

磁通正弦 PWM 零矢量分布遗传求解

刘永超¹, 王怀颖²

(1. 南京师范大学数学与计算机科学学院, 210042 南京)
(2. 南京师范大学控制与工程系, 210042 南京)

[摘要] 在分析现有 PWM 调制技术的基础上, 对磁通正弦 PWM 进行研究, 针对磁通正弦 PWM 零矢量分布采用混沌变异遗传优化求解的方法, 介绍了适合度的计算方法并给出了计算结果。
[关键词] 磁通正弦 PWM, 零矢量分布, 混沌变异遗传算法
[中图分类号] TM301.2, [文献标识码] A, [文章编号] 1672- 1292- (2003) 01- 0018- 04

1 PWM 简介及现状

脉冲宽度调制(PWM) 是交流调速、不间断电源和有源滤波器等高性能电力电子装置的关键技术, 受到国内外学者的普遍关注, 并得到了越来越深入的研究, 有关 PWM 波形成方法的研究很多, 其中较为常见的有: 正弦波 PWM 波、双缘调制的 PWM 波、谐波消去 PWM 波、最小波纹电流 PWM 波以及相移 PWM 波、随机 PWM 波、注入 3 次谐波的 PWM、空间矢量 PWM 波(SVPWM) 等等。
随科学技术不断发展, 数字化 PWM 技术正逐步取代模拟 PWM 技术, 正成为电机调速系统中的核心技术, 新的数字 PWM 调制技术必将不断涌现而其发展的最终目的是来提高电压的利用率、不断改善输出电压波、不减少总谐波含量、不断减小开关损耗、不断降成本等。磁通正弦 PWM 技术由于在电机控制中具有突出的优点, 最近在电机交流调速中得到广泛的应用。

2 磁通正弦 PWM 调制技术

对于三相异步电机来说, 从提高电机的性能角度分析, 提高电机性能的前提是获得幅值恒定的圆形旋转磁场。磁通正弦 PWM 调制技术的核心是以三相对称正弦电压供电时电机的理想磁通圆为基准, 用不同的开关模式所产生的实际磁通去逼近基准磁通圆^[3], 以此为基础来形成 PWM 波形, 称为磁通正弦 PWM 波, 它是一种基于数字控制的实时 PWM 技术。

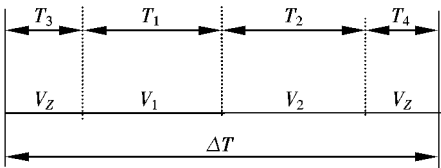


图 1 矢量分布位置示意图

在一个开关周期内, PWM 波由零电压矢量与非零电压矢量组成, 开关周期 ΔT 与非零电压, 零电压的关系如图 1 所示, 其中 T_1 、 T_2 分别为非零电压矢量 V_1 、 V_2 的占空时间, T_3 、 T_4 分别为零电压矢量的占空时间。在形成磁通正弦 PWM 波时, 采用磁通 PWM 调制技术在第一扇区(图 2 所示) 输出期待电压 U^* 时, 求解得到的两个非零电压矢量 V_1 、 V_2 的占空时间的计算表达式为:

$$\begin{cases} T_1 = \frac{\sqrt{3} U^* \Delta T}{U_d} \sin \left(\frac{\pi}{3} - \theta \right) \\ T_2 = \frac{\sqrt{3} U^* \Delta T}{U_d} \sin \theta \end{cases} \tag{1}$$

收稿日期: 2003- 02- 18.
作者简介: 刘永超, 1973- , 工学博士, 南京师范大学数学与计算机科学学院副教授, 主要研究方向为机器人, 检测技术与自动化装备.

其中 U_d 为直流母线电压, U^* 为逆变器侧期待输出电压矢量.

由图 1 知, 零电压矢量的总时间可表示为:

$$T_0 = \Delta T - T_1 - T_2 = \Delta T \left[1 - \frac{\sqrt{3} U^*}{U_d} \cos \left(\frac{\pi}{6} - \theta \right) \right] \quad (2)$$

$$\text{则: } T_3, T_4 \text{ 可表示为: } \begin{cases} T_3 = kT_0 \\ T_4 = (1 - k)T_0 \end{cases} \quad (3)$$

其中 k 为比例系数 ($0 \leq k \leq 1$).

