

基于三电平逆变器的内置式永磁同步电机 矢量控制研究

张伯泽, 宗 剑, 钱 平

(上海应用技术大学 电气与电子工程学院, 上海 201418)

摘 要: 三电平逆变器输出电压波形比两电平逆变器增加一个台阶, 其谐波含量低、波形质量好, 有利于实现输出电压的正弦化, 且单个开关管承受的电压应力小, 适合向高压大容量方向发展。内置式永磁同步电机 (IPMSM) 为三相正弦波输入控制, 用三电平逆变器来驱动 IPMSM, 有利于减少 IPMSM 的转矩脉动, 实现高性能的调速控制。对基于三电平逆变器的 IPMSM 矢量控制技术进行了研究, 建立了系统仿真模型。仿真结果表明: 该系统的三电平逆变器输出电压波形正确, IPMSM 的转速能准确跟踪参考转速, 电机动态、稳态性能良好。

关键词: 内置式永磁同步电机; 三电平逆变器; 矢量控制; 空间电压矢量

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)03-0041-05

Research on Vector Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Three-Level Inverter

ZHANG Boze, ZONG Jian, QIAN Ping

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

Abstract: The three-level inverter's voltage output had one more step than two-level inverter so that it had lower harmonics. Thus, the output waveform of three-level inverter was better and was more suitable to realize sine wave. Moreover, each power device's voltage stress of three-level inverter was smaller than that of two-level inverter. Then three-level inverter was more fit for high voltage and large power volume converter development. Interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) was controlled with three-phase sine wave input. Using three-level inverter to drive IPMSM had such clear advantages as decreasing torque pulsation and easy to realize excellent speed modulation performance. The research of IPMSM vector control based on three-level inverter was carried out. The simulation model of the whole system was built. Simulation results proved that the three-level inverter voltage output was correct, IPMSM speed could follow the reference speed closely, and the dynamic and static responses were good.

Key words: interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM); three-level inverter; vector control; space voltage vector

0 引 言

与两电平逆变器相比, 三电平逆变器输出电压波形增加一个台阶, 其谐波含量低、波形质量好, 有利于实现输出电压的正弦化。三电平逆变器单个开关管承受的电压应力小, 适合向高压大

容量方向发展^[1-2]。

内置式永磁同步电机 (IPMSM) 具有功率密度高、重量轻、响应快、损耗小和效率高等优点, 可实现控制精度高、动态性能好、调速范围宽的调速控制^[3-7], 在轨道交通、航空航天、医疗、电动汽车等领域得到广泛应用。

作者简介: 张伯泽 (1976—), 男, 博士, 研究方向为电机驱动、开关电源、新能源发电与电动汽车充电技术。

宗 剑 (1973—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电机驱动、新能源发电与智能微电网、供配电安全与继电保护。

钱 平 (1960—), 男, 硕士, 教授, 研究方向为电机驱动、新能源发电、智能微电网与电动汽车充电技术。

IPMSM 为输入三相正弦波控制,而三电平逆变器的输出波形质量好,更接近正弦波,用三电平逆变器来驱动 IPMSM,有利于减少 IPMSM 的转矩脉动和实现更高性能的调速控制,是当今交流调速领域的研究热点之一。

文献[8-10]对基于三电平逆变器的 IPMSM 直接转矩控制进行了研究。本文对基于三电平逆变器的 IPMSM 矢量控制进行探索。首先分析了 IPMSM 的数学模型和三电平逆变器的拓扑、空间矢量脉宽调制(SVPWM)控制及中性点电位不平衡问题。然后,详细研究了基于三电平逆变器的 IPMSM 矢量控制系统,对该系统参考电压矢量 U_{ref}^* 的生成、所落区域的判断及其合成进行了详细的论述。最后,建立了基于三电平逆变器的 IPMSM 矢量控制系统模型。仿真结果表明:该系统的三电平逆变器输出电压波形正确,IPMSM 转速能准确跟踪参考转速,电机动态、稳态性能良好。

