

© [2008] IEEE. Reprinted, with permission, from Wang, Zhengguang., Jin, Jianxun., Guo, Youguang., Zhan, Yuedong., & Zhu, Jianguo. 2008, 'Modelling and Simulation of PMSM Control System Based on SVPWM', Proceedings of the 27th Chinese Control Conference, pp. 724-728. This material is posted here with permission of the IEEE. Such permission of the IEEE does not in any way imply IEEE endorsement of any of the University of Technology, Sydney's products or services. Internal or personal use of this material is permitted. However, permission to reprint/republish this material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution must be obtained from the IEEE by writing to permissions@ieee.org. By choosing to view this document, you agree to all provisions of the copyright laws protecting it.

基于SVPWM的永磁同步电机控制系统模型仿真

王争光¹, 金建勋¹, 郭有光², 詹跃东^{3,2}, 朱建国²

1. 电子科技大学自动化工程学院, 应用超导与电工技术研究中心, 成都 中国 610054

E-mail: zhengguangw@163.com, jxjin@uestc.edu.cn

2. 悉尼理工大学工程系, 悉尼, 澳大利亚 2007

E-mail: youguang@eng.uts.edu.au, joe@eng.uts.edu.au

3. 昆明理工大学, 昆明 中国 150001

E-mail: yuedong@eng.uts.edu.au

摘 要: 本文简单介绍了电压空间矢量脉宽调制(SVPWM)技术的原理,详细地阐述了在MATLAB/SIMULINK环境下实现电压空间矢量的方法,结合永磁同步电机构建了交流伺服控制系统的仿真模型,仿真波形达到了预期效果,证明了该模型的有效性,同时也为永磁同步电机的软硬件设计提供了理论基础。

关键词: 电压空间矢量脉宽调制,永磁同步电机,建模与仿真

Modeling and Simulation of PMSM Control System Based on SVPWM

WANG Zheng-guang¹, JIN Jian-xun¹, GUO You-guang², ZHAN Yue-dong^{3,2}, and ZHU Jian-guo²

1. Center of Applied Superconductivity and Electrical Engineering,
University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, China 610054

E-mail: zhengguangw@163.com jxjin@uestc.edu.cn

2. Faculty of Engineering, University of Technology, Sydney, NSW 2007, Australia

E-mail: youguang@eng.uts.edu.au joe@eng.uts.edu.au

3. Kunming University of Science and Technology, Kunming, China 150001

E-mail: yuedong@eng.uts.edu.au

Abstract: The paper introduces the basic principle of space vector pulse width modulation simply and expatiates a method for implementing space vector pulse width modulation in detail based on MATLAB/SIMULINK, designs modeling and simulation of AC servo system with PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor), the simulation results show that the model is effective, and the method provides a base for both software and hardware design of an actual PMSM.

Key words: Space vector pulse width modulation, PMSM, modeling and simulation

1 引言 (Introduction)

随着电力电子技术、微型计算机技术、稀土永磁材料和控制理论的飞速发展,交流电机的数字化控制越来越被广泛地应用。空间矢量脉宽调制(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM)是根据变频器空间电压矢量切换来控制变频器。电压空间矢量PWM控制策略由日本学者在20世纪80年代针对交流电机变频调速提出的,其主要思路是采用逆变器空间矢量电压的切换以获得准圆形旋转磁场,从而使逆变器输出适当波形的电压,这就是磁链轨迹跟踪脉宽调制的基本原理^[1-6]。电压空间矢量脉宽调制的出发点与

正弦脉宽矢量调制(Sine Pulse Width Modulation, SPWM)不同,SPWM调制是从三相交流电压出发,其着眼点是如何生成一个可以调压调频的三相对称正弦电压波形。而SVPWM是将逆变器和电动机看成一个整体,用八个基本电压矢量合成期望的电压矢量,建立逆变器功率器件的开关状态,并依据电机磁链和电压的关系,从而实现对电动机恒磁通变压变频调速。若忽略定子电阻压降,当定子绕组施加理想的正弦电压时,由于电压空间矢量为等幅的旋转矢量,故气隙磁通以恒定的角速度旋转,轨迹为圆形^[7-8]。本文针对具有体积小、重量轻、效率高、转动惯量小、可靠性高等优点的永磁同步电机所建立的PMSM交流伺服控制系统的数学模型,能更好实现永磁同步电机交流伺服系统数字化控制。