由(3)知, 在一个周期内零电压分布取决于比例系数 k 的大小, k 的大小不同零电压矢量的分布不同, 大多数情况下 k 取 0.5、0、1、3 种.

研究表明, 当 $k = 0$ 或 1 时, 对三相调制波来说相当于每相的调制波有连续的 $1/3$ 周期维持为正母线或负母线电压电位. 对于这种零电压分布, 由于载波和调制波没有交点, 所以这段时间内对应的桥臂开关状态不变. 当 k 交替取 0 和 1 时, 将得到正负半周对称的各 60° 不动的 PWM 波, 控制切换 k 值的位置, 可以控制不动作区的在一个周期内具体位置, 有利于降低开关损耗.

本文从减小磁通误差入手, 通过定义磁通误差函数, 采用优化的方法来确定使磁通误差最小的零电压矢量分布, 使实际磁通轨迹更接近于理想磁通轨迹.

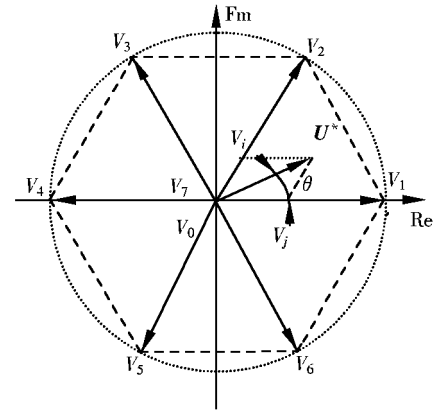


图 2 磁通正弦 PWM 调制技术

3 磁通正弦 PWM 零矢量分布求解

3.1 确定磁通误差

由以上分析知, 为了采用优化法确定零电压分布, 必须对磁通误差分析, 根据磁通误差的定义, 磁通误差可以写成:

$$\varepsilon_\phi = |\phi^* - \phi| \quad (4)$$

其中 ϕ^* 为理论磁通值; ϕ 为实际磁通值.

根据磁通概念, 可以得逆变器输出为纯正弦电压时, 理论磁通 ϕ^* 可表示为:

$$\phi^* = \frac{2}{3} \left(\int S_a^* dt + \int S_b^* dt + \int S_c^* dt \right) \quad (5)$$

$$\text{其中 } S_i^* = 2\sqrt{3} \frac{U^*}{U_d} \cos \left(\omega t + \frac{2\pi i}{3} \right) / 3, \quad (i = 0, 1, 2) \quad (6)$$

$$\text{将(6)代入(5)式中, 得: } \phi^*(t) = \frac{2\sqrt{3} U^*}{3 \omega U_d} (\sin \omega t - j \cos \omega t) \quad (7)$$

实际磁通 ϕ 在一个采样周期的不同区间其具体值不同:

$$(1) t \in [t_0, t_1], \text{ 在 } T_3 \text{ 区间, } \phi_1(t) = \phi^*(t_0)$$

$$(2) t \in [t_1, t_2], \text{ 在 } T_1 \text{ 区间, } \phi_2(t) = \phi^*(t_0) + \int_{t_1}^t V_1 dt = \phi^*(t_0) + 4(t - t_1)/3$$

$$(3) t \in [t_2, t_3], \text{ 在 } T_2 \text{ 区间, } \phi_3 = \phi_2(t_2) + \int_{t_2}^t V_2 dt = \phi^*(t_0) + \frac{4(t_2 - t_1)}{3} + \left[\frac{2}{3} + j \frac{2}{\sqrt{3}} \right] (t - t_2)$$

$$(4) t \in [t_3, t_4], \text{ 在 } T_4 \text{ 区间, } \phi_4(t) = \phi_3(t_3) = \phi^*(t_0 + \Delta T)$$

将 ϕ^* 、 ϕ 的表达式代入(4)式, 得磁通误差为:

$$\varepsilon_\phi = |\phi^* - \phi| = \sum_{i=1}^4 |\phi^*(t) - \phi_i(t)| \quad (8)$$