1 IPMSM 的数学模型

在以转子磁场定向的同步旋转 dq 坐标系中,IPMSM 的定子电压方程为

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + L_{sd} \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_r \psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + L_{sq} \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_r \psi_{sd} \end{cases} \quad (1)$$

磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_{sd} i_{sd} + \psi_f \\ \psi_{sq} = L_{sq} i_{sq} \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)整理为状态方程,则 IPMSM 的电流型数学模型为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_{sd}} & \omega_r \frac{L_{sq}}{L_{sd}} \\ -\omega_r \frac{L_{sd}}{L_{sq}} & -\frac{R_s}{L_{sq}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{u_{sd}}{L_{sd}} \\ \frac{u_{sq}}{L_{sq}} - \omega_r \frac{\psi_f}{L_{sq}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

电磁转矩为

$$T_e = p(\psi_{sd} i_{sq} - \psi_{sq} i_{sd}) = p[\psi_f i_{sq} + (L_{sd} - L_{sq}) i_{sq} i_{sd}] \quad (4)$$

式中: u_{sd} 、 u_{sq} ——IPMSM 定子电压直、交轴分量;

R_s ——IPMSM 定子电阻;

i_{sd} 、 i_{sq} ——IPMSM 定子电流直、交轴分量;

L_{sd} 、 L_{sq} ——IPMSM 直、交轴电感;

ω_r ——IPMSM 转子电气角速度;

ψ_f ——IPMSM 转子永磁体产生的磁链;

p ——IPMSM 极对数。

2 三电平逆变器及 SVPWM 控制

二极管钳位式三电平逆变器的主功率电路如图 1 所示。每个桥臂有 4 个全控型功率器件、4 个续流二极管和 2 个钳位二极管。直流侧母线电容 C_1 、 C_2 用于均压。这两个电容连接处的电位即为中性点电位。

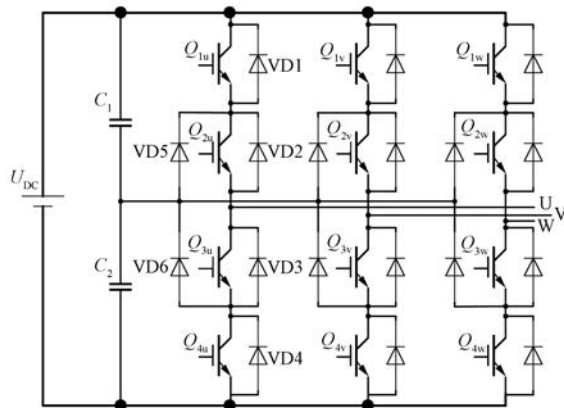


图 1 二极管钳位式三电平逆变器主电路原理图

三电平逆变器每相桥臂均有 3 个开关状态,记为 P、O、N。3 个桥臂共有 27 个开关状态,构成的空间电压矢量图如图 2 所示,其中大矢量和中矢量各为 6 个,小矢量为 12 个,零矢量为 3 个。

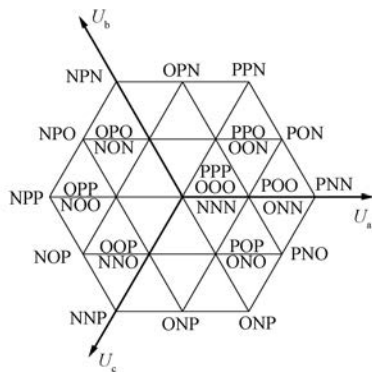


图 2 三电平逆变器空间电压矢量图

在三电平逆变器的众多控制策略中^[11-12],SVPWM 是研究最多和应用最广泛的方法。SVPWM 控制的直流母线电压利用率高,易于数字化实现。

如图 3 所示,以第 1 大扇区为例,将其划分为 4 个小三角形区域,根据参考电压矢量 $\mathbf{U}_{\text{ref}}^*$ 位置角 $0^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$ 或 $30^\circ < \theta \leq 60^\circ$,将小三角形 1 和 3 又分别划分为两个区域,分别记为 1.1、1.2 和 3.1、3.2。

