出电压波形和电流波形发生畸变^[3-5]。因此, 对 H 桥逆变器的输出电压进行死区补偿是很有必要的。

目前, 国内外学者针对 H 桥逆变器已提出多种死区补偿方法^[6-10]。平均电压前馈补偿法^[11]相比于其他死区补偿方法控制系统简单、使用方便, 因而在实际应用中广泛采用。该方法是将加入死区后的输出电压波形与理想输出电压波形的差值(即死区脉冲电压)平均化后, 通过前馈的方式, 补偿给调制波, 补偿电压的正负取决于逆变器输出电流的方向。在电流过零区域内, 由于 H 桥逆变器输出电流在正负之间会出现跳变, 且随开关频率的增大, 电流跳变越频繁, 因而使用该方法容易出现因对电流方向的误判断, 而导致误补偿现象。基于此, 我们针对 H

桥逆变器研究了一种基于电流过零区域检测的平均电压前馈补偿法。该方法将 H 桥逆变器输出电流的过零区域进行了精确的划分, 在电流过零区域范围外使用平均电压前馈补偿法; 在电流过零区域范围内, 由于死区不会对逆变器输出电压产生影响^[12], 因而无需进行死区补偿。该补偿方法很好地解决了传统的平均电压前馈补偿法在电流过零区域内因对电流方向的误判断而导致的误补偿现象。

1 H 桥逆变器中的死区分析

单相 H 桥逆变器的电路结构如图 1 所示, 其中死区的设置为: 在上下桥臂开关管的切换过程中, 使其中将要开通的开关管比理想状态下滞后时间 T_d 开通, 另一开关管正常关断, 则 T_d 为死区时间, 通常死区时间保持不变。

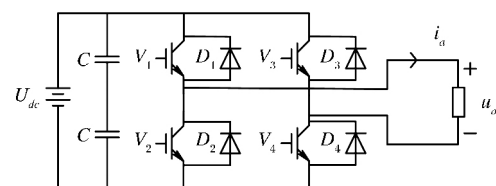


图 1 H 桥逆变器结构图

Fig.1 Structure chart of H bridge inverter

收稿日期: 2017-06-07; 修回日期: 2017-09-12

作者简介: 李巍(1991-), 男, 陕西渭南人, 硕士, 研究方向为电力变换及其控制。Email: Mrwei5@163.com

图1中,在单极性SPWM调制方式下,当逆变器处于死区时间段内,电流 $i_a > 0$ 时, i_a 经反并联二极管 D_2 和功率管 V_4 续流,逆变器输出电压为0;电流 $i_a < 0$ 时, i_a 通过反并联二极管 D_1 和功率管续流 V_3 ,逆变器输出电压为0。对该H桥逆变器的开关情况进行分析,如图2所示。

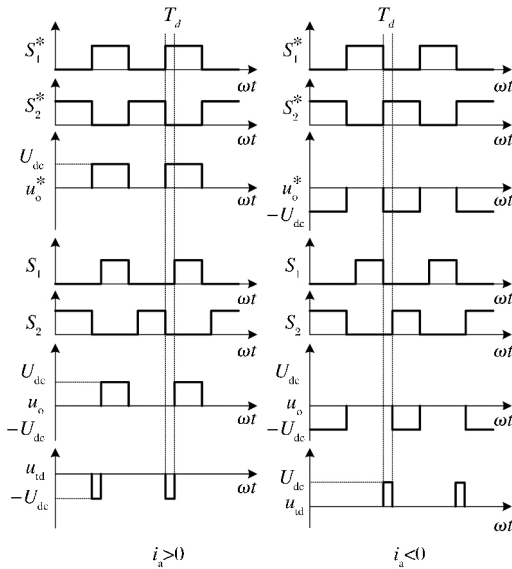


图2 死区原理分析

Fig.2 Dead zone principle analysis

图2中, S_1^* 、 S_2^* 分别为功率管 V_1 、 V_2 的理想驱动信号; S_1 、 S_2 为功率管 V_1 、 V_2 的实际驱动信号; U_{dc} 为逆变器直流侧电压; u_o^* 为逆变器的理想输出电压; u_o 为逆变器的实际输出电压; u_{td} 为逆变器的死区脉冲电压(实际输出电压减去理想输出电压)。由图2可知死区脉冲电压 u_{td} 具有如下特征^[13]:(1)死区脉冲电压 u_{td} 的幅值为常数 U_{dc} ;(2)死区脉冲电压宽度为 T_d ;(3)死区脉冲电压 u_{td} 的极性与输出电流的方向有关,即

