

# 三电平逆变器 SVPWM 过调制 控制策略综述

李阳,戴鹏,于月森,曹兴,蒋正友

(中国矿业大学 信息与电气工程学院,江苏 徐州 221008)

**摘要:** 有效地利用过调制控制策略,能够提高逆变器的输出电压,对提高电动机的动态响应速度和扩大稳定运行区域具有重要意义。主要研究了过调制产生的原因,总结了几种典型的过调制控制策略,讨论了它们各自的优缺点,并指出了现有过调制控制策略中存在的问题。

**关键词:** 三电平逆变器;过调制;空间电压矢量脉宽调制

**中图分类号:** TM464 **文献标识码:** A

## Overview of the SVPWM Overmodulation Strategies of Three-level Inverter

LI Yang, DAI Peng, YU Yue-sen, CAO Xing, JIANG Zheng-you

(School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, Jiangsu, China)

**Abstract:** Utilizing overmodulation strategies effectively can improve the inverter output voltage, which is useful for improving the motor dynamic response and extending the stable operation region. The production of overmodulation was analyzed. Several classical overmodulation strategies were summarized, then their advantages and disadvantages were discussed respectively. Finally problems of the existing overmodulation strategies were pointed out.

**Key words:** three-level inverter; overmodulation; space vector pulse width modulation (SVPWM)

## 1 引言

三电平电压型逆变器(VSI)因其具有开关器件电压应力低、输出电压纹波小等优点,在交流传动、不间断电源和有源滤波器等高性能电力电子装置中得到了广泛的应用<sup>[1,2]</sup>。三电平 VSI 中 PWM 调制方法主要分为采用基于载波比较的脉宽调制技术或基于电压空间矢量的脉宽调制技术(SVPWM)。SVPWM 因其易于实现,电压利用率高,输出电流谐波成分少,低脉动转矩等优点<sup>[2]</sup>,在高性能交流调速系统中得到广泛应用。

20 世纪 90 年代以前,几乎所有对 SVPWM 策略的研究都局限在线性调制范围内。随着人们对电机输出转矩或逆变器低压适用性要求的提高,从 20 世纪 90 年代初开始,越来越多的学者开始致力于 SVPWM 策略在过调制范围内特性的研究,如典型单、双模式过调制<sup>[3,4]</sup>、基于空间矢

量分类技术过调制<sup>[5~7]</sup>、基于叠加原理 SVPWM 过调制<sup>[8]</sup>等。在不增加任何硬件的情况下,有效的 SVPWM 过调制策略可以用非线性过调制区将线性调制区和系统最大可能输出(6 阶梯波)进行平滑衔接,系统的调制范围能够由线性调制区的最大范围 0~90.7% 扩展到 0~100%<sup>[9]</sup>,可以满足多数高转矩输出或低电压场合的需求,但是过调制策略不可避免地引起了逆变器输出电流畸变,特别是 6 次谐波<sup>[10,11]</sup>。

本文分析了过调制产生的原因,总结了几种典型的过调制控制策略,讨论了它们各自的优缺点,并指出了现有过调制策略中存在的问题。

## 2 三电平逆变器矢量及过调制

图 1 为三电平逆变器电压空间状态矢量图<sup>[12]</sup>,其中包括 6 个长矢量,6 个中矢量,12 个短矢量和 3 个零矢量。

基金项目:中国矿业大学青年科研基金(2007A016)

作者简介:李阳(1986-),男,硕士研究生,Email:lycumt2004@163.com

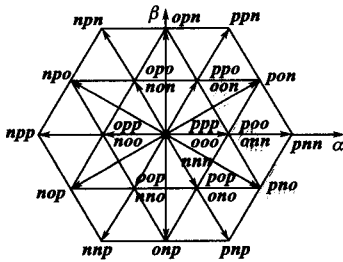


图1 三电平逆变器电压空间状态矢量图  
Fig.1 Space vector state of three-level inverter

只要参考电压矢量  $V_{ref}$  的端点轨迹位于六边形的内切圆内,根据伏秒平衡原则,就可以利用逆变器的开关状态合成  $V_{ref}$ ,且  $V_{ref}$  端点轨迹为六边形内切圆时达到线性最大调制度,调制度为 90.7%(定义调制度  $m=|V_{ref}|/(2U_{dc}/\pi)$ ),见图 2。