2 SVPWM原理(Principle of SVPWM)

SVPWM是通过逆变器功率器件的不同开关模式产生有效电压矢量来逼近基准圆，图1是一个典型的三相电压源逆变器模型^[9]。对于三相电压型逆变器电路，每相桥臂都可以被看作一个开关S，开关函数 $S_A(t)$ 、 $S_B(t)$ 、 $S_C(t)$ 表示三个上桥臂的开关状态。

相应的逆变器输出电压空间矢量可表示为

$$V(S_A, S_B, S_C) = 2V_{dc}(S_A + \alpha S_B + \alpha^2 S_C)/3 \quad (1)$$

V_{dc} 其中为变频器的直流母线上的电压， $\alpha = e^{j120^\circ}$ 。如果把上桥臂功率开关器件的导通状态用“1”表示，关断用“0”表示，上桥臂三个功率开关器件的开关状态共有八种组合，构成了对应的八个电压空间矢量，如下图2所示^[10-11]。图中 $V_0(000)$ 和 $V_7(111)$ 称为零电压空间矢量，其余六个矢量称为有效矢量，其模为 $2V_{dc}/3$ ，若 V 在I区时，则 V 可以由 V_4 、 V_6 、 V_0 和 V_7 合成，依据平行四边形法则，有

$$T_4 V_4/T + T_6 V_6/T = TV_{out} \quad (2)$$

逆变器的八种开关状态如表1所示。

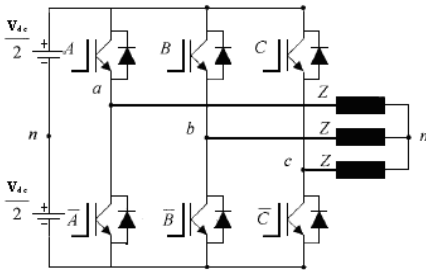


图1：逆变器模型

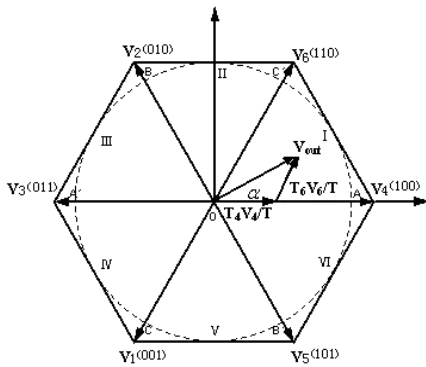


图2：两电平电压空间矢量

表1：逆变器的八种开关状态

逆变器状态	$S_A S_B S_C$	V_A/V_{dc}	V_B/V_{dc}	V_C/V_{dc}
0	000	0	0	0
1	001	-1/3	-1/3	2/3
2	010	-1/3	2/3	-1/3
3	011	-2/3	1/3	1/3
4	100	2/3	-1/3	-1/3
5	101	1/3	-2/3	1/3
6	110	1/3	1/3	-2/3
7	111	0	0	0

3 SVPWM的SIMULINK仿真(Simulation of SVPWM with SIMULINK)

由SVPWM的原理可知，产生SVPWM波形的仿真模块主要包括：扇区判断模块、计算基本矢量的作用时间模块、开关作用时间的计算模块、SVPWM波形的生成模块等。

3.1 扇区判断(Estimation of Sector)

在应用SVPWM技术时，首先要确定合成电压矢量所处的扇区，由于矢量的直角坐标形式适合矢量控制，所以扇区的确定采用如下方法。

扇区与 V_α 、 V_β 的关系有：当 $V_\beta > 0$ 时，令 $A=1$ ；当 $\sqrt{3}V_\alpha - V_\beta > 0$ 时，令 $B=1$ ；当 $\sqrt{3}V_\alpha + V_\beta < 0$ 时，令 $C=1$ 。由 $N=A+2B+4C$ 可知，扇区与N的对应关系如表1，模型如图3所示。

