

一种优化五相感应电机 SVPWM 算法仿真研究^{*}

许伯强, 程华鑫

(华北电力大学 电气工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 针对五相电机电压空间矢量多、控制复杂的问题, 提出了一种优化的五相感应电机空间矢量脉宽调制(SVPWM)算法与仿真。依据矢量空间解耦理论与载波统一性理论, 采用基于最大矢量的 SVPWM 算法, 综合考虑电压脉动与开关损耗等因素, 对算法进行了优化。建立了系统数学模型, 进行了仿真验证, 对仿真过程中产生误差的部分进行了分析和优化。仿真结果表明, 优化后的算法满足电机控制的需求, 与传统的 SVPWM 算法相比, 谐波畸变率降低, 开关损耗降低约 20%。

关键词: 五相感应电机; 空间矢量脉宽调制; 算法; 仿真; 优化

中图分类号: TM 346 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)02-0066-05

A Study on the Optimization of SVPWM Algorithm and Simulation for Five Phase Induction Motor^{*}

XU Boqiang, CHENG Huaxin

(College of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Compared with the traditional three-phase motor, five phase induction motor had many advantages. In order to solve the problem that the five phase motor had a lot of voltage space vector was difficult to control, an optimized algorithm of space vector pulse width modulation (SVPWM) for the five phase induction motor was proposed. Based on the vector space decoupling theory and the theory of carrier unity, the SVPWM algorithm based on the maximum vector was used to optimize the algorithm by considering the factors such as voltage ripple and switching loss. The mathematical model of the system was established, and the simulation results were verified. The simulation results showed that the optimized algorithm meets the requirements of the motor control, compared with the traditional SVPWM algorithm and simulation, the harmonic distortion rate was reduced and the switching loss was reduced by about 20%.

Key words: five phase induction motor; space vector pulse width modulation (SVPWM); algorithm; simulation; optimize

0 引言

五相感应电机与传统的三相感应电机相比, 力矩波动更小, 定转子谐波更少, 容错性能更好^[1], 被广泛应用于舰船、汽车等重要场合。五相感应电机通常由五相脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)逆变器来驱动, 二者与控制器一起构成完整的五相变频调速系统。文献[2]对

其中一种最经典的逆变器拓扑结构进行了研究(图1), 并提出了一种五相逆变器的空间矢量脉冲宽度调制(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM)方法, 但该方法只是三相系统 SVPWM 控制方法的简单推广, 其输出的逆变器电流含有较大的低次谐波。文献[3]定义了五相电机的电压空间矢量, 对电压空间矢量进行解耦, 优化了 SVPWM 算法, 降低了谐波。优化后的

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51177077)

作者简介: 许伯强(1972—), 男, 博士后, 教授, 研究方向为大型电机的状态监测与故障诊断。

程华鑫(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为多相电机的控制与故障诊断。

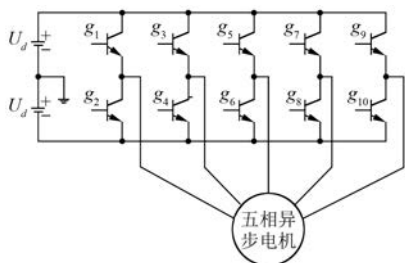


图1 五相逆变器结构示意图

SVPWM 算法通过选用不同的电压空间矢量跟踪实际的磁链空间矢量,保证其轨迹比三相电机更接近圆形,但空间矢量的选择、作用次序的不同都对逆变电路的谐波与电力电子器件的开关损耗有很大的影响^[4]。

本文首先建立了五相感应电机与 SVPWM 控制的数学模型;为了进一步降低逆变器开关损耗与谐波量,对空间电压矢量的作用次序进行调整,优化了 SVPWM 算法。在 MATLAB/Simulink 平台搭建了基于优化后的算法仿真,通过对仿真过程的分析,寻找产生误差的部分,对不合理部分进行进一步优化,仿真结果表明了优化后算法的可行性与优越性。

