

逆变器脉宽调制中基于脉冲的死区补偿方法

杨燕波, 吴庆彪

(东华大学, 上海 201620)

摘要:逆变器 PWM 波形中由于死区时间的存在可能会导致电力电子器件的短路, 最终影响输出波形并降低可靠性。虽然每一个死区时间都很短, 但如果按周期计算的话, 叠加起来的死区会对输出的 PWM 波形产生很大影响。提出了一种修正死区时间的方法, 即基于脉冲的死区补偿方法(PBDTC)。与其他方法相比, 该方法需要的硬件和软件比较少, 且成本较低。该方法在分析单个脉冲死区时间的基础上, 对每个单脉冲进行修正。将实验结果与其他方法进行了比较, 证明该补偿方法较为完美。

关键词:逆变器; 脉宽调制; 死区; 补偿

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 1000-100X(2009)03-0070-03

The Dead-time Compensator Method for PWM Voltage Inverters based on the Pulse

YANG Yan-bo, WU Qing-biao

(Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: The dead time necessary to cause the short circuit of the power supply in PWM voltage inverters results in output voltage errors. Although the individual dead time is small, when accumulated over an operating cycle, the voltage errors are sufficient to distort the applied PWM signal. This paper presents a method called the pulse-based dead-time compensator (PBDTC) to correct the dead-time errors. The PBDTC needs less hardware and software-intensive than other dead-time compensation methods providing a low-cost solution. The pulse-based technique is developed by analyzing the dead time effects on a pulse-by-pulse basis and correcting each pulse accordingly. Other compensation methods are evaluated, and the results are compared with the pulse-based technique. This comparison indicates the proposed method compensating for the dead time is excellent.

Keywords: inverter; pulse width modulation; dead time; compensation

1 引言

在现代电机控制系统中, 大部分变频器均通过输出可变宽度的 PWM 波形来控制电机运转。在电压源逆变器中, 为防止同一桥臂的上、下两个器件发生直通现象, 必须根据不同的功率器件注入一定的死区时间。死区在保证功率开关器件安全、可靠运行的同时, 也给逆变器带来了十分不利的影响。主要表现在两方面: ①由于死区的存在会使输出电压产生偏差, 特别是在低速和 U/f 时影响更明显; ②死区时间的设置会产生附加谐波, 进而增加电机附加损耗, 使转矩发生很大的脉动, 它将引起逆变器输出电流波形的交越失真, 甚至引起电机振荡, 可能导致系统不稳定。由于现代电力电子技术要求开关频率不断提高, 死区宽度对脉冲周期的比例增加, 死区效应对变频器输出电压和输出电流的影响也越来越严重。因此, 对逆变器的死区进行补偿是非常必要的。

2 死区效应的产生及分析

在理想情况下, 作为主电路的 PWM 变流器对

PWM 控制信号进行精确放大, 但在实际运行中输出的电流电压波形会产生一定的畸变, 这种畸变的形成原因主要是功率器件固有开关特性引起的开关延迟和人为插入的控制死区^[1]。在现实情况下, 由于系统 du/dt 的限制, 需要由驱动电阻和功率开关器件的杂散电容来设定一定的开通时间 T_{on} 和关断时间 T_{off} 。通常 $T_{on} < T_{off}$, 很容易发生同桥臂两只开关管同时导通的短路故障。为此, 通常要人为地设置开关时滞 t_d , 在这段时间内 PWM 变流器的输出信号不可控, 它将导致 PWM 变流器输出波形发生畸变。