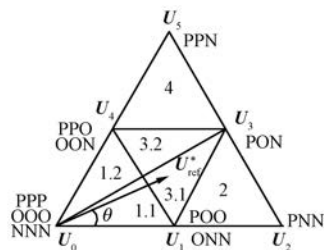


图3 参考电压矢量的合成

当参考电压矢量 U_{ref}^* 落在区域 3.1 时,用该区域的 3 个顶点电压 U_1 、 U_3 、 U_4 来合成,可得:

$$U_1 T_a + U_3 T_b + U_4 T_c = U_{\text{ref}}^* T_s \quad (5)$$

$$T_a + T_b + T_c = T_s \quad (6)$$

式中: T_a 、 T_b 、 T_c ——矢量 U_1 、 U_3 、 U_4 的作用时间;
 T_s ——逆变器的开关周期。

可以解出：

$$\begin{cases} T_a = T_s(1 - 2n \sin \theta) \\ T_b = T_s[2n \sin(\theta + \pi/3) - 1] \\ T_c = T_s[2n \sin(\theta - \pi/3) + 1] \end{cases} \quad (7)$$

其中: $n = \sqrt{3} U_{\text{ref}} / U_{\text{DC}}$ 。

同理可推出参考电压矢量落在其他区域时, 空间电压矢量的合成时间。

三电平逆变器的中性点电位不平衡问题^[13-15]是制约该拓扑应用的一个因素。由于中性点电位不平衡,逆变器输出侧就含有低次谐波,输出效率变低,某些开关管承受的电压应力变大。由于直流侧电容电压存在较大波动,所以电容的寿命也将下降。通过合理安排,让正小矢量和负小矢量的作用时间相等,可以有效避免三电平逆变器的中性点电位不平衡问题。

3 基于三电平逆变器的 IPMSM 矢量控制系统

基于三电平逆变器的 IPMSM 矢量控制系统原理图如图 4 所示。采样的三相定子电流 i_{sa} 、 i_{sb} 、 i_{sc} ，经过 Clarke、Park 变换得到直轴电流分量 i_{sd} 、 i_{sq} ，然后与直轴的参考电流分量 i_{sd}^* 、 i_{sq}^* 相比较，经 PI 控制器得到直轴参考电压分量 u_{sd}^* 、 u_{sq}^* 。之后， u_{sd}^* 、 u_{sq}^* 经 Park 逆变换得到静止坐标系中的参考电压矢量 U_{ref}^* 在 α 、 β 轴上的两个分量 $u_{s\alpha}^*$ 、 $u_{s\beta}^*$ ，将这 2 个分量送入三电平逆变器进行合成。

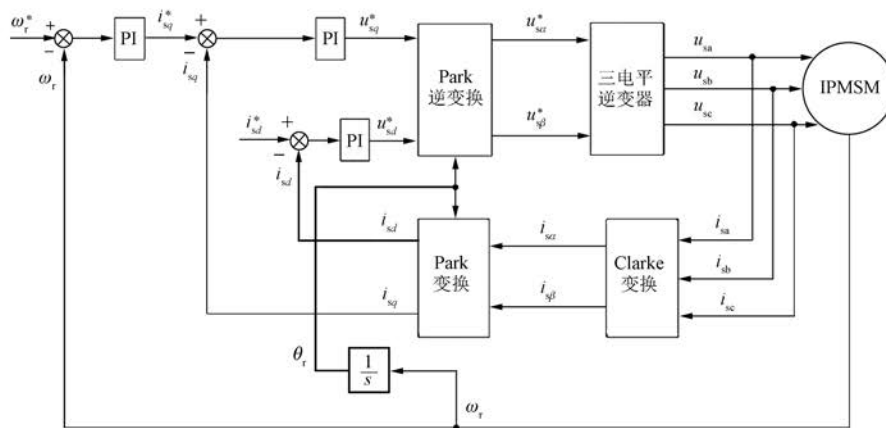


图 4 基于三电平逆变器的 IPMSM 矢量控制原理图

当三电平逆变器接收到前端送来的参考电压分量 u_{sa}^* 、 u_{sb}^* 时,如图 5 所示,以第一扇区为例,制订以下规则:

