

特定消谐技术开关角计算方法的研究

刘 磊¹ 魏 玲² 翟庆志²

(1. 北京电力设计院 100055 2. 中国农业大学信息与电气工程学院 100083)

摘 要 基于三相半桥式电压型逆变器, 研究了特定消谐 (SHE) 的数学模型。针对 SHE 开关角计算难度大的问题, 给出了开关角计算初值选取方法。算例结果表明该初值选取方法能够实现迭代计算快速收敛, 并得出了 SHE 的过调制特性。对 SHE 做了仿真实验, 结果验证了利用初值选取方法计算的开关角对抑制特定谐波是有效的; 该方法对 SHE 实用化有一定的参考价值。

关键词 特定消谐技术 逆变器 仿真

1 引言

特定消谐 (Selective Harmonic Elimination, SHE) 是一种通过优化选择开关时刻来消除选定低频次谐波的控制方法, 适用于变频器逆变单元。该方法较目前广泛应用的 SPWM 方法具有以下方面的优点: ①在消除低次谐波方面, 输出与 SPWM 相同质量的波形时, 开关频率是 SPWM 的三分之一, 降低了开关损耗, 提高了转换效率, 这一点对于高压大功率设备尤为重要。②在与 SPWM 相同开关频率的情况下, 输出波形质量较高, 不仅减小了电流纹波和电动机的转矩脉动, 而且降低了对输入、输出滤波器的要求。③可以通过调制得到较高幅值的直流输出电压, 提高了直流电压的利用率。但特定消谐法在实际运算中, 由于联立的方程组为非线性超越方程组, 计算方法必须采用牛顿迭代法, 结果的有效性相当大程度地取决于选取合适的初值。而现行的初值选取方法仍采用试探法或查表法, 不仅运算时间长、准确度低, 而且不适合在线计算, 很大程度地制约了 SHE 技术的广泛应用。本文将在传统牛顿迭代法的基础上, 着重研究有效求解 SHE 开关角的方法, 并通过谐波分析对该方法进行了验证。

2 SHE 的数学模型

采用最常见的三相半桥式电压型逆变器为研究对象, 结构如图 1 所示。

对于图中的电路, 单相电压的傅里叶级数可表示为

$$f(\omega t) = - \sum_{j=1}^N [a_n \sin(n\omega t) + b_n \cos(n\omega t)] \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad \alpha_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin(n\omega t) d(\omega t)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t)$$

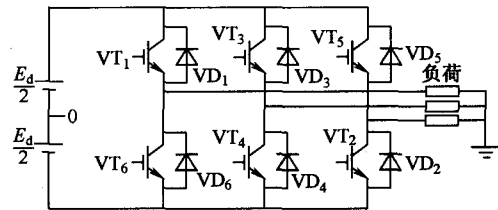


图 1 三相半桥式电压型逆变器结构图

为了能够消除偶次谐波和傅里叶级数中的余弦项, 单相输出波形应满足: 在整周期内以 π 为镜像对称, 同时在半周期内以 $\pi/2$ 为奇对称。A 相波形图如图 2 所示。

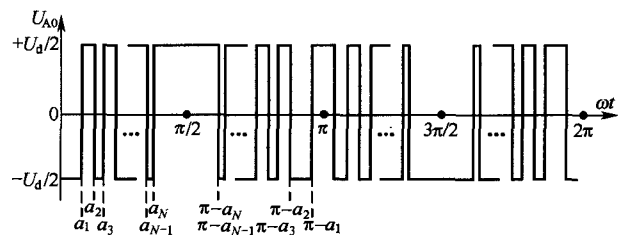


图 2 A 相输出波形

对应图 2 的基波及各奇次谐波分量幅值与直流侧的幅值比 (为表示方便, 令 $U_d/2 = 1$) 可表示为

$$\alpha_k = \frac{4}{k\pi} \left[1 + 2 \sum_{j=1}^N (-1)^j \cos(k\alpha_j) \right] \quad (2)$$

式中, α_j 为 1/4 周期内第 j 个开关角; $k = 1, 3, 5, \dots$ 为基波及谐波次数。

由于三相系统中 3 的整数倍谐波在线电压中因同相被抵消, 所以存在的谐波次数为 5, 7, 11, 13...