表2：扇区与N的对应关系

扇区	I	II	III	IV	V	VI
N	3	1	5	4	6	2

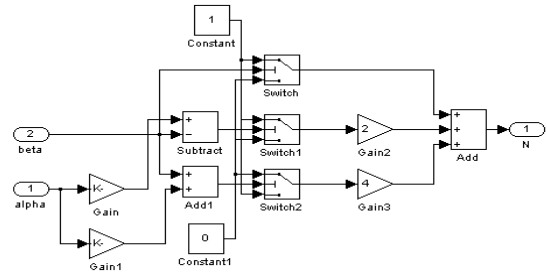


图3：扇区判断模型

3.2 计算基本矢量的作用时间(Calculation of Effect Time of Basic Vector)

令 $Z = T(-\sqrt{3}V_\alpha + V_\beta)/(\sqrt{2}V_{dc})$ ， $Y = T(\sqrt{3}V_\alpha + V_\beta)/(\sqrt{2}V_{dc})$ ， $X = 2TV_\beta/(\sqrt{2}V_{dc})$ ，则N与矢量作用时间 T_1 和 T_m 的对应关系如表3所示，计算模型如图4所示。

表3：基本矢量作用时间

N	1	2	3	4	5	6
T_1	Z	Y	-Z	-X	X	-Y
T_m	Y	-X	X	Z	-Y	-Z

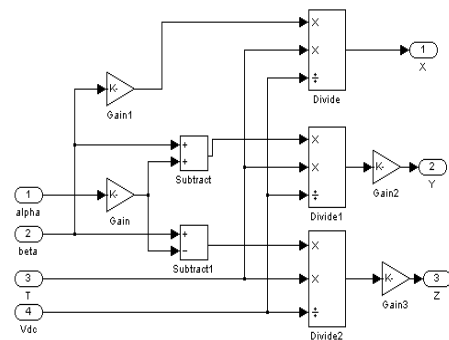


图4：计算X, Y, Z模型

由于 T_1 和 T_m 之和一定要小于或等于 T (PWM调制周期), 所以还要进行过饱和判断, 当 $T_1+T_m>T$ 时, 应取: $T_1=T_1 \times T/(T_1+T_m)$, $T_m=T_m \times T/(T_1+T_m)$, 其SIMULINK实现模型如图5所示。

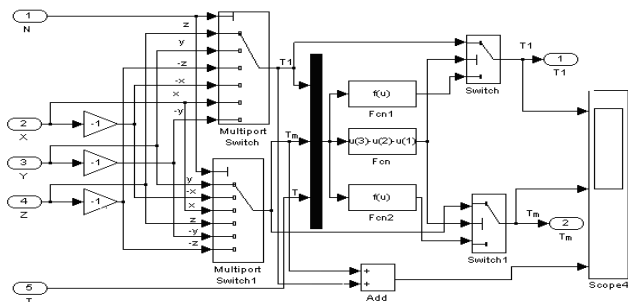


图5: 基本矢量作用时间计算模型

3.3 开关作用时间的计算模型(Calculational Model of Switch Effect Time)

令 $T_a=(T-T_1-T_m)/4$, $T_b=T_a+T_1/2$, $T_c=T_b+T_m/2$, 其模型如图6所示, 则 N 与开关作用时间 T_{cm1} 、 T_{cm2} 、 T_{cm3} 之间的对应关系如表4所示。

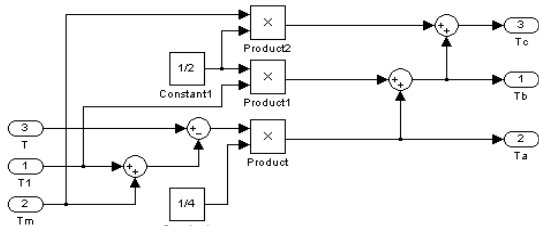


图6: 开关作用时间

表4: T_{cm} 与 T_a 、 T_b 、 T_c 对应关系表

N	1	2	3	4	5	6
T_{cm1}	T_b	T_a	T_a	T_c	T_c	T_b
T_{cm2}	T_a	T_c	T_b	T_b	T_a	T_c
T_{cm3}	T_c	T_b	T_c	T_a	T_b	T_a

3.4 SVPWM波形的生成(Waveform Generation of SVPWM)

计算得到的 T_{cm1} 、 T_{cm2} 和 T_{cm3} 值与等腰三角形进行比较, 就可以生成对称空间矢量PWM波形^[12-14], 模型如图7所示。