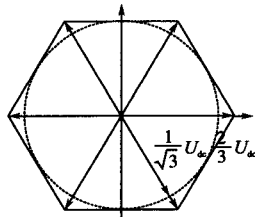


图2 最大线性调制  
Fig.2 The maximum linear modulation

随着  $V_{ref}$  幅值的进一步增大,其端点轨迹将超出六边形, SVPWM 出现过调制。在过调制区,没有任何电压矢量可在  $T_s$  时间内准确合成它,若仍按传统的调制方法计算,有些电压矢量作用时间可能为负数。如不对参考电压矢量的幅值进行限制,就会导致系统实际输出衰减,无法跟踪指令电压,输出的电压、电流波形发生畸变,对整个系统的控制产生极为不利的影

### 3 过调制控制策略

针对过调制运行时出现的问题,国内外很多学者进行了研究,至今已取得了多项成果<sup>[13~35]</sup>,下面介绍几种典型的过调制策略。

#### 3.1 最小相角误差过调制策略

其基本原理是:对  $V_{ref}$  的端点轨迹超出六边形的部分,保持  $V_{ref}$  的相位角不变,将  $V_{ref}$  的端点强制固定在六边形上形成新的矢量  $V'$ ,同时未超出六边形的部分仍保留为圆形。因此,最后  $V_{ref}$  的端点轨迹为  $ab$  段圆弧、 $bc$  段直线、 $cd$  段圆弧,如图 3 所示。因为  $V'$  与  $V_{ref}$  有相同的相角,故这种方法具有最小相角误差的优点。

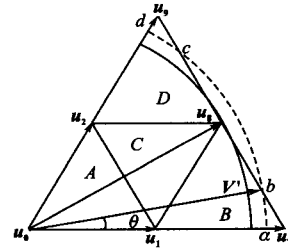


图3 最小相角误差过调制示意图  
Fig.3 The minimum phase angle error overmodulation diagram

这种方法比较简单,易于实现,但其最大调制度只能达到 95.2%,即  $V'$  的端点轨迹为电压矢量组成的六边形时,不能充分利用直流母线电压。

#### 3.2 最小幅值误差过调制策略

在 3.1 节的方法中,当  $V_{ref}$  的端点位于六边形之外时,将其投影到六边形的  $ab$  边上,形成以点  $c$  为端点的新参考电压矢量  $V'$ ,如图 4 所示。可以看出,在端点位于六边形边上的矢量中,  $V'$  与  $V_{ref}$  之间误差矢量的幅值最小,故称为最小幅值误差过调制。当  $|V_{ref}| > 2U_{dc}/\pi$  时,如果  $V_{ref}$  比较靠近顶点  $a$ ,则  $V_{ref}$  的投影点将落在  $ab$  边之外,可令  $\theta' = 0$ ,用  $u_7$  代替  $V_{ref}$ ;同样,如果  $V_{ref}$  比较靠近顶点  $b$ ,则  $V_{ref}$  的投影点也将落在  $ab$  边之外,可令  $\theta' = \pi/3$ ,用  $u_6$  代替  $V_{ref}$ 。如果  $|V_{ref}|$  足够大,随着  $V_{ref}$  的旋转,  $V_{ref}$  的端点在六边形的一个顶点停留一段时间以后,直接跳到另一个端点,轨迹就是六边形的 6 个顶点。

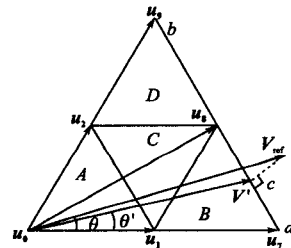


图4 最小幅值误差过调制示意图  
Fig.4 The minimum amplitude error overmodulation diagram

这种方法较 3.1 节中的方法复杂,计算量大,电压、电流波形失真程度也比最小相角误差过调制大。然而,它可以达到最大调制度为 1,此时输出电压基波幅值为  $2U_{dc}/\pi$ ,充分利用了直流母线电压<sup>[22]</sup>。

#### 3.3 典型双模式过调制策略

这种方法借鉴了 Joachim Holtz 的思想<sup>[3]</sup>,将

过调制区分为 2 部分:  $0.907 \leq m \leq 0.952$  (mode 1) 和  $0.952 \leq m \leq 1.0$  (mode 2)。在 mode 1 中,不修改参考电压矢量角  $\theta_r$ , 而仅根据离线得到的  $\theta_r$  与调制度  $m$  的非线性关系对参考电压矢量的幅值进行修改; 在 mode 2 中, 根据离线计算得到的保持角  $\theta_h$  与调制度  $m$  的非线性关系, 同时修改参考电压矢量的幅值和相位。修正后的电压矢量端点轨迹如图 5 中黑粗线所示。Mode 2 中, 当  $\theta_h = \pi/6$  时, 达到最大可能输出, 此时调制度  $m$  为 1, 修正后的参考电压矢量仅为 6 个大矢量之一, 输出电压为 6 阶梯波。