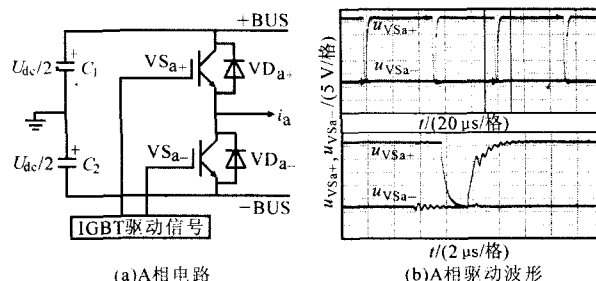


图 1 A 相电路和驱动波形

为分析死区效应, 假定 PWM 变流器中的开关器件是理想的, 以 IGBT 及续流二极管构成的 A 相电路为例, 对 PWM 变流电路死区效应进行分析。

可设死区时间为 t_d , 欲关断的 IGBT 以理想波形

定稿日期: 2008-09-05

作者简介: 杨燕波(1982-), 女, 江苏太仓人, 硕士, 研究方向为电力电子与电力传动。

关断,而欲开通的 IGBT 延迟 t_d 开通;在死区时间内, VS_{a+} 和 VS_{a-} 都不导通,电流通过快恢复二极管 VD_{a+} 和 VD_{a-} 续流。规定电流由桥臂流出时为正方向。当 $i_a > 0$ 时,在死区时间内, i_a 只能通过 VD_{a-} 来续流,输出电压被箝位在 $-Bus$ 。此时,若 VS_{a+} 由关断到导通、 VS_{a-} 由导通到关断,在理想情况下输出电压应为 $+Bus$ 电压,而实际电压为 $-Bus$ 电压,因此与理想情况相比,在死区时间内,输出电压相当于增加了一个幅值为 U_{dc} 、宽度为 t_d 的负脉冲。同理可以分析 $i_a < 0$ 时的情况。当 VS_{a+} 由导通到关断、 VS_{a-} 由关断到导通时,输出电压相当于增加了一个幅值为 U_{dc} 、宽度为 t_d 的正脉冲;当 VS_{a+} 由关断到导通、 VS_{a-} 由导通到关断时,死区对输出没有影响。图 2 示出 A 相桥臂理想输出电压 u_{aideal} (不含死区)、实际输出电压 u_a 以及 A 相误差电压 u_{ae} 的波形。

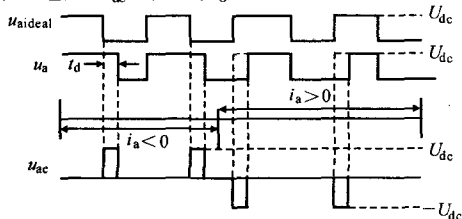


图 2 死区效应波形图

由图可知 $u_{ae} = u_a - u_{aideal}$,它是加入死区后,实际输出电压与理想输出电压的差值。若不计电压上升和下降时间,可将 u_{ae} 看成一系列的电压脉冲,其特点有:①每个开关周期内存在一个偏差电压脉冲;②该偏差电压脉冲幅值为 U_{dc} ,宽度为 t_d ;③每个偏差电压脉冲的极性与当时输出补偿电流的极性相反。

3 基于脉冲的补偿方法

国内外学者对逆变器死区的补偿有许多研究和探讨。通常针对死区引起的电压误差,根据相电流极性先对每相进行预测,然后进行反馈补偿^[2]。有时运用硬件补偿器,根据电流极性测量瞬时电压的变化量,反馈补偿下一开关周期的死区。

这里提出了基于脉冲的死区补偿技术,该补偿技术通过修正 PWM 脉冲来补偿由死区时间引起的电压失真。该方法主要以脉冲为研究对象,可用在输出电压和相位误差不大的 PWM 电压源变频器中。电机本身在低频率下是不稳定的,这是由电机和 PWM 逆变器之间相互干扰,或者 PWM 波形产生方式选择不当^[3]引起的。当交流感应电机由电压源逆变器供电时,定子的电压波形中存在谐波,系统的稳定性将会受到影响,特别是在低频率和无负载的情况下,会增加电机的损耗,降低效率。损耗的大小取决于谐波的大小,额外的谐波将增加电机的热量和转矩跳动。PWM 策略本身的缺点会引起终端电压的失真,特别是逆变器死区时间的加入使失真更加严重。

基于脉冲的死区补偿技术通过软件的方法更新了电力电子器件在 PWM 周期内的开通时间和关断时间^[4]。它根据电流的极性来实现,与频率或系统的运行无关。该方法无需检测当前相位,与其他方法相比减少了 A/D 转换装置和软件部分。