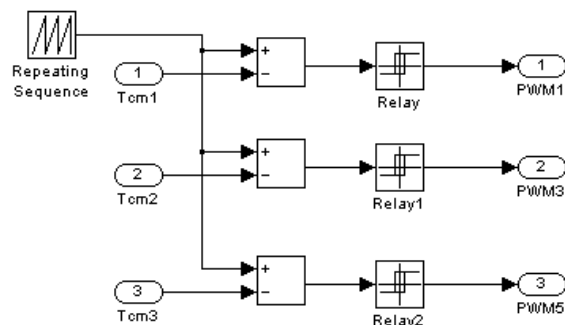


图7: PWM波型的生成模型

将生成的PWM1、PWM3和PWM5进行非运算就可以生成PWM2、PWM4和PWM6, 从而控制开关管的通断来控制永磁同步电机, 将上述模块连接生成如下图8所示的SVPWM整体模型。

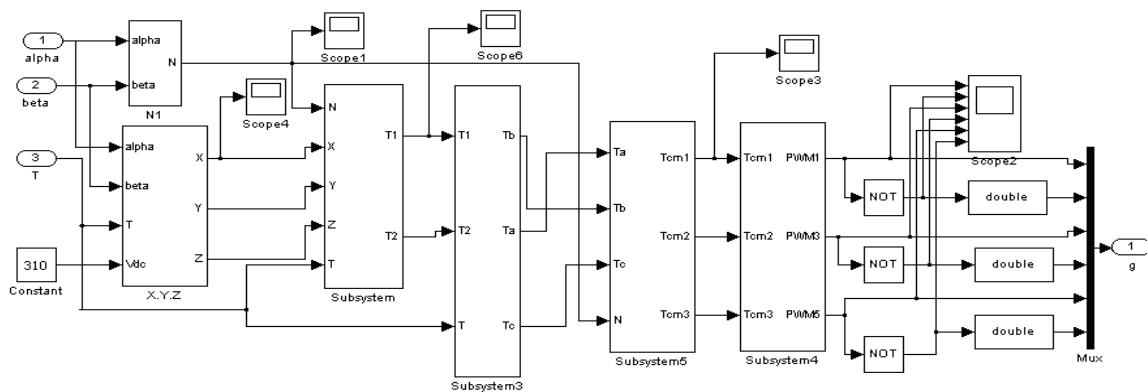


图8: SVPWM模型

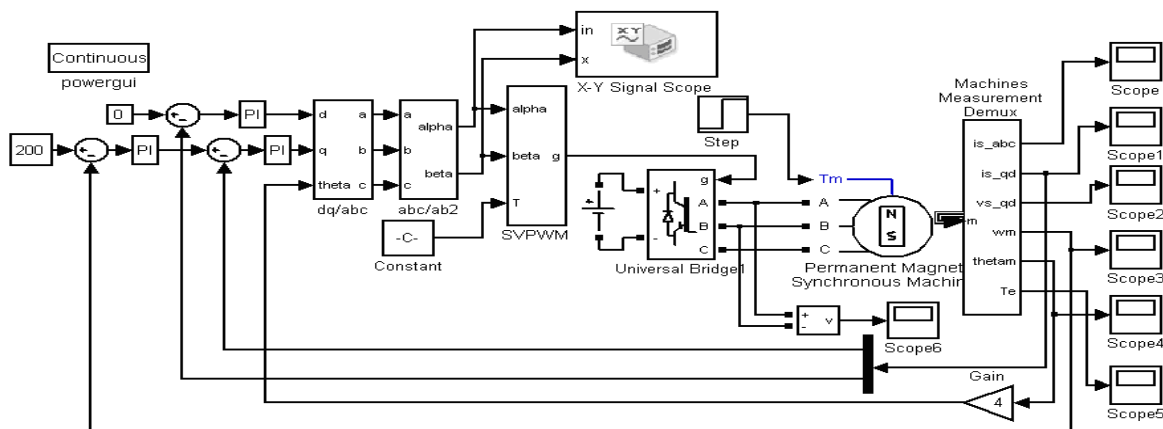


图9: PMSM磁场定向控制系统仿真模型

4 永磁同步电机仿真模型的建立 (Modeling and Simulation of PMSM)