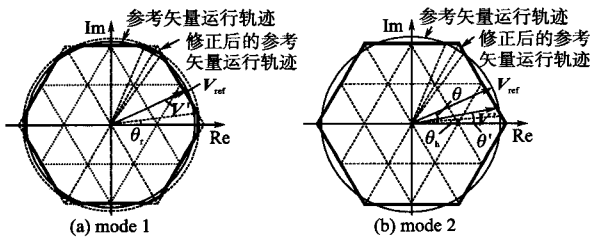


图 5 典型双模式过调制

Fig. 5 The typical dual-mode overmodulation

这种方法有较低的谐波畸变率 (THD), 但是有相对复杂的控制算法, 并且查表需要较大的内存空间<sup>[21]</sup>, 因此适合于对谐波指标要求较高的应用。

### 3.4 典型单模式过调制策略

这种方法借鉴了 S. Bolognani 的思想<sup>[4]</sup>, 通过离线计算得到修改后的参考电压矢量的幅值与  $m$  的非线性关系, 同时修改参考电压矢量的幅值和相位, 用一种控制模式即可实现从线性区到最大调制的平滑过渡。修正后的电压矢量运行轨迹如图 6 中黑粗线所示。

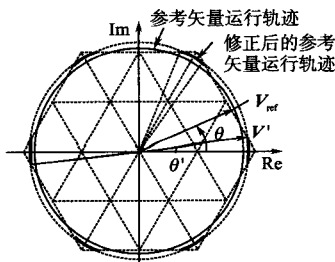


图 6 典型单模式过调制

Fig. 6 The typical single-mode overmodulation

和 3.3 节中的过调制策略相比, 这种方法虽然 THD 较大, 会造成电机的转矩脉动增大和效率降低, 但控制算法简单, 用简单的近似线性计算

代替查表, 节省了内存空间<sup>[33]</sup>。此外, 单模式也能比双模式做到更高的开关频率, 因此能够抵消部分谐波特性的不足。

除了以上介绍的几种典型算法外, 文献[7]提出了基于空间矢量分类技术的过调制算法, 其思想和 3.3 节提到的典型双模式相似, 但这种算法的计算速度比传统的 SVPWM 算法要快的多。文献[8]提出了一种基于叠加原理的两电平 SVPWM 过调制算法, 易于数字实现, 能够实现线性调制和 6 拍波之间的平滑过渡, 输出电压谐波也得到抑制, 但由于三电平逆变器结构复杂, 实现起来比较困难。文献[14]提出了一种基于基波电压幅值线性输出控制的 SVPWM 算法, 不需要存储数据, 易于数字化实现, 但谐波含量高。文献[15]提出了 SVPWM 两相过调制技术。文献[16]提出了限定轨迹双模式过调制技术, 但都仅适用于两电平逆变器。文献[17]基于参考电压傅立叶级数展开, 提出了一种过调制方法。文献[18]在傅立叶谐波分析的基础上, 提出了一种基于角度控制的分段 SVPWM 过调制算法, 但只是应用在两电平 SVPWM 算法中, 在三电平中的应用有待研究。文献[20]提出了磁场定向控制中的 SVPWM 过调制策略, 其思想和 3.3 节中的方法类似。文献[24]介绍了过调制策略在电流型逆变器中的应用。文献[25]介绍了过调制策略在双级矩阵变换器中的应用。

## 4 现有过调制策略存在的问题

过调制控制策略是在人们对电机输出转矩及逆变器低压适用性要求提高的呼声下应运而生的。采用过调制策略, 能提高逆变器的输出电压, 获得高转矩输出, 缩短电动机的动态响应时间, 扩大稳定运行区域<sup>[28]</sup>。尽管许多文献都报道了过调制策略在逆变器中的应用, 但也存在着有待解决的问题。

1) 谐波电流问题。在过调制区尽管采用过调制控制策略, 仍不可避免地引入谐波电流, 而谐波电流的出现将造成电机转矩脉动增大, 效率降低。

2) 中点电位平衡问题。在过调制控制策略中, 当参考电压矢量落于六边形之外时, 其端点将被“拉回”六边形之内或固定在六边形边上, 导致合成它的中矢量的作用时间发生变化。由文献[12]知, 在三电平 VSI 中, 中矢量对中点电位平衡有影响, 并且这种影响是不可控的。因此, 在充