$$u_{td} = \begin{cases} -U_{dc}, & i_a > 0 \\ U_{dc}, & i_a < 0 \end{cases}$$

2 H桥逆变器中的死区补偿方法

图2中 u_{td} 是分布不均匀的矩形波,用方波来等价代替矩形波,如图3所示。

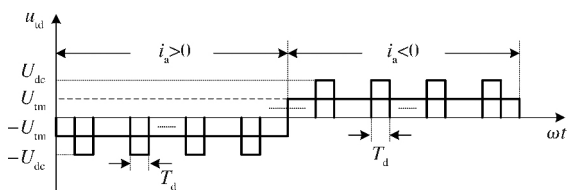


图3 死区脉冲电压等效方波图

Fig.3 Equivalent square wave chart of pulse voltage in dead zone

H桥逆变器中死区补偿脉冲电压等效方波幅值 U_{tm} 为

$$T_d \times U_{dc} \times \frac{F}{2} = \frac{T_r}{2} \times U_{tm}, \quad (1)$$

由式(1)变化后得

$$U_{tm} = \frac{2}{T_r} (T_d \times U_{dc} \times \frac{F}{2}) = \frac{FU_{dc}T_d}{T_r}, \quad (2)$$

其中: $F(F = f_c/f_r)$ 为载波比; f_c 为载波频率; f_r 为调制波频率; T_r 为调制波周期; U_{tm} 表示H桥逆变器死区脉冲电压的等效方波幅值。

进而可求出补偿到调制波上的补偿电压为

$$u_{tm} = \frac{U_{tm} \text{sign}(i_a)}{U_{dc}} = \frac{FU_{dc}T_d}{T_r} \times \frac{\text{sign}(i_a)}{U_{dc}} = \frac{FT_d}{T_r} \text{sign}(i_a), \quad (3)$$

其中: u_{tm} 为补偿到调制波上的补偿电压。

由式(3)可知,该补偿电压的正负取决于对负载电流方向的判断,故对电流方向的准确判断直接影响补偿的精确性。在电流过零区域内,死区不会对逆变器输出电压产生影响,因而无需进行补偿,只需对电流过零区域外的部分进行补偿,以避免在电流过零区域内因对电流方向的误判断而导致的误补偿。因此,对H桥逆变器输出电流过零区域的精确划分就显得尤为重要。电流 $i_a > 0$ 时,当逆变器开关管 V_1 、 V_4 导通时,负载侧电流增大,开关管 V_1 关断, V_4 导通时,负载侧电流减小;同理,电流 $i_a < 0$ 时,开关管 V_2 、 V_3 导通时,负载侧电流反向增大,开关管 V_2 关断, V_3 导通时,负载侧电流减小。因而需要求出H桥逆变器在电流过零区域内开关管 V_1 或 V_2 最大导通时间。

图4为单极性SPWM调制波形图,图中 u_r 为正弦调制波; u_c 为单极性三角载波; U_r 为调制波幅值; U_c 为载波幅值; T_c 为载波周期。根据对称性可知开关管 V_1 的最大导通时间也是开关管 V_2 的最大导通时间。在 $u_r > 0$ 区间,单极性载波三角波表示式为

$$u_c = \begin{cases} \frac{2U_c}{T_c}(t - kT_c) & kT_c \leq t < kT_c + \frac{T_c}{2}, \\ U_c - \frac{2U_c}{T_c}(t - kT_c - \frac{T_c}{2}), & kT_c + \frac{T_c}{2} \leq t < kT_c + T_c, \end{cases} \quad (4)$$