1 五相感应电机建模

五相感应电机可以看做一个五维的系统。为了方便对电机控制,对五相电机同样进行空间矢量解耦变换,将电机平面分为机电能量转换平面 $d-q$ 和非机电能量转换平面 $z1-z2-o$ ^[5],非机电能量转换平面不能耦合到转子侧,不形成旋转磁场,只在定子侧产生谐波电流。电机变量中的基波和 $k=10m\pm1$ ($m=1,2,3,\dots$) 次谐波被投影到 $d-q$ 平面, $k=5m\pm2$ 和 $k=5m$ ($m=1,3,5,\dots$) 次谐波被投影到 $z1-z2-o$ 平面。文献[6]中,其变换矩阵 $[T]$ 定义为

$$\sqrt{\frac{2}{5}} \begin{bmatrix} 1 & \cos\alpha & \cos2\alpha & \cos3\alpha & \cos4\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \sin2\alpha & \sin3\alpha & \sin4\alpha \\ 1 & \cos3\alpha & \cos6\alpha & \cos9\alpha & \cos12\alpha \\ 0 & \sin3\alpha & \sin6\alpha & \sin9\alpha & \sin12\alpha \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $\alpha = \frac{2\pi}{5}$

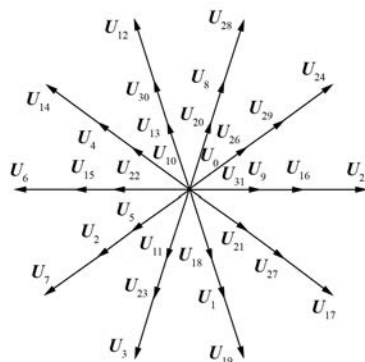
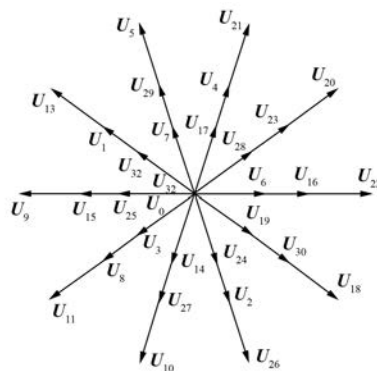
经过变换后,五相电机的能量转换平面与三相电机的方程式形式相同,因此,五相电机的建模

控制研究可以借鉴三相电机^[7]。

2 五相 SVPWM 的计算与优化

2.1 空间电压矢量分析

针对传统 SVPWM 算法非机电能量转换平面谐波电流过大的问题, SVPWM 算法也开始扩展到矢量多维空间^[8]。当五相电压型逆变器 32 个空间电压矢量分别映射到 $d-q$ 平面和 $z1-z2$ 平面上,以十进制数代表开关模式时,在两个平面的空间分布如图 2 和图 3 所示。通过观察可以发现 32 个矢量共分为 4 组 10 个扇区。其中大、中、小各包含 10 个矢量,此外还有 0[00000] 和 31[11111] 两个零矢量,可求得 3 种矢量的幅值^[9]。

图2 $d-q$ 平面电压空间矢量分布图3 $z1-z2$ 平面电压空间矢量分布

2.2 空间电压矢量选取与时间计算

通过构造一组中间平衡矢量,在控制非机电能量转换平面谐波的同时完成对机电能量转换平面控制。如图 2 所示,在 $d-q$ 平面的大矢量 17、25、24 在 $z1-z2$ 平面上方向不同,根据秒伏平衡原则,当这 3 个矢量维持一定的比例关系时,这 3 个矢量在 $z1-z2$ 平面合成电压为 0,此时这 3 个矢量

在 $d-q$ 平面所合成的矢量被称为平衡矢量 $25'$, 新合成的矢量幅值与方向固定^[10]。同样的计算方法, 可以分别得出其他 9 个平衡矢量, 这些平衡矢量幅值相等, 空间位置差 72° 。3 个大矢量合成平衡矢量所需要满足的关系如式(2):

$$\begin{cases} T'_{25} = T_{17} + T_{25} + T_{24} \\ T_{17} = T_{24} \\ T_{25}U_{25} = T_{24}U_{24} + T_{17}U_{17} \end{cases} \quad (2)$$