分利用过调制区的同时,如何有效控制中点电位平衡仍有待研究。

## 5 结论

本文分析了过调制产生的原因,总结了几种典型的过调制控制策略,并指出现有过调制控制策略中存在的问题。采用过调制控制策略,能够提高逆变器的输出电压,对提高电动机的动态响应速度和扩大稳定运行区域具有重要意义。随着人们对电机输出转矩或逆变器低压适用性要求的提高,过调制控制策略得到了广泛的应用,但同时也引入了一些问题,如谐波畸变、中点电位波动等。尽管目前存在许多过调制控制策略,然而很少有人尝试把这些引发的问题同过调制结合在一起进行探讨,这种尝试可能为新的过调制控制策略的产生提供契机。目前,这对于国内外的研究者而言仍是一个新课题,相信这一课题将很快受到学者们的高度关注。

### 参考文献

- [1] 李明,马小平,陈爱丽. 一种改进的三电平逆变器空间电压矢量 PWM 控制技术[J]. 东南大学学报,2003,23(增刊): 179-183.
- [2] 陈鑫兵,何礼高. 三电平逆变器空间矢量过调制控制策略的研究[J]. 电气应用,2006,25(5):22-25.
- [3] Joachim Holtz, Wolfgang Lotzkat, Ashwin M Khambadkone. On Continuous Control of PWM Inverters in the Overmodulation Range Including the Six-step Mode[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,1993,8(4):546-553.
- [4] Silverio Bolognani, Mauro Zigliotto. Novel Digital Continuous Control of SVM Inverters in the Overmodulation Range [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,1997,33(2):525-530.
- [5] Bakhshai A R, Rad H R S, Joos G. Space Vector Modulation Based on Classification Method in Three-phase Multi-level Voltage Source Inverter[C]//IAS2001, IEEE, 2001, 1:597-602.
- [6] Saeedifard M, Bakhshai A R. Vector Classification and Voltage Control in PWM Three-level Inverters[C]//PESC2004, IEEE, 2004, 1:4411-4417.
- [7] Maryam Saeedifard, Alireza Bakhshai. Neuro-computing Vector Classification SVM Schemes to Integrate the Overmodulation Region in Neutral Point Clamped (NPC) Converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2007,22(3):995-1004.
- [8] 樊杨,瞿文龙,陆海峰,等. 基于叠加原理的 SVPWM 过调制算法[J]. 清华大学学报,2008,48(4):461-464.
- [9] 金舜,钟彦儒,程为彬. 新颖的 SVPWM 过调制策略及其在三电平逆变器中的应用[J]. 中国电机工程学报,2006,26(20):84-90.
- [10] Smith Lerdudomsak, Shinji Doki, Shigeru Okuma. Harmonic Currents Estimation and Compensation for Current Control System of PMSM in Overmodulation Range. A Analysis for Robustness to Parameter Variations[C]//IECON2008, IEEE, 2008:1216-1221.
- [11] Jin Sik Park, Shin Myoung Jung, Hag Wone Kim, et al. A Study on Stable Torque Control in Overmodulation Region for High Speed PMSM Systems[C]//PESC2008, IEEE, 2008:2373-2377.
- [12] 李永东,肖曦,高跃. 大容量多电平变换器——原理·控制·应用[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [13] Subrata K Mondal, Bimal K Bose, Valentin Oleschuk, et al. Space Vector Pulse Width Modulation of Three-level Inverter Extending Operation into Overmodulation Region [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2003,8(2): 604-611.
- [14] 张立伟,刘钧,温旭辉,等. 基于基波电压幅值线性输出控制的 SVPWM 过调制新算法[J]. 中国电机工程学报, 2005,25(19):12-18.
- [15] 周熙炜,刘卫国,马瑞卿,等. 一种 SVPWM 两相调制的过调制技术实现[J]. 电力电子技术,2008,42(1):75-77.
- [16] 高莹,谢吉华,李庚. SVPWM 过调制算法的分析和仿真 [J]. 微特电机,2007(6):5-7.
- [17] Lee Dong-choon, Lee G-myung. A Novel Overmodulation Technique for Space Vector PWM Inverter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1998, 6(13): 1144-1150.
- [18] 张立伟,温旭辉,刘钧,等. 一种新颖的分段连续控制 SVPWM 过调制算法[J]. 电机与控制应用,2005,32(7): 19-23.
- [19] Md Zarafi Ahmad, Idris N R N, Yatim A H M. Overmodulation and Field Weakening in Direct Torque Control of Induction Motor Drives[C]//IEMDC2007, IEEE, 2007, 1: 398-402.
- [20] 刘洋,赵金. 磁场定向控制中的 SVPWM 过调制策略的改进与实现[J]. 电气传动,2008,38(3):33-36.
- [21] 金舜,钟彦儒,程为彬. 应用单双模式过调制技术的三电平 SVPWM[J]. 西安理工大学学报,2006,22(1):5-9.
- [22] 杨文强,蔡旭,姜建国. 空间电压矢量 PWM 的过调制策略 [J]. 上海交通大学学报,2005,39(增刊):53-56.
- [23] Davood Yazdani, Ali Khajehoddin S, Alireza Bakhshai, et al. Full Utilization of the Inverter in Split-phase Drives by Means of a Dual Three-phase Space Vector Classification Algorithm[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2009,56(1):120-129.
- [24] 谈龙成,李耀华,王平,等. 适用于电流型变频器的空间矢量过调制策略[J]. 中国电机工程学报,2008,28(15): 39-43.
- [25] 栗梅,李丹云,孙尧,等. 双矩阵变换器的过调制策略[J]. 中国电机工程学报,2008,28(3):47-52.