其中: $k=0,1,2,3,\dots$

正弦调制波方程式为

$$u_r = U_r \sin \omega_r t. \quad (5)$$

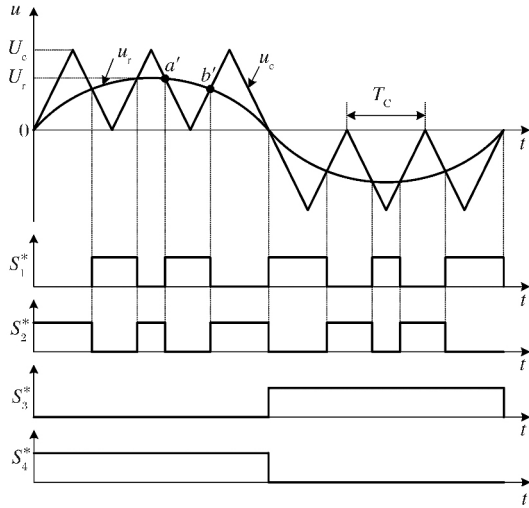


图 4 单极性 SPWM 调制波形图

Fig.4 Unipolar spwm modulation waveform chart

令调制度 $M = U_r/U_c \leq 1$, U_c 保持恒定不变。在采样点 a' 处有 $u_r = u_c$, 则

$$U_r \sin \omega_r t = U_c - \frac{2U_c}{T_c} \left(t_1 - kT_c - \frac{T_c}{2} \right), \quad (6)$$

由式(6)得

$$t_1 = \left(k + 1 - \frac{1}{2} M \sin \omega_r t \right) T_c. \quad (7)$$

同理,在采样点 b' 处有

$$U_r \sin \omega_r t = \frac{2U_c}{T_c} [t_2 - (k + 1)T_c], \quad (8)$$

求解得

$$t_2 = \left(k + 1 + \frac{1}{2} M \sin \omega_r t \right) T_c, \quad (9)$$

则开关管 V_1 的导通时间为

$$\Delta t = t_2 - t_1 = T_c M \sin \omega_r t. \quad (10)$$

根据对称性可知, $u_r < 0$ 时开关管 V_2 的导通时间表示式与式(10)相同。因为电流波形在相位上滞后电压波形 φ , φ 为功率因数角。所以,在电流过零点,开关管 V_1 或 V_2 的导通时间可以表示为

$$\Delta t = T_c M \sin \varphi, \quad (11)$$

在电流过零点时,负载等效电阻两端的电压幅值为

$$U_R = M U_{dc} \sin \varphi. \quad (12)$$

因此,可得电流过零点负载等效电感 L 两端的电压值为

$$U_L = U_{dc} - U_R = U_{dc} - M U_{dc} \sin \varphi = U_{dc} (1 - M \sin \varphi), \quad (13)$$

又因 $U_L = L \frac{\Delta i}{\Delta t}$, 得

$$\Delta i = \frac{U_L}{L} \Delta t. \quad (14)$$

将式(11)和式(13)代入式(14),可得电流变化量为

$$\Delta i = \frac{U_{dc} (1 - M \sin \varphi)}{L} \times T_c M \sin \varphi = \frac{U_{dc} T_c M (1 - M \sin \varphi) \sin \varphi}{2L}. \quad (15)$$

在电流过零区域内,电流正向最大值或负向最大值皆小于 Δi 。当负载电流 $i_a \in (-\Delta i, \Delta i)$ 时,不进行死区补偿,当 $i_a \leq -\Delta i$ 或 $i_a \geq \Delta i$ 时,则根据式(3)将所求得的补偿电压补偿给理想的调制波。由此可得不同电流区域内的补偿电压表达式为

$$u_{tm} = \begin{cases} \frac{FT_d}{T_r}, & i_a \geq \Delta i \\ 0, & |i_a| < \Delta i \\ -\frac{FT_d}{T_r}, & i_a \leq -\Delta i \end{cases} \quad (16)$$

3 仿真分析

研究取直流侧电压 $U_{dc} = 400$ V, 调制波频率 $f_r = 50$ Hz, 载波频率 $f_c = 8000$ Hz, 负载电阻 $R = 10 \Omega$, 负载电感 $L = 3$ mH, 死区时间 $T_d = 2 \times 10^{-5}$ s, 调制度 $M = 0.8$, 将以上参数分别代入式(15)、式(16)可得

$$\Delta i \approx 0.58 \text{ A},$$

$$u_{tm} = \begin{cases} 0.16, & i_a \geq 0.58 \\ 0, & |i_a| < 0.58 \\ -0.16, & i_a \leq -0.58 \end{cases}$$

仿真结果如图 5、图 6、图 7 所示,其中图 5(a)为单相 H 桥逆变器在考虑死区的情况下逆变器的输出电压频谱图。图 5(b)为在此基础上采用基于电流过零区域检测的平均电压前馈补偿法补偿后的输出电压频谱图。由图 5 可知,采用该补偿方法后,逆变器输出电压基波幅值由 235.1 V 增大到 313.8 V, 增大了 78.7 V。同时,低次谐波幅值减小,波形畸变率从 102.28% 减小到 77.79%。