图 3 示出采用 PBDTC 方法在 $i_a > 0$ 或 $i_a < 0$ 时的脉冲修正时间。波形 a 是在 $i_a > 0$ 时, VT_1 从关断到导通和从导通到关断的理想脉冲;波形 b 显示了由于死区时间的存在,实际脉冲中存在的误差。误差可通过软件的算法加以修正,即在因死区存在而产生不对称脉冲之前,在脉冲中增加一个短脉冲时间,如波形 c 所示。增加的脉冲时间通过死区发生器处理,并应用到输出端。经过补偿后的实际脉冲波形如波形 d 所示,它在脉宽和相位上均与波形 a 一致。当 $i_a < 0$ 时,波形 e 显示了由于死区时间的存在,实际脉冲中存在的误差。它也通过软件算法加以修正,即在产生不对称脉冲之前,在脉冲中减去一个短脉冲时间,如波形 f 所示。减去的脉冲时间也通过死区发生器处理,并应用到输出端。波形 g 即为经过处理的实际脉冲,它在脉宽和相位上也均与波形 a 一致。

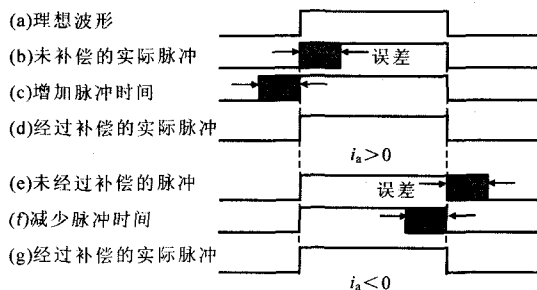


图 3 在 $i_a > 0$ 和 $i_a < 0$ 时的死区补偿原理图

与其他方法相比,基于脉冲的死区补偿无需通过角度计算来决定幅值和相位,从而节省了电流环处理时间,使原系统的带宽不会发生太大变化。该方法修正了死区时间,可用在不同开关特性的电力电子器件上,无需外加检测装置。

基于脉冲的死区补偿采用 32 位 RENESAS SH7149 型 DSP 实现,这种微控制器内部包括 PWM 波形发生器。根据死区时间计数器,通过调整脉冲发生器的脉冲时间来进行死区补偿。该方法操作时与频率无关,但依赖于电流极性。

图 4 示出 U 相 PBDTC 的软件模块。修正取决于增/减计数器的状态。CNT 状态是指减计数对应电力电子器件处于关断状态,而增计数对应电力电子器件处于开通状态,当前的电流极性为 i_a 。这些状态决定了对脉冲时间的修正是增加、减少还是不变。软件算法可根据需要产生理想的 U 相脉冲时间 u_{on} 和 u_{off} 。预定时间 t_d 事先被装载到死区控制寄存器中。U 相电流探测器通过数据总线不断地更新电流极性。波形发生器的中断信息不断更新 CNT 状态位。

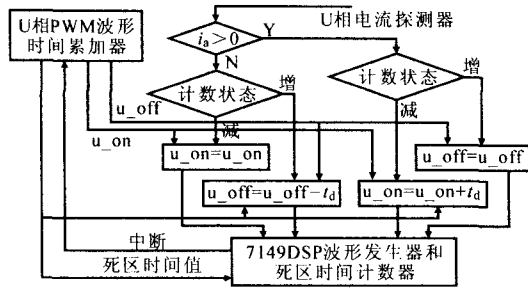


图 4 PBDTC 的软件模块

如果 $i_a > 0$, 且 CNT 状态是减计数状态, 补偿软件将 t_d 值加入 u_{on} , 并且在 u_{on} 中储存正确的数值。该数值被送入波形发生器, 经过死区计数器处理后应用到输出端。实际的输出脉冲波形与理想的脉冲波形一致。

如果 $i_a > 0$, 且 CNT 计数状态是增计数状态, u_{off} 不需要修正, u_{off} 送入波形发生器, 被死区计数器处理后应用到输出端。

如果 $i_a < 0$, 且 CNT 状态是减计数状态, u_{on} 不需要进行修正, u_{on} 被送入波形发生器, 经死区计数器处理后应用到输出端。

如果 $i_a < 0$, 且 CNT 状态是增计数状态, 补偿软件在 u_{off} 里减去 t_d 时间, 并且把减去以后的数值储存在 u_{off} 里, 然后把数值送入波形发生器, 通过死区计数器处理, 最后输出的结果应用到输出端。实际的脉冲波形与理想的脉冲波形一致。在一段时期内循环这一过程就能在电机终端产生一系列理想的脉冲波形。