$$(1) \quad U_{\alpha}^* + U_{\beta}^* / \sqrt{3} \leq U_{\alpha};$$

$$(2) \quad U_{\alpha}^* - U_{\beta}^* / \sqrt{3} \geq U_{\alpha};$$

$$(3) \quad U_{\beta}^* < U_{\beta \circ}$$

根据表 1, 判断 U_{ref}^* 所在具体的小三角形区域。之后, 再用 SVPWM 对参考电压矢量进行合成, 生成 PWM 波, 驱动功率开关管工作, 三电平逆变器输出带有调节信息的三相电压 u_{sa} 、 u_{sb} 、 u_{sc} , 对 IPMSM 进行动态调节。

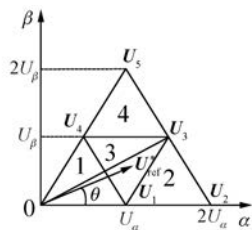


图5 空间矢量的选择

表1 U_{ref}^* 所落小三角形区域判断规则表

三角形区域	规则		
	(1)	(2)	(3)
1	是	—	—
2	否	是	—
3	否	否	是
4	否	否	否

注：—表示不需判断。

4 仿真研究

用 MATLAB/Simulink 对基于三电平逆变器的 IPMSM 矢量控制系统进行了仿真验证。IPMSM 的参数如表 2 所示,负载为额定转矩 4 N·m,电机运行的参考电气速度为 3 600 r/min,仿真结果如图 6~图 10 所示。

从仿真波形可以看出,在 $t=0.25\text{ s}$ 时突加负载,IPMSM 能紧紧跟踪参考转速,说明基于三电平逆变器的 IPMSM 矢量控制系统具有良好的动态响应和稳态响应,系统性能良好。

表2 IPMSM 参数

参数名称	参数值
定子电阻/ Ω	0.63
定子 d 轴电感/H	0.012
定子 q 轴电感/H	0.018
极对数	3
主磁极磁通/Wb	0.278
转动惯量/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.000 6
额定机械转速/ $(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	1 200