将上述各个子模块进行连接构成闭环系统的仿真模型。由于测量模块输出的转角为机械角度，转速为机械角速度，而实际坐标变换中采用的是电角度，所以要把所测量的角度值乘以电机的极对数得到电角度。所建控制系统的仿真模型见图9。

5 仿真结果 (Simulation Results)

给定PWM采样周期为0.0001s，直流母线电压为310V时，PWM载波频率为10kHz，死区时间为4.1μs，一个采样周期内的SVPWM波形如图10所示，其合成转矩增加了 $\sqrt{3}$ 倍，每隔60°电角度换相一次，每个

功率管120°电角度，每个绕组通电240°电角度，其中正向和反向通电各120°电角度。

电机的电流、转速、转矩、转角也符合电机的实际运行特性，证明了所建模型的正确性。速度调节器参数设置： $K_p=1.5$ ， $K_i=10.5$ ；q轴电流调节器参数设置： $K_p=3$ ， $K_i=1$ ；d轴电流调节器参数设置为 $K_p=3$ ， $K_i=1$ ，在调整好参数的永磁同步电机仿真系统电流、转速、转矩、转角如图11所示。仿真给定速度为200rad/s，在t=0s时刻，电机空载起动，在t=0.2s时突加3Nm的负载转矩，仿真时间为0.4s，仿真步长为0.0001s。由此可见，电机启动速度很快，能快速跟踪给定速度，在加载情况下，转速波动很小。本例仿真中用到的为TYB系列的永磁同步电机，型号为TYB55-4，其参数如表5所示。

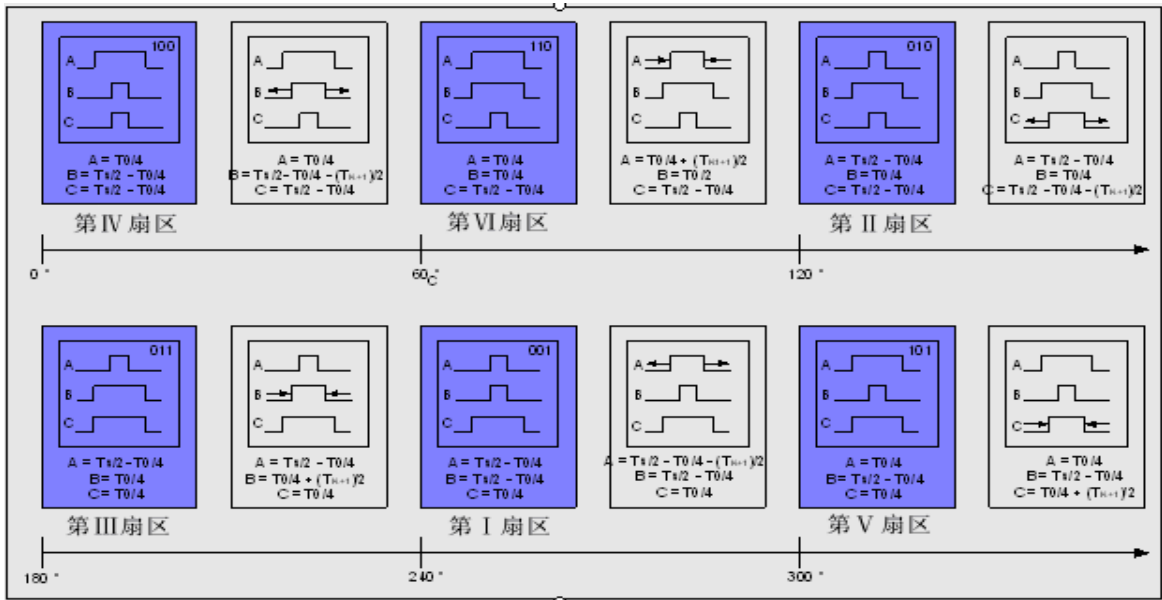


图10: 单个采样周期内的SVPWM波形

表5: 永磁同步电机参数

电机功率	200W
转动惯量	0.8kgm ²
额定转矩	3.5Nm
额定电压	380V
额定电流	1.5A
定子电阻	2.875Ω
额定感抗	8.5mH
额定转速	1500rpm
调频范围	10-50Hz