将(1)式、(3)式代入(8)式, 知磁通误差是比例系数 k 的一元函数如式(9)所示, $\varepsilon_\phi = f(k)$, 以该式作为优化目标函数, 求出使磁通误差最小的零电压分布.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\phi} = & \int_0^{KT_0} \left| \phi^* (t_0) - \phi^* (t) \right| dt + \int_{KT_0}^{KT_0+T_1} \left| \phi^* (t_0) + \frac{4(t-KT_0)}{3} - \phi^* (t) \right| dt + \\ & \int_{KT_0+T_1}^{KT_0+T_1+T_2} \left| \phi^* (t_0) + \frac{4T_1}{3} + \left[\frac{2}{3} + j\frac{2}{\sqrt{3}} \right] (t-KT_0-T_1) - \phi^* (t) \right| dt + \\ & \int_{KT_0+T_1+T_{21}}^{KT_0+T_1+T_{21}+T} \left| \phi^* (t_0+\Delta T) - \phi^* (t) \right| dt \end{aligned} \tag{9}$$

3.2 遗传求解

有关优化求解方法很多,如最小二乘法、线性规划、二次规划、梯度法等等.随着计算机技术的发展,遗传进化求解正逐渐受到学者们的关注,应用也十分广泛.

为了解决遗传算法的一些缺陷,最近先后出现了退火选择遗传算法^[3]、模糊控制遗传算法^[4]、混合搜索遗传算法^[5]、粒子群遗传算法^[6]等.

在遗传算法的求解的方法中,常用的变异形式有 Gaussian 分布随机变异、Cauchy 分布随机变异形式与混沌变异形式.

本文采用的混沌变异为:

$$x_j(k+1)=x_j(k)+\delta_j(k)H_j(0,1) \tag{10}$$

式中: $H_j(0,1)$ 为采用虫口模型产生的混沌序列.

本文选择混沌变异形遗传算法对磁通误差进行优化.在求解过程中取群体数为 50,交叉概率为 0.96,变异率为 0.1,总迭代次数为 5000.适合度函数为: $\text{fitnes}(k)=\varepsilon_{\phi}=\sum_{i=1}^4\left|\phi^*(t)-\phi_i(t)\right|$ (11)

在计算(11)式,采用离散化的方法进行求解,设一个周期 ΔT 内总离散化 N 个点,根据每个区间的长度,求出每个区间的离散化点数 $N_i,N=\sum N_i$.则适合度函数可表示为:

$$\text{fitness}(k)=\sum_{i=1}^4\sum_{j=1}^{N_i}\left|\phi_j^*(t_j)-\phi_j(t_j)\right| \tag{12}$$

$\frac{U^*}{U_d}=M\in[0,1]$ 每隔 0.1 取一个, $\theta\in[0^\circ,60^\circ]$ 每隔 5° 取一个点,利用混沌变异遗传算法对(12)式进行优化求解,计算得比例系数 k 与 $\frac{U^*}{U_d}$ 、 θ 的对应关系如图 3 及表 1 所示.

表 1 计算结果

K	$\theta(^{\circ})$											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
M	0.1	0.46	0.46	0.45	0.45	0.45	0.45	0.44	0.44	0.44	0.45	0.45
	0.2	0.41	0.41	0.41	0.41	0.40	0.40	0.39	0.39	0.39	0.40	0.41
	0.3	0.37	0.37	0.36	0.35	0.35	0.35	0.34	0.34	0.34	0.35	0.37
	0.4	0.33	0.32	0.32	0.31	0.30	0.32	0.29	0.29	0.29	0.30	0.32
	0.5	0.28	0.28	0.27	0.26	0.25	0.26	0.24	0.24	0.24	0.25	0.28
	0.6	0.24	0.23	0.23	0.22	0.21	0.21	0.19	0.19	0.19	0.20	0.24
	0.7	0.19	0.19	0.18	0.17	0.16	0.16	0.14	0.13	0.14	0.15	0.19
	0.8	0.15	0.14	0.14	0.12	0.11	0.10	0.09	0.08	0.09	0.10	0.15
	0.9	0.11	0.10	0.09	0.07	0.06	0.05	0.04	0.03	0.04	0.05	0.11
	1.0	0.06	0.06	0.04	0.03	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.06

4 验证及结论

为了验证本文方法的优越性,采用文献[10] 的线性化处理结果与本文的优化计算结果,同时在计算机上对 8KVA 逆变器进行仿真分析,图 4 是两者的磁通误差变化曲线,从中可以看出:采用本文的优化 PWM 波驱动逆变器可明显减小磁通误差.