由于在实际电压值采样会出现毛刺,求导的过程会出现误差,需要选取合理的判断条件;针对三相不对称的故障,采用正序检测算法,该方法能够较好地检测出基波正序分量的有效值和相角,但是跌落时刻和恢复时刻的检测存在一定延迟。

#### 参考文献

- [1] Naidoo R, Pillay P. A New Method of Voltage Sag and Swell Detection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(2): 1056-1063.
- [2] Kai D, Cheng K W E, Xue X D, *et al.* A Novel Detection Method for Voltage Voltage Sags[C] // 2006 2nd International Conference on Power Electronics Systems and Applications, ICPEA, 2006: 251-256.
- [3] Montero Hernandez O C, Enjeti P N. A Fast Detection Algorithm Suitable for Mitigation of Numerous Power Quality Disturbances[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(6): 1684-1690.
- [4] 肖冰, 梁军, 路平. 一种基于派克变换的电压跌落检测改进离散算法[J]. 继电器, 2005, 33(13): 50-53, 59.
- [5] 赵凤展, 杨仁刚. 基于短时傅里叶变换的电压暂降扰动检测[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 28-34, 109.
- [6] 胡书举, 李建林, 李梅. 风电系统实现 LVRT 的电网电压跌落检测方法[J]. 大功率变流技术, 2008(6): 17-21.
- [7] Luna A, Rodriguez P, Teodorescu R, *et al.* Low Voltage Ride Through Strategies for SCIG Wind Turbines in Distributed Power Generation Systems[C] // IEEE Power Electronic Specialists Conference, 2008, 1-10: 2333-2339.
- [8] Rodriguez P, Teodorescu R, Candela I, *et al.* New Positive-sequence Voltage Detector for Grid Synchronization of Power Converters under Faulty Grid Conditions[C] // IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2006, 1-7: 692-698.
- [9] 袁川, 杨洪耕. 改进的电压凹陷特征量实时检测方法[J]. 继电器, 2005, 33(22): 57-60.
- [10] 冯小明, 杨仁刚. 动态电压恢复器的形态学-dq变换综合检测算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 193-198.
- [11] Yuan X, Merk W, Stemmler H, *et al.* Stationary-frame Generalized Integrators for Current Control of Active Power Filters with Zero Steady-state Error for Current Harmonics of Concern under Unbalanced and Distorted Operating Conditions[C] // IEEE Trans. on Ind. Applicat., 2002, 38: 523-53.
- [12] Teodorescu R, Blaabjerg F, Borup U, *et al.* A New control Structure for Grid-connected LCL PV Inverters with Zero Steady-state Error and Selective Harmonic Compensation[C] // in Proc. IEEE App. Power Electron. Conf. and Exp. APEC, 2004, 1: 580-586.
- [13] Dragan Jovicic. Phase Locked Loop System for FACTS[C] // IEEE. Trans. on Power Systems, 2003, 18: 1116-1124.
- [14] 周鹏, 贺益康, 胡家兵. 电网不平衡状态下风电机组运行控制中电压同步信号的检测[J]. 电工技术学报, 2008, 23(5): 108-113.
- [15] 收稿日期: 2009-09-17  
修改稿日期: 2010-02-25
- [16] Jaemoon Lee, Jaeho Choi, Yasuyuki Nishida. Overmodulation Strategy of NPC Type 3-level Inverter for Traction Drives[C] // ICPE, 2007: 137-142.
- [17] Wen Xiaoyan, Yang Zhongping, Zhang Liwei, *et al.* A Novel Modulation Strategy Based on SVPWM Natural Overmodulation Characteristic[C] // ICIEA2008, IEEE, 2008: 1092-1095.
- [18] 梁振鸿. PWM过调制技术在电动汽车用永磁同步电机控制中的应用[D]. 北京: 中国科学院, 2002.
- [19] Jidin A, Idris N R N, Yatim A H M. A Simple Overmodulation Strategy in DTC-Hysteresis Based Induction Machine Drives[C] // PECon, 2008: 722-725.
- [20] Jidin A, Idris N R N, Yatim A H M. A Novel Overmodulation and Field Weakening Strategy for Direct Torque Control of Induction Machines[C] // IAS2008. IEEE, 2008: 1-8.
- [21] Anshuman Tripathi, Ashwin M Khambadkone, Panda S K. Direct Method of Overmodulation with Integrated Closed Loop Stator Flux Vector Control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(5): 1161-1168.
- [22] Narayanan G, Ranganathan V T. Extension of Operation of Space Vector PWM Strategies with Low Switching Frequencies Using Different Overmodulation Algorithms[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17(5): 788-798.
- [23] 张艳芳, 林飞, 马志文, 等. 两种 SVPWM 过调制方法的比较研究[J]. 北京交通大学学报, 2005, 29(2): 39-43.
- [24] Seok Jul-ki, Sul Seung-ki. A New Overmodulation Strategy for Induction Motor Drive Using Space Vector PWM[C] // APEC, 1995, 1: 211-216.
- [25] Subrata Mondal, Joao O P Pinto, Bimal K Bose, *et al.* A Neural Network Based Space Vector PWM Controller for a Three-level Voltage-fed Inverter Induction Motor Drive[C] // IAS2001, IEEE, 2001, 3: 1679-1686.
- [26] 收稿日期: 2009-09-30  
修改稿日期: 2010-02-08