图 6(a)为单相 H 桥逆变器补偿前的输出电流频谱图。图 6(b)为补偿后的输出电流频谱图。由图 6 可知,采用该补偿方法后,逆变器输出电流基波幅值由 23.4 A 增大到 31.24 A。同时,低次谐波幅值减小,电流波形畸变率从 14.13% 减小到 5.92%。

图 7(a)为单相 H 桥逆变器补偿前的输出电流波形图。图 7(b)为补偿后的输出电流波形图。由图 7 可知,采用该补偿方法后,逆变器输出电流波形

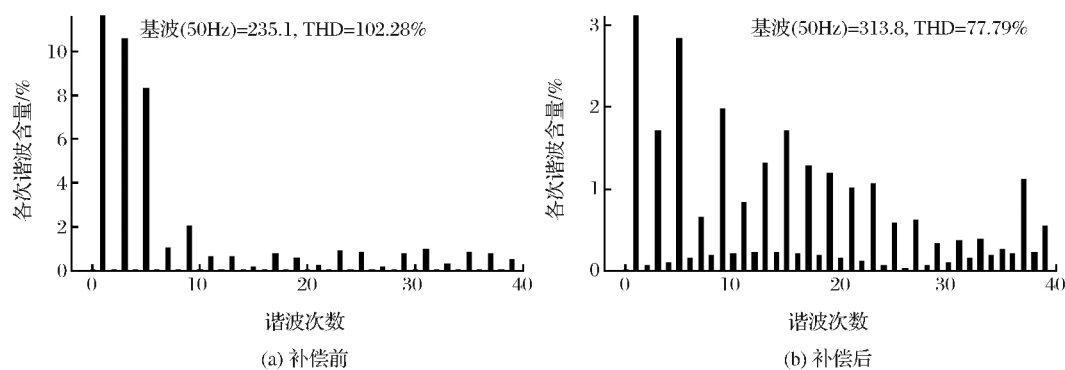


图5 输出电压频谱图

Fig.5 Output voltage spectrogram

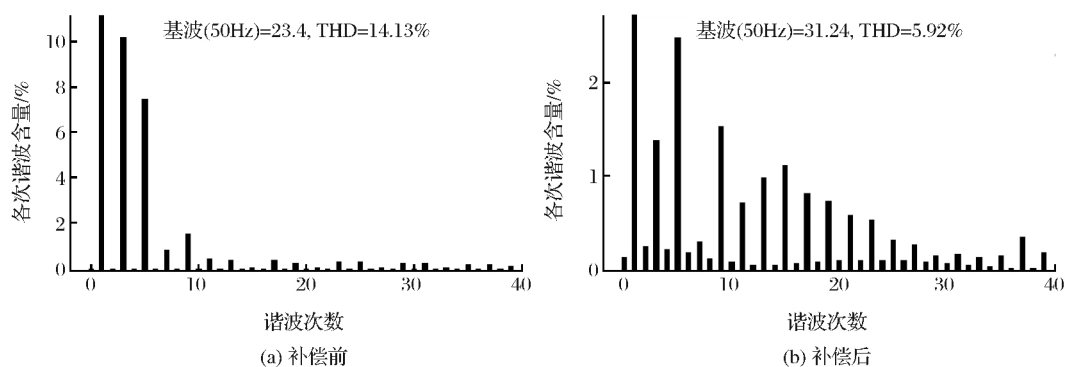


图6 输出电流频谱图

Fig.6 Output current spectrogram

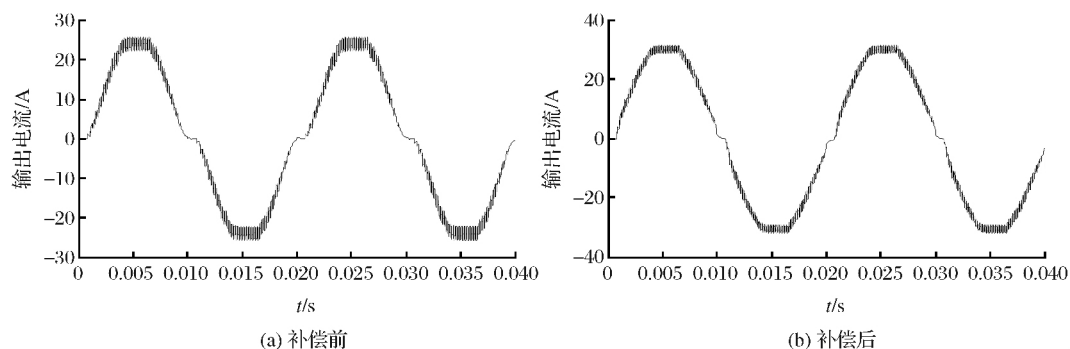


图7 输出电流波形图

Fig.7 Output current waveform chart

得到了明显的改善。

4 结论

针对单相 H 桥逆变器中的死区问题,研究了一种基于电流过零区域检测的平均电压前馈补偿法。该方法对单相 H 桥逆变器输出电流过零区域进行了精确的划分,在电流过零区域内无需进行死区补偿,在电流过零区域以外的范围,求取相应的补偿电压幅值,完成补偿。该方法解决了传统的平均电压前馈补偿法因在电流过零区域内对电流方向的误判

断而导致的误补偿现象。仿真分析结果表明该方法能够有效抑制死区对单相 H 桥逆变器输出电压和电流所产生的影响。

参考文献:

- [1] 缙新科,尹发根,陈莹,等.状态空间平均法在串联型有源电力滤波器建模中的应用[J].甘肃科学学报,2010,22(2):84-86.
- [2] 达正花.电压空间矢量脉宽调制原理[J].甘肃科学学报,2004,16(3):65-68.
- [3] Wu C M, Wing Hong Lau, Shu Hung Chung H. Analytical Technique for Calculating the Output Harmonics of an H-

- bridge Inverter with Dead Time[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems. I: Regular Papers, 1999, 46(5): 617-627.
- [4] Alfredo R Munoz, Thomas A Lipo. On-line Dead-time Compensation Technique for Open-loop PWM-VSI Drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1999, 14(4): 683-689.
- [5] Sam Young Kim, Seung Yub Park. Compensation of Dead-time Effects Based on Adaptive Harmonic Filtering in the Vector-controlled AC Motor Drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(3): 1768-1777.
- [6] Attaianese C, Nardi V, Tomasso Giuseppe. A Novel SVM Strategy for VSI Dead-time-effect Reduction[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(2): 1722-1731.
- [7] 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.
- [8] Chen L H, Peng F Z. Dead-time Elimination for Voltage Source Inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(2): 574-580.