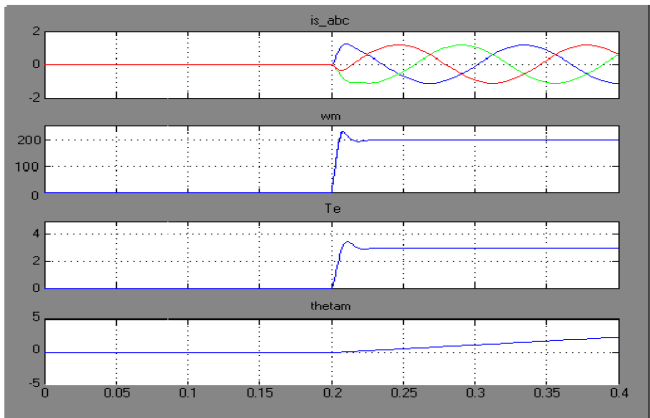


图11: 电流、转速、转矩、转角

图12为d-q轴定子电流仿真波形图，当t=0.2s时，转矩从0变为3Nm，q轴电流与转矩成正比，d轴电流接近于零，由此可见三相定子电流实现了很好的解耦。

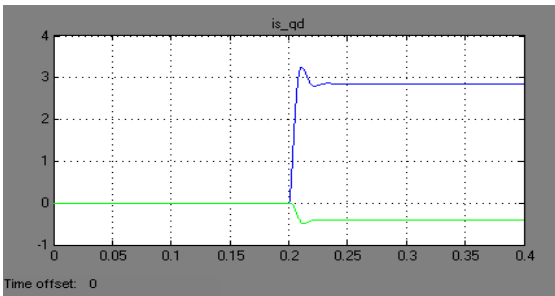


图12: d-q轴定子电流仿真波形图

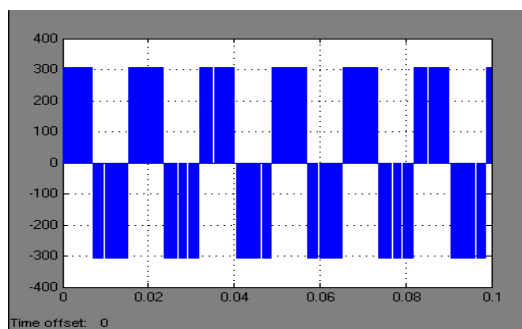


图13: 线电压仿真波形

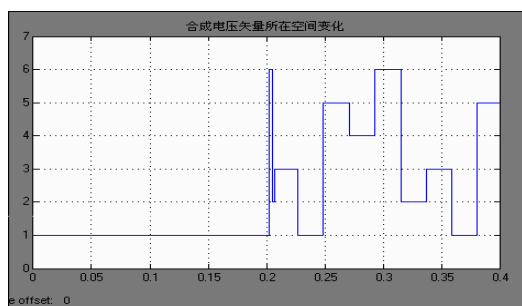


图14: 合成电压矢量所在扇区变换

在仿真时给定速度 200rad/s ，图13为电机AB线电压的仿真波形，图14为合成电压矢量所在扇区变换，可见电压矢量依次转过III（011），I（001），V（101），IV（100），VI（110），II（010），电压矢量逆时针旋转，如图14所示图形与预期结果图10完全一致。从转速响应曲线可以看出，转速在起动之后，很快达到稳定值。在转矩响应曲线中，在起动时刻，电磁转矩很快稳定在设定值 3Nm ，并有轻微波动， i_a 、 i_b 、 i_c 相电流曲线和转矩响应曲线有些相似，在开始时刻，电流值比较大，但很快达到设定值。

6 结论(Conclusion)

本文在分析永磁同步电机的转子磁场定向控制的基础上，在Matlab/Simulink环境下，采用矢量控制与经典的速度、电流双闭环控制方法建立了永磁同步电机控制系统的仿真模型，仿真实验结果表明：波形符合理论分析，系统能平稳运行，并具有较好的静、动态特性，尤其为新发展的高温超导磁悬浮飞轮储能和高温超导直线电机装置的控制系统的软硬件设计奠定了理论基础^[15-17]。SVPWM比SPWM的电压利用率高15%，这是两者最大的区别，SVPWM是一种在SPWM的相调制波中加入了零序分量后进行规则采样得到的结果，SPWM易于硬件电路实现，而SVPWM更适合于数字化控制系统。