如果令 q 为选定的输出基波电压与逆变器直流侧电压的幅值比 $[U_1 / (U_d/2)]$, 被指定消除的 $(N - 1)$ 个谐波幅值为零, 则求解 N 个 1/4 周期内的开关角的方程组为

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{4}{\pi} \left[1 + 2 \sum_{j=1}^N (-1)^j \cos(\alpha_j) \right] = q \\ \alpha_k = -\frac{4}{k\pi} \left[1 + 2 \sum_{j=1}^N (-1)^j \cos(k\alpha_j) \right] = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, $k = 6i \pm 1 (i = 1, 2, \dots)$ 为谐波次数; α_j 为 1/4 周期内第 j 个开关角。

方程组 (3) 是非线性超越方程组, 常用牛顿迭代法来求解。牛顿迭代法求解公式 (3) 的步骤限于篇幅, 不再赘述, 可直接参见文献 [1]。而计算过程收敛与否与初值的选取关系极大。

3 SHE 开关角初值选取方法

3.1 开关角个数 N 的选取

方程组 (3) 的系数矩阵为 $N \times N$ 阶, 而 α_1 被单独列出用于改变 q , 剩余 $(N - 1)$ 个方程决定了抑制谐波的次数。由于抑制的是 $(6i \pm 1)$ 次谐波, 就同时需要两个方程, 即两个开关角。否则, 只抑制 $(6i - 1)$ 次谐波, $(6i + 1)$ 次谐波^[2] 将会严重影响电机的正常运行。因此, $(N - 1)$ 必须为偶数, 即 N 为奇数。此时 $i_{\max} = (N - 1) / 2$, 所要抑制的最大谐波次数为 $6 \times (N - 1) / 2 + 1$ 。这里 N 的大小并没有一个明确的限制, 但就计算的速度和精度来看, N 不能过大。因为 $\alpha_j \in (0, \pi/2)$, 如果 N 超过 90, α_{j-1} 与 α_j 间隔不超过 1° , 给 $\alpha_{j-1} < \alpha_j$ 带来了难度, 不能保证计算的收敛。同时由于计算量过大, 容易发生溢出现象。通过本文的研究表明, N 一般取为 9 ~ 70 之间便可满足实际应用。

3.2 α 的取值范围

一般来说, α 在 $(0, \pi/2)$ 取值, 其他象限利用 1/4 周期偶对称、1/2 周期奇对称来取值, 但文

献 [2] 的结论表明 α_{\max} 在 60° 附近。通过对文献 [2] 所给数据的分析, 发现 α_j 的分布近似成一条直线。如图 3 所示为 $N = 21$ 时的开关角初值选取曲线。从第二个开关角开始 α_j 与 α_{j+1} 间隔要小于 α_{j+1} 与 α_{j+2} 的间隔。

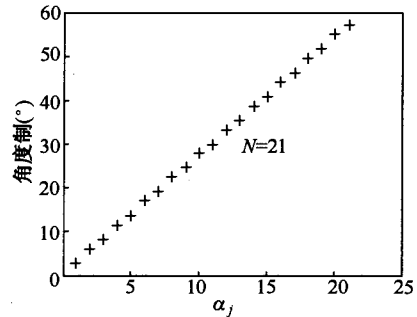


图 3 $N = 21$ 时的开关角初值选取曲线

根据以上两点的分析, 尝试给出开关角初值计算公式

$$\begin{cases} \alpha_1 = 60 / (N + 1) \\ \alpha_j = \alpha_{j-1} + k_1 \times 120 / (N + 1) \\ \alpha_{j+1} = \alpha_j + k_2 \times 120 / (N + 1) \end{cases} \quad (4)$$

$(j = 2, 4, 6, \dots, N - 1)$

式中, N 为奇数; $k_1, k_2 \in (0, 1)$ 为间距系数; $k_1 > k_2$ 且 $k_1 + k_2 = 1$ 。

其中

$$\begin{cases} k_1 = [100 + (N + \Delta)] / 200 \\ k_2 = [100 - (N + \Delta)] / 200 \end{cases}$$

$$\Delta = \begin{cases} 5 & N < 30 \\ 0 & 30 < N < 80 \\ -N + 20 & 80 < N \end{cases}$$

4 应用算例

图 4 为 $N = 21$ 时利用公式 (4) 所得初值代入方程组 (3) 计算的各开关角随 q 变化的轨迹。图中, q 的变化区间为 $[0, 1.15]$, 是一无量纲量; 纵坐标为开关角 α_j , 单位为“度”($^\circ$)。