- [9] Wang Y, Gao Q, Cai X. Mixed PWM for Dead-time Elimination and Compensation in a Grid-tied Inverter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(10): 4797-4803.
- [10] Herran M A, Fischer J R, Gonzalez S A, *et al.* Adaptive Dead-time Compensation for Grid-connected PWM Inverters of Single-stage PV Systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(6): 2816-2825.
- [11] 刘栋良, 武瑞斌, 张瑶, 等. 基于模糊控制零电流钳位逆变器死区补偿[J]. 电工技术学报, 2011, 26(8): 119-124.
- [12] 杨波, 吴建德, 李武华, 等. 在线自适应 PWM 死区消除方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(11): 45-52.
- [13] 张彬. 逆变器死区特性的研究及其计算机仿真[D]. 成都: 西南交通大学, 2003.

H Bridge Inverter Dead Zone Compensation Based on Current Zero-crossing Area Detection

Li Wei, Zhang Jinjing

(College of Electrical Engineering and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract After analyzing the dead zone in H bridge inverter, the author will study on the average voltage feedforward compensation approach based on the current zero-crossing area detection. In this traditional average voltage feedforward compensation approach, the output current zero-crossing area in H bridge inverter is accurately divided according to the error compensation phenomenon in the current zero-crossing area. The average voltage feedforward compensation approach shall be taken beyond the current zero-crossing area. In the current zero-crossing area, it is unnecessary to make compensation because the dead zone has no influence on the output voltage. Therefore, the approach can effectively avoid the error compensation phenomenon caused by the current direction misjudgment made by the traditional average voltage feedforward compensation approach in the current zero-crossing area. Ultimately, the author will make use of MATLAB/Simulink software to carry out the simulation verification for the dead zone compensation approach.

Key words Dead zone; Inverter; Compensation approach; H Bridge; Zero-crossing area