(上接第 11 页)

- [26] Jaemoon Lee, Jaeho Choi, Yasuyuki Nishida. Overmodulation Strategy of NPC Type 3-level Inverter for Traction Drives[C] // ICPE, 2007: 137-142.
- [27] Wen Xiaoyan, Yang Zhongping, Zhang Liwei, *et al.* A Novel Modulation Strategy Based on SVPWM Natural Overmodulation Characteristic[C] // ICIEA2008, IEEE, 2008: 1092-1095.
- [28] 梁振鸿. PWM过调制技术在电动汽车用永磁同步电机控制中的应用[D]. 北京: 中国科学院, 2002.
- [29] Jidin A, Idris N R N, Yatim A H M. A Simple Overmodulation Strategy in DTC-Hysteresis Based Induction Machine Drives[C] // PECon, 2008: 722-725.
- [30] Jidin A, Idris N R N, Yatim A H M. A Novel Overmodulation and Field Weakening Strategy for Direct Torque Control of Induction Machines[C] // IAS2008. IEEE, 2008: 1-8.
- [31] Anshuman Tripathi, Ashwin M Khambadkone, Panda S K. Direct Method of Overmodulation with Integrated Closed Loop Stator Flux Vector Control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(5): 1161-1168.
- [32] Narayanan G, Ranganathan V T. Extension of Operation of Space Vector PWM Strategies with Low Switching Frequencies Using Different Overmodulation Algorithms[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17(5): 788-798.
- [33] 张艳芳, 林飞, 马志文, 等. 两种 SVPWM 过调制方法的比较研究[J]. 北京交通大学学报, 2005, 29(2): 39-43.
- [34] Seok Jul-ki, Sul Seung-ki. A New Overmodulation Strategy for Induction Motor Drive Using Space Vector PWM[C] // APEC, 1995, 1: 211-216.
- [35] Subrata Mondal, Joao O P Pinto, Bimal K Bose, *et al.* A Neural Network Based Space Vector PWM Controller for a Three-level Voltage-fed Inverter Induction Motor Drive[C] // IAS2001, IEEE, 2001, 3: 1679-1686.
- [26] 收稿日期: 2009-09-30  
修改稿日期: 2010-02-08