仍然以参考电压位于第一扇区为例, 参考电压由其两侧的平衡矢量 $25'$ 、 $24'$ 与零矢量合成。一个周期内, 这两个平衡矢量需满足的关系如式(3):

$$\begin{cases} T_s = T'_{25} + T'_{24} + T_0 \\ T_s U^* = T'_{25} U'_{25} + T'_{24} U'_{24} + T_0 U_0 \end{cases} \quad (3)$$

将式(2)、式(3)联立可分别求得一个周期内 4 个大矢量与零矢量的作用时间, 令 $K = \frac{2|U^*|T_s}{|U'| * (2\cos\alpha + 2)}$, 作用时间简化为式(4):

$$\begin{cases} T_{17} = K \sin\left(\frac{\pi}{5} - \theta\right) \\ T_{25} = 2\cos\alpha T_{17} + T_{28} \\ T_{24} = T_{17} + 2\cos\alpha T_{28} \\ T_0 = T_s - (2\cos\alpha + 2)(T_{17} + T_{28}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: θ ——参考电压与所在扇区下限的夹角,

$$0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{5};$$

$|U^*|$ ——参考电压幅值;

$|U'|$ ——平衡矢量幅值。

不同的扇区, 需要选取的作用矢量及其作用时间不同, 具体如表 1 所示。 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 的具体值由式(4)可以得出。

2.3 作用次序选取及优化

确定矢量作用顺序应遵循以下原则: 减少逆变器开关次数, 降低损耗。由此可得扇区 1 矢量作用顺序为 $0 \rightarrow 17 \rightarrow 25 \rightarrow 31 \rightarrow 28 \rightarrow 24 \rightarrow 0$, 但是这样产生的 SVPWM 脉冲在一个 T_s 内不对称, 导致产生谐波电压^[11]。因此, 在这里可以选择一个 $2T_s$ 周期分析, 选用三角波为载波, 使 SVPWM 脉冲在两个周期内对称从而减少谐波。仍以扇区 1 为例, 各个空间矢量作用顺序、开关时间及 PWM 波形如图 4 所示。

表 1 五相电压空间矢量作用时间

扇区号	作用时间/s			
	T_1	T_2	T_3	T_4
1	17	25	24	28
2	25	24	28	12
3	24	28	12	14
4	28	12	14	6
5	12	14	6	7
6	14	6	7	3
7	6	7	3	19
8	7	3	19	17
9	3	19	17	25
10	19	17	25	24

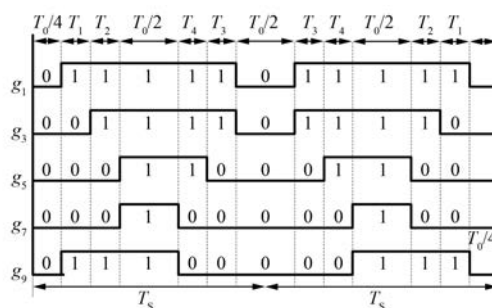


图 4 优化前扇区 1 PWM 波形

基于载波的五相统一电压调制算法研究表明, 零矢量的位置并不会影响有功的输出^[12]。考虑到开关损耗, 本文对作用次序进行优化。在保持对称性的前提下, 对零矢量的位置进行修改, 将位于两个 T_s 交界处的零矢量 $0[00000]$ 分别移入自己中部的零矢量 $31[11111]$ 中, 仍以扇区 1 为例, 经过优化后的各个空间矢量作用顺序、开关时间及 PWM 波形如图 5 所示。可以看出每两个 T_s 内在保持对称性的前提下开关次数进一步下降, 则周期内逆变器开关损耗降低。

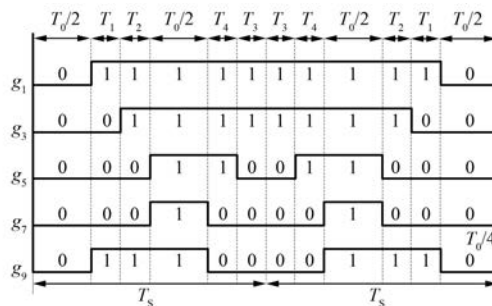


图 5 优化后扇区 1 PWM 波形

3 仿真实现及优化

3.1 仿真搭建

在 MATLAB 中,自带的电机模型并不能满足需要,使用 Simulink 根据前文所介绍的电机模型搭建五相异步电机的仿真。所选择的电机仿真参数采用文献[13]中的参数。