从图 4 可看出, 初值计算公式 (4) 所得结果代入方程组 (3) 利用牛顿迭代计算时, q 在 $[0, 1.15]$ 任意取值, 都能计算出一组开关角。并且在研究中发现迭代次数最大值为 8。

图 5 所示的是 $N = 33$ 时, q 为 1.15 利用公式 (4) 计算和利用初值对方程组 (3) 牛顿迭代计算结果的对比。图中横坐标为第 j 个开关角 α , 纵坐标为 α_j 的值, 单位为“度”($^\circ$); 图中“+”线所

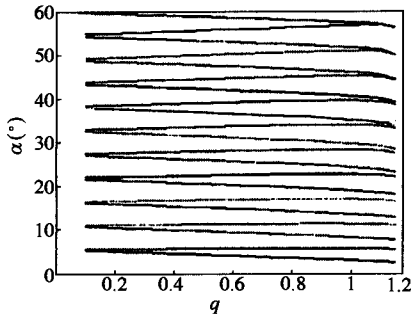


图 4 N = 21 时开关角随 q 变化的轨迹

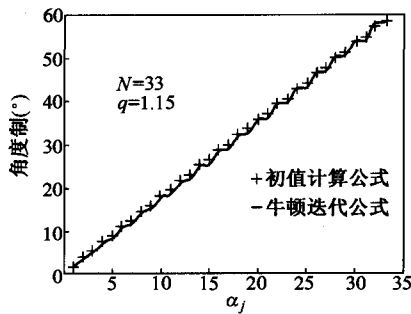


图 5 q = 1.15 时的初值计算与牛顿迭代结果对比
示为公式 (4) 计算的结果，“-”线所示为将公式 (4) 所得初值代入方程组 (3) 利用牛顿迭代计算的结果。迭代次数为 3 次。

从图 5 可看出，将公式 (4) 所得初值代入方程组 (3) 利用牛顿迭代计算的结果近似成一条直线，均与选取的初值分布线十分接近。有效地保证了计算的收敛性和提高了计算的速度。而且图 5 特别之处在于存在一组开关角使 q 等于 1.15，即 SHE 能够实现过调制，这是其独有的，也是其潜在的可利用特性。通过大量的计算，发现 q 的最大值为 1.15。这是 SPWM 方法不容易实现的。

因此，SHE 开关角计算初值选取方法的建立，为今后研究 SHE 开关角计算方法的学者提供了一种可参考的方法。

5 仿真实验及分析

结合以上的研究，本文利用 Matlab 对 SHE 做了仿真实验。实验模型取自 Matlab \ Toolbox；实验步骤包括：利用编制的 SHE 开关角计算程序，计算出事先设定的 q、N 值所对应的开关角时刻并生成数据文件。将该数据文件与仿真实验模型相连，用于控制触发角。逆变器控制单元的结构图如图 6 所示。

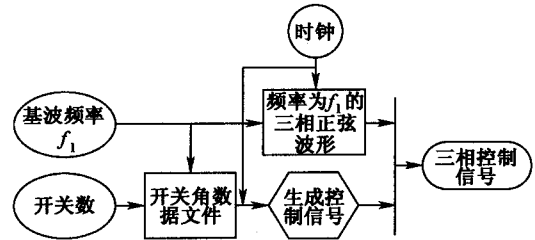


图 6 SHE 逆变器控制单元结构图

通过对仿真实验输出波形的谐波分析，得出了利用初值选取方法计算开关角的谐波抑制结果。根据式 (5) 所抑制的谐波次数来看，对于给定的 N，能抑制的最大谐波次数为 $6 \times (N - 1) / 2 + 1$ 。也就是说，谐波出现的次数应为 $6 \times [(N - 1) / 2 + 1] - 1$ 。例如 N = 17 时，谐波出现的次数为 53。下表是基波频率 f₁ 为 30Hz (q = 0.6)，N 分别为 27、17 时基波及各次谐波幅值。

表 基波及各次谐波幅值

谐波次数	谐波幅值	
	N = 27	N = 17
基波	0.603 0	0.604 3
5	0.000 093	0.000 053
7	0.000 043	0.000 035
11	0.000 038	0.000 051
13	0.000 033	0.000 032
47	0.000 013	0.000 021
49	0.000 031	0.000 038
53	0.000 012	0.664 1
55	0.000 101	0.000 12
83	0.679 2	0.000 053
85	0.000 32	0.000 046