参考文献

[1] 李崇坚，交流同步电机调速系统，科学出版社，北京，2007。

- [2] Y. K. Chin, J. Soulard, A Permanent Magnet Synchronous Motor for Traction Applications of Electric Vehicles, IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 1035-1041, 2003.
- [3] D. G. Xu, H. Wang, J. Z. Shi, PMSM Servo System with Speed and Torque Observer, Annual Power Electronics Specialists Conference, Vol.34, No.1, 241-245, 2003.
- [4] Q. H. Liu, M. A. Jabbar, A. M. Khambadkone, Design Optimization of Wide-speed Permanent Magnet Synchronous Motors, International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, University of Bath, UK, 404-408, 2002.
- [5] Y. L. Xu, J. Q. Xu, W. B. Wan, R. Y. Tang, Development of Permanent Magnet Synchronous Motor Used in Electric Vehicle, 5th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS'2001), Shenyang, China, Vol.2, 884-887, August 18-20, 2001.
- [6] J. Q. Xu, Y. L. Xu, R. Y. Tang, Development of Full Digital Control System for Permanent Magnet Synchronous Motor Used in Electric Vehicle, 5th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS'2001), Shenyang, China, Vol.1, 554-556, August 18-20, 2001.
- [7] B. T. Ooi, J. C. Salmon, J. W. Dixon, A. B. Kulkarni, A Three Phase Controlled-current PWM Converter with Leading Power Factor, IEEE Trans. Ind. Application, Vol. IA-23, No.1, 78-84, Jan/Feb, 1987.
- [8] J. W. Dixon, B. T. Ooi, Indirect Current Control of a Unity Power Factor Sinusoidal Current Boost Type Three-phase Rectifier, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol.35, No.4, 508-515, Nov, 1988.
- [9] B. Vladimir, K. Vikram, A New Mathematical Model and Control of a Three-Phase AC-DC Voltage Source Converter, IEEE Trans. on Power Electronics, Vol.12, No.1, 116-123, January, 1997.
- [10] R. Wu, S. B. Dewan, G. R. Slemon, A PWM AC to DC Converter with Fixed Switching Frequency, in Conf. Rec. 1988 IEEE-IAS Ann. Mag., 706-711.
- [11] R. Wu, S. B. Dewan, G. R. Slemon, Analysis of an AC-to-DC Voltage Source Converter Using PWM with Phase and Amplitude Control, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.27, No.2, March/April, 1991.
- [12] M. Kadjoudj, M. E. H. Benbouzid, A Robust Hybrid Current Control for Permanent Magnet Synchronous Motor Drive, IECON'01, 2068-2073, 2001.
- [13] J. Dixon, S. Tepper, L. Moran, Practical Evaluation of Different Modulation Technique for Current-controlled Voltage Source Inverters, IEEE Proceedings Electric Power Applications, Vol.143, No.4, 301-306, 1996.
- [14] B. D. Fernando, D. W. Michael, L. D. Robert, Dynamic Analysis of Current Regulators for AC Motors Using Complex Vectors, IEEE Trans. on Industry Application, Vol.35, No.6, 1424-1432, 1999.
- [15] J. X. Jin, Y. G. Guo, J. G. Zhu, Principle and Analysis of a Linear Motor Driving System for HTS Levitation Applications, Physica C, Vol.460-462, 1445-1446, 2007.
- [16] Y. G. Guo, J. X. Jin, J. G. Jian, H. Y. Lu, Design and Analysis of a Prototype Linear Motor Driving System for HTS Maglev Transportation, IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol.17, No.2, 2087-2090, June, 2007.
- [17] J. X. Jin, Y. G. Guo, J. X. Chen, L. H. Zheng, J. G. Zhu, HTS Levitation and Transportation with Linear Motor Control, Proceedings of the 26th Chinese Control Conference, Zhangjiajie, Hunan, China, Vol.6, 10-14, July, 2007.