根据前文讲述的优化过的 SVPWM 控制策略,搭建了仿真模型。共分为扇区角度 β 计算、扇区判断、作用时间计算、开关切换点选择和 SVPWM 脉冲产生模块。对 SVPWM 模块给定互差 90° 频率为 50 Hz 的正弦信号,用其合成矢量来模拟要生成的参考电压。这里 $T_s = 0.000\ 2\ \text{s}$, $U_d = 500\ \text{V}$, $U^* = 400\ \text{V}$ 。

3.2 仿真优化

SVPWM 调制仿真过程中,每一个 T_s 内只有一个扇区号和控制角度 θ 。现有的仿真模块通过在扇区角度 β 计算模块后面加入一个周期的时间保持模块达到目的。但在实际仿真运行过程中受到仿真精度的限制,当扇区角度 β 处于各个扇区的分界线周围时这个延迟性会给后续的扇区判断和控制角度 θ 的计算带来明显的误差。

因此,有必要对这几个模块进行进一步优化,去除扇区角度 β 计算模块后面的时间保持模块,同时为了维持在每个周期 T_s 内角度 θ 的恒定,选取一个合适的周期 $2T_s$ 将一个扇区 N 等分,在每一个分区内选取一个合适的角度作为 θ ;同时,这几个选取的角度 θ 关于扇区中轴对称。通过这种方式,避免了当扇区角度 β 位于扇区边缘时所带来的扇区判断误差,同时提高了 SVPWM 波形的对称性,降低了谐波。本文所选择的周期将每个扇区 5 等分,在每一个分区所选取的角度如表 2 所示。

表 2 θ 仿真选取优化

θ 实际角度	θ 仿真选取角度
$0 \leq \theta < \frac{\pi}{25}$	$\frac{\pi}{50}$
$\frac{\pi}{25} \leq \theta < \frac{2\pi}{25}$	$\frac{3\pi}{50}$
$\frac{2\pi}{25} \leq \theta < \frac{3\pi}{25}$	$\frac{5\pi}{50}$
$\frac{3\pi}{25} \leq \theta < \frac{4\pi}{25}$	$\frac{7\pi}{50}$
$\frac{4\pi}{25} \leq \theta < \frac{\pi}{5}$	$\frac{9\pi}{50}$

4 仿真结果

对 SVPWM 在算法优化前(情况 1)、算法优化而仿真未优化(情况 2)、两者同时优化(情况 3)3 种情况下电机 $d-q$ 平面的电压,运用 Simulink 中的 FFT 工具得到其各次谐波的含量如表 3 所示。通过比较 3 种情况下波形畸变率以及各次谐波的具体数值对 3 种控制方法进行比较。

表 3 $d-q$ 平面电压各次谐波含量

谐波次数	情况 1	情况 2	情况 3
0	0	0.01	0
1	100	100	100
2	0	0.02	0
3	0	0.01	0
4	1.00	0.83	0.42
5	0	0	0
6	1.30	0.50	0.45
7	0	0.01	0
8	0	0.02	0
9	1.75	1.56	0.73
10	0	0.02	0
11	1.75	1.84	1.30
12	0	0.02	0
13	0	0.01	0
14	0.09	0.52	0.21
畸变率	2.98	2.69	1.63

由表 3 可知,经过算法优化与仿真优化后, $d-q$ 平面电压的波形畸变率降低,低次谐波减少,尤其是其中的一些偶数次谐波和表中未能表现的分数次谐波下降明显,同时, $d-q$ 平面谐波以 $k = 10m \pm 1 (m = 1, 2, 3, \dots)$ 次谐波为主。通过计算可以得出,每个周期内 IGBT 开关次数下降 20%,开关损耗大幅度降低。说明算法与仿真优化效果良好,同时实现了电机矢量空间解耦。

图 6~图 8 分别为情况 3 空载起动下电机的转速、电磁转矩、 $d-q$ 平面电流 i_d 的变化情况。可以观察到,电机的相电流正弦度良好,无直流偏移,转矩波动小,转速稳定,控制效果良好。