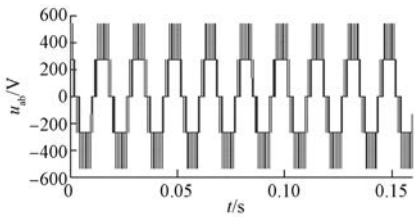


图6 三电平逆变器输出线电压波形

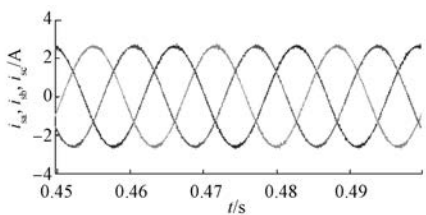


图7 IPMSM 三相电流波形

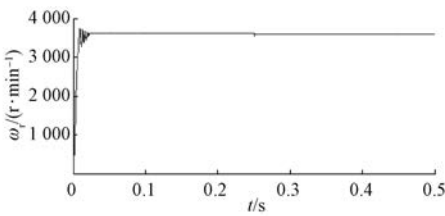


图8 IPMSM 转速波形

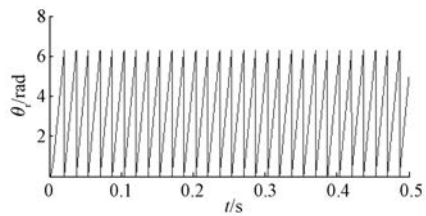


图9 IPMSM 转子位置角波形

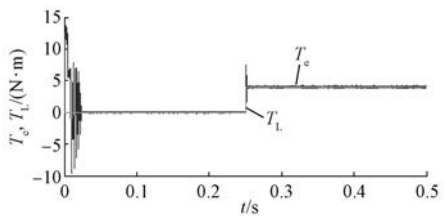


图10 IPMSM 转矩波形

5 结 语

三电平逆变器比两电平逆变器输出电压增加一个台阶,单个功率开关器件电压应力小、输出谐波少、波形质量好,利于实现输出电压的正弦化,适合向高压大容量方向发展。IPMSM 为输入三相正弦波控制,矢量控制是 IPMSM 的理想调速方法。本文对基于三电平逆变器的 IPMSM 矢量控制进行了研究,对该系统参考电压矢量 U_{ref}^* 的生成、所落区域的判断及其合成进行了详细的论述。用 MATLAB/Simulink 建立系统模型进行仿真。

仿真结果表明:该系统三电平逆变器输出电压波形正确,IPMSM 转速能准确跟踪参考转速,电机动态、稳态性能良好。

【参考文献】

- [1] SEO J H, CHOI C H, HYUN D S. A new simplified space-vector PWM method for three-level inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2001, 16(4): 515.
- [2] MOHAN D, ZHANG X N, FOO G. Direct torque control of IPMSM driven by a three level NPC inverter with torque and capacitor voltage ripple reduction [C] // Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2015: 557.
- [3] 张伯泽,阮毅.基于高频旋转电压注入的内置式永磁同步电机无位置传感器矢量控制[J].电机与控制应用,2016,43(7): 12.
- [4] 张伯泽,阮毅.基于 MRAS 内置式永磁同步电机无位置传感器控制研究[J].电机与控制应用,2016, 43(4): 13.
- [5] ZHOU F, LI B Z, YANG J G. A sliding mode speed/ position observer integrated with a PI controller for PM synchronous motors [C] // IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2007: 1372.
- [6] JANG J H, Ha J I, OHTO M, et al. Analysis of permanent-magnet machine for sensorless control based on high-frequency signal injection [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 40(6): 1595.
- [7] CORLEY M J, LORENZ R D. Rotor position and velocity estimation for a salient-pole permanent magnet synchronous machine at standstill and high speeds [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 34(4): 784.
- [8] BO M D, ZHANG X, FOO G. Three level inverter fed direct torque control of IPMSM with constant switching frequency and torque ripple reduction [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63 (2): 7908.
- [9] 陈炜,赵迎迎,周湛清.采用新型评价表的三电平逆变器占空比调制直接转矩控制[J].电工技术学报,2016,31(1): 128.
- [10] 厉虹,韩晔,王久和.改进的永磁同步电机直接转矩控制系统研究[J].电气传动,2017,47(11): 9.
- [11] 汪光生.多电平逆变器主要控制策略综述[J].变频器世界,2004(7): 3.
- [12] 李阳,戴鹏,于月森,等.三电平逆变器 SVPWM 过调制控制策略综述[J].电气传动,2010,40(3): 8.
- [13] YAMANAKA K, HAVA A M, KIRINO H, et al. A novel neutral point potential stabilization technique using the information of output current polarities and voltage vector [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(6): 1572.
- [14] 马炜程,丁星星,廖玉茗,等.三电平逆变器中点电位不平衡的谐波问题分析[J].电力电子技术, 2017, 51(2): 15.
- [15] 张伯泽.基于三电平逆变器的异步电机矢量控制研究[D].南京:南京航空航天大学,2006.

收稿日期: 2018-10-11

声 明

本刊已许可万方数据、重庆维普、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司在其网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网

络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊相关费用抵消。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。

《电机与控制应用》编辑部