4 实验结果

将基于脉冲的死区补偿方式加载到 DSP 内, 采用以 2MBI100U4AIGBT 构成的硬件平台, 考虑到系统的 EMC 能力, 将 R_g 分开设计, 设计 $R_{gn}=12\ \Omega$, $R_{gn}=24\ \Omega$, 由硬件形成的死区时间为 $2\ \mu s$ 。电机采用 220 V 永磁同步交流电机, 并在带动可调节负载的平台上作测试。

图 5a 示出不采用死区补偿时, 系统稳态工作在 50 Hz 情况下的电流波形。由图可见, 输出电流含有

丰富的谐波电流。这种情况会导致电机过热, 对长期处于低频工作状态的系统具有较大的危害。

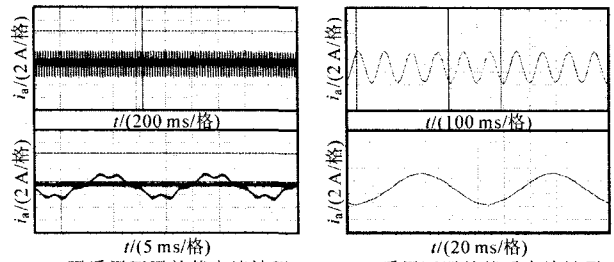


图 5 实验结果

图 5b 示出采用基于脉冲的死区补偿方式后系统的电流波形。可见, 系统在 10 Hz 时具有较好的电流波形, 且谐波含量大大降低。由于脉冲补偿方法具有宽频带, 系统能很快过渡到稳定状态, 使运用到电机终端的电压更加精确。

5 结论

实验结果证明, 运用基于脉冲的补偿方法来驱动交流同步电机, 电机可以运行在稳定状态。这种方法是对每一个小脉冲进行修正, 并且这种修正方式是最优的。实验结果显示该补偿方法可以使输出波形有比较理想的相位和幅值。该方法与载波频率和负载无关, 更重要的是, 它可以应用在开环和闭环系统中, 且与电机特性和 PWM 调节器无关。

参考文献

- [1] 王成, 肖先勇. 基于控制延迟和死区效应补偿的有源滤波器优化控制研究[J]. 电网技术, 2006, 30(7): 59-63.
- [2] 刘亮, 邓名高. 一种补偿 PWM 逆变器死区效应的新方法[J]. 电力电子技术, 2005, 39(6): 123-125.
- [3] R Ueda, T Sonoda, Y Inoue, et al. Unstable Oscillating Motor in PWM Variable Speed Drive of Induction Mode and its Stabilization[A]. in Proc. IEEE-IAS Conf.[C]. 1982: 686-691.
- [4] R S Colby, A K Simlot, M A Halloude. Simplified Model and Corrective Measures for Induction Motor Instabilities caused by PWM Inverter Blanking Time[A]. in Proc. IEEE Power Electronic Specialties Conf.[C]. 1990: 678-683.

(上接第 69 页) 扑可以四象限流过双向能量。

该电路可实现单级升降压式 AC/AC 直接变换。在控制上可采用全周期都调制的 PWM 高频斩波方式 1 或半周期保持导通半周期调制的 PWM 高频斩波方式 2。方式 2 降低了开关损耗, 而由于方式 1 采用固定占空比控制, 不能对输入电压畸变进行抑制。采用简单可靠的滞环电流控制方案, 能对输出电能进行快速有效的调节, 并在输入电压畸变严重时保持输出波形质量。

参考文献

- [1] Fedyczak Zbigniew, Strzelecki Ryszard, Benysek Grzegorz.

Single-phase PWM AC/AC Semiconductor Transformer Topologies and Applications[A]. IEEE APESC[C]. Cairns, Australia, 2002, 2(2): 1048-1053.

- [2] Fang-zheng Peng, Li-hua Chen, Fan Zhang. Simple Topologies of PWM AC/AC Converter[J]. IEEE Power Electronics, 2003, 1(1): 10-13.
- [3] 俞红祥, 纪延超, 林敏. AC-AC 直接变换器的新型谐波抑制脉宽调制技术[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 1-9.
- [4] 石勇, 杨旭, 王兆安. 新型三电平交流斩波电路的输出频谱结构分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 106-110.