从上表结果来看，输出的基波幅值与设定的 q 值一致；5、7、11、…、6i ± 1 次特定谐波得到了有效的抑制；谐波出现的次数与公式计算的一致。验证了利用初值选取方法计算的开关角实现了抑制特定次数谐波，为 SHE 的实用化提供了有利条件。

6 结束语

(1) 针对 SHE 技术开关角计算初值选取难的问题，找到了一种有效计算初值的方法。通过与计

(下转第 73 页)

平时, MOSFET 导通, V_{DS} 近似为零; 当 PWM 为低电平时, MOSFET 关断, V_{DS} 的电压为电池组供电电压。

6 结束语

该方案充分利用了 DSPIC30F6010 芯片的高速计算功能和丰富的片内外设单元, 使伺服调速系统结构简单、可靠性高、调速性能良好。电动汽车驱动系统要求满足动态响应快、结构简单、起动转矩大, 从实验结果可以看出此方案是可行的。同时, 该系统还可以通过 CAN 总线通信接口组建一个局域网控制网络, 实现复杂的控制。

参考文献

- [1] 汤双清, 廖道训, 吴正佳. 电动汽车的核心技术及发展展望 [J]. 机械科学与技术, 2003, 22 (2): 189 - 244.
- [2] 李永东. 交流电机数字控制系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002, 108 - 112.
- [3] 梁克宇. 几种大功率 GTO 吸收电路的比较 [J]. 电力

(上接第 58 页)

算结果的对比, 验证了初值选取方法能够实现快速收敛, 并讨论了 SHE 的过调制特性。

(2) 通过对 SHE 仿真实验, 进一步验证利用初值选取方法计算出的开关角控制的逆变器, 能够实现抑制特定谐波, 对 SHE 的实用化具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] Patel H S, Hoft R G. Generalized technique of harmonic elimination and voltage control in thyristor inverter: part1-voltagecontrol techniques [J]. IEEE-IA, 1974, 10 (5): 666 - 673.
- [2] 佟为明, 陈向阳, 等. 变频电源特定谐波技术中非线性方程组解法的研究 [J]. 中国电机工程学报, 1998, 18 (5): 357 - 360.
- [3] 费万民, 吕征宇, 姚文熙. 多电平逆变器特定谐波消除脉宽调制方法的仿真研究 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (1): 102 - 106.
- [4] 黄瀚, 纪延超, 张辉, 等. 优化特定谐波 PWM 技术 [J]. 中国电机工程学报, 1997, 17 (5): 344 - 347.

电子技术, 1996 (4): 58 - 60.

- [4] 葛英辉, 李春生, 倪光正. 微型电动车用轮毂电机控制系统的研究 [J]. 中小型电机, 2003, 30 (2).
- [5] 张琛. 直流无刷电动机原理及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [6] 尹衍晨, 范瑜. 基于 DSP 的永磁无刷直流电机控制器设计 [J]. 微电机, 2005, 38 (2).

Design of a Controller for PM Brushless In-Wheel Motor Based on DSP

Fu Zhouxing

(Xi'an University of Science and Technology)

Abstract A digital control system of permanent magnet brushless DC electromotor in electric vehicles is introduced, the control system of BLDCM based on DSPIC30F6010 is proposed. The DSP is used in fewer external components and lower system cost, and improves veracity and real time of DC motor, and easy to be applied.

Keywords electric vehicles DSP control BLDCM

收稿日期: 2006 - 09 - 18

- [5] 胡永恒, 佟为明, 等. 特定谐波 PWM 技术中非线性方程组解法的研究 [J]. 现代电源技术应用, 2001, 9 (1): 136 - 141.
- [6] 张文义, 杨乐民, 佟为明, 等. 特定谐波式变频器的研究 [J]. 电力电子技术, 2002 (8): 53 - 58, 302 - 316.

Study of Calculating Switch Angles for Shet

Liu Lei

(Beijing Electric Power Design Institute)

Abstract The mathematical model of SHE based on the most general three - phase half bridge voltage source inverter is studied. Due to the difficulty of calculating switching angles, a method to SHE choose initial value is presented. The results validate the method can realize fast convergence and show the over modulation character of SHE. The simulation to SHE verifies the method of choosing initial value is valid to restrain the specifically harmonic. The method is valuable for the widely application of SHE.

Keywords SHET inverter simulation

收稿日期: 2006 - 09 - 11