本文针对磁通正弦 PWM 调制技术进行研究, 提出采用遗传求解方法确定零电压矢量分布, 给出了遗传求解的适合度函数, 并采用混沌变异方法对零电压分布系数进行优化求解, 给出了求解结果. 该方法从理论上保证了逆变器具有较好的输出波形.

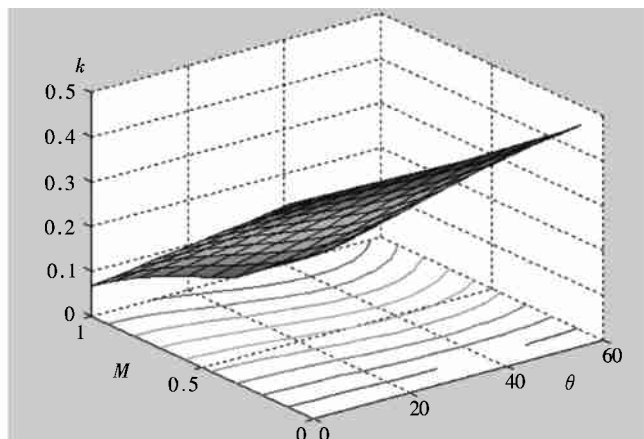


图3 优化计算结果

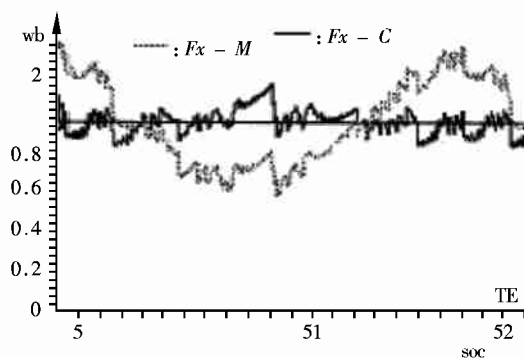


图4 磁通误差对比结果

$F_x - M$: 为文献[10]驱动磁通误差

$F_x - C$: 为本文驱动磁通误差

[参考文献]

- [1] 李永东. 交流电机数字控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [2] Holtz J. Sensorless control of induction motor drives[J]. PROCEEDINGS OF THE IEEE, 2002, 90(8): 1359~ 1394.
- [3] 吴志远, 吴新余. 遗传退火进化算法[J]. 上海交通大学学报, 1997, 31(12): 69~ 71.
- [4] 王平洋, 王广生, 胡兆光. 加快遗传模糊算法的搜索过程[J]. 电网技术, 1999, 23(5): 3~ 6.
- [5] 刘吉来. 混合寻优在无功优化中的应用[J]. 电力建设, 1998, 19(9): 1~ 5.
- [6] 佟纯厚. 近代交流调速[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995.
- [7] J Holtz, P Lammet, W Lotzkat. High-speed drive system with ultrasonic MOSFET PWM inverter and single-chip microprocessor control[J]. Proc IECON' 92, 512~ 517.
- [8] H W Van der Broeck, H C Skudelny, G Stanke. Anlysis and realization of a pulse width modulator based on voltage space vectors [J]. Conf Rec IEEE- IAS Ann Mtg, 1986, 244~ 251.
- [9] S Fukuda, H hasegawa, Y Iwaiji. PWM technique for inverter with sinusoidal output current[J]. Conf Rec IEEE PESC' 88, 35~ 41.
- [10] Shoji Fukuda, Yoshitaka Iwaji, Hirokazu Hasegawa. PWM Technique for Inverter with Sinusoidal Output Current[J]. IEEE Trans On Power Electronics. 1990, 5(1): 54~ 61.

Solution for Distribution of SVPWM Zero Votage Vector by Using Genetic Algorithms

Liu Yongchao¹, Wang Huaiying²

(1. College of Mathematics and Computer Science, Nanjing Normal University, 210042, Nanjing, PRC)

(2. Department of Control Science and Engineering, Nanjing Normal University, 210042, Nanjing, PRC)

Abstract: Based on the discussion about the existing PWM technology, this paper puts forward the duty time calculating method of zero voltage vectors by using Genetics Algorithm with chaotic mutation operator. The optimized result of duty time for zero vector is given.

Key words: SVPWM, zero voltage vector distributon, GA with chaotic mutation operator

[责任编辑: 刘健]