5 结 语

根据一定原则,对 SVPWM 算法选取空间矢量及作用顺序进行了优化,计算得到了优化后的各控制矢量的作用时间与作用次序。根据优化过

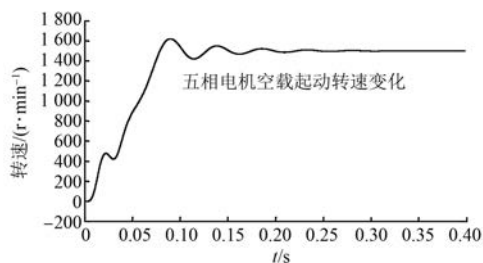


图6 电机转速

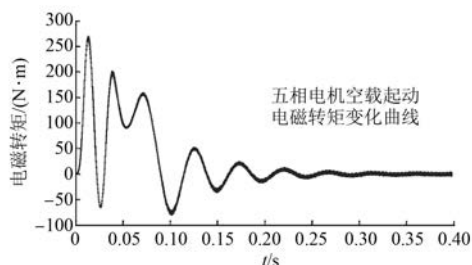
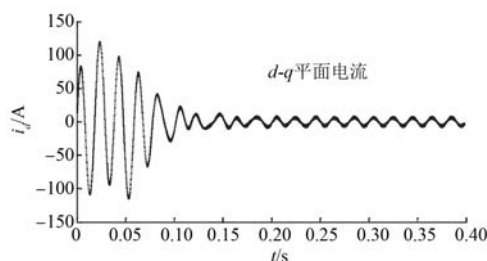


图7 电磁转矩

图8 d - q 平面电流 i_d

后的算法搭建了仿真模型,对仿真过程进行了探究,并对仿真过程中带来较大误差的部分进行了调整优化。仿真结果表明:采用优化过后的控制算法与仿真,可以提高 SVPWM 脉冲的对称性,减少 IGBT 开关次数,降低逆变器运行过程中开关损耗。从而,电机输出的电压、电流谐波含量降低,电机转矩波动减少,转速输出稳定,因此优化方法切实有效。同时仿真是系统设计的重要手段,本文用 Simulink 对五相感应电机 SVPWM 进行了仿真实现,结果显示效果良好,为进一步研究五相感应电机调速与容错打下了基础。

【参考文献】

- [1] 金爱娟,李少龙,李航天.五相空间矢量 PWM 技术[J].华南理工大学学报,2004,32(11): 19-23.
- [2] TOLİYAT H A, SHI R, XU H. A DSP-based vector control of five-phase synchronous reluctance motor [C] // Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE. IEEE, 2000: 1759-1765.
- [3] 于飞,张晓峰,李槐树,等.五相逆变器的空间矢量 PWM 控制[J].中国电机工程学报,2005,25(9): 40-46.
- [4] 李山.多相感应电机控制技术的研[D].重庆:重庆大学,2009.
- [5] 薛山,温旭辉.一种新颖的多相 SVPWM[J].电工技术学报,2006,21(2): 68-72.
- [6] 徐磊.多相感应电机瞬态仿真分析与研究[D].长沙:湖南大学,2008.
- [7] 陈林,侯立军.五相感应电机建模与仿真[J].三峡大学学报(自然科学版),2002,24(4): 328-330.
- [8] 李山.多相感应电机控制技术的研[D].重庆:重庆大学,2009.
- [9] 蔡巍,乔鸣忠,张晓峰.H 桥型五相感应电机 SVPWM 控制技术[J].电力系统及其自动化,2008,20(4): 33-38.
- [10] 刘璐燕.六相感应电机建模与控制技术研究[D].济南:山东大学,2014.
- [11] MAROUANI K, BAGHLI L, HADIOUCHE D, et al. A new PWM strategy based on a 24-sector vector space decomposition for a six-phase VSI-fed dual stator induction motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(5): 1910-1920.
- [12] BLASKO V. Analysis of a hybrid PWM based on modified space-vector and triangle-comparison methods [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1997, 33(3): 756-764.
- [13] 朱军.五相异步电机变频调速系统控制方法研究[D].武汉:华中科技大学,2006.

收稿日期: 2017 -05 -09

引领技术发展趋势

报道经典实用案例

反映行业最新动态