

三电平逆变器 SHEPWM 优化方法的研究

胡存刚, 王群京, 夏秋实, 姜卫东

(合肥工业大学, 安徽 合肥 230009)

摘要:以中点箝位型三电平逆变器(Three-level Inverter, 简称 TLI)为模型,提出了基于蚁群算法(Ant Colony Algorithm, 简称 ACA)求解非线性方程组的方法,求取特定消谐脉宽调制(Selective Harmonic Elimination Pulse Width Modulated, 简称 SHEPWM)的开关角度。ACA 在求解非线性方程组时无需求解方程的初值,故加快了计算速度。用 MatLab/Simulink 仿真研究了消谐波的效果,并用 IGBT 搭建了中点箝位型 TLI 实验电路模型,对 SHEPWM 的消谐波效果进行了验证。实验结果证明了基于 ACA 的 SHEPWM 求解方法在 TLI 应用中的有效性。

关键词:逆变器;谐波;脉宽调制

中图分类号:TM464

文献标识码:A

文章编号:1000-100X(2007)10-0090-03

Optimization Method for SHEPWM Applied to Three-level Inverter

HU Cun-gang, WANG Qun-jing, XIA Qiu-shi, JIANG Wei-dong

(Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract:An optimization method of the Selective harmonic elimination(SHE) technology is introduced based on ant colony algorithm applied to Neutral-point-clamped(NPC) three-level inverter,the thought,model and the solving method of colony algorithm are emphatically presented.The method don't need to determine the initial values when solving the SHEPWM nonlinear and transcendental equations.Simulative and experimental results show that the optimization method is satisfactory and harmonic elimination is effective.

Keywords:inverter; harmonic; pulse width modulation

Foundation Project:Supported by Science and Technology Tackle Key Problem of the "11th Five-year" Plan of Anhui Province (No.06012143H)

1 引言

三电平逆变器(TLI)解决了功率元器件耐压低, dv/dt 降低的不足,改善了逆变器的输出波形,因此已成为当今电力电子和电力传动技术的研究热点^[1]。现有 TLI 的 PWM 控制方法是研究 TLI 的关键技术,国内外专家学者已提出了许多 PWM 方法,如 SPWM、准正弦波 PWM、特定消谐波 PWM (SHEPWM)、谐波效应最小 PWM 和 SVPWM 等。其中, SHEPWM 方法能够在电压波形特定位置上设置缺口,通过每个周期中逆变器的多次换相,恰当地控制逆变器的 PWM 电压波形,使逆变器的输出电压中不存在某些特定谐波,但因 SHEPWM 方法需要求解非线性超越方程组,一般只能通过数值法求解。因此困难在于:①选取合适的初值,使解法收敛;②非线性方程组的解法。国内外学者提出了许多相关算法^[2,3],例如:牛顿迭代法、吴方法和同伦算法等,这些方法均需给出初值,容易使算法出现不收敛和计算

速度慢等缺点,难以实现在线计算,当前多采用离线计算和查表法取得开关切换的时间。

为此,提出了基于蚁群算法(ACA)求解非线性方程组的方法,以求取 SHEPWM 的开关角度。ACA 在求解非线性方程组时无需给出方程的初值,因而加快了计算速度。随着 DSP 和 FPGA 技术的发展,为在线计算提供了可能。以 TLI 为模型,用 MatLab/Simulink 仿真研究了消谐波效果,并用 IGBT 搭建了 TLI 实验电路模型,对 SHEPWM 的消谐波效果进行了验证。实验结果证明了基于 ACA 的 TLI SHEPWM 开关模式的有效性。

2 TLI SHEPWM 非线性方程组建立

图 1 示出中点箝位型(Neutral Point Clamped, 简称 NPC)TLI 的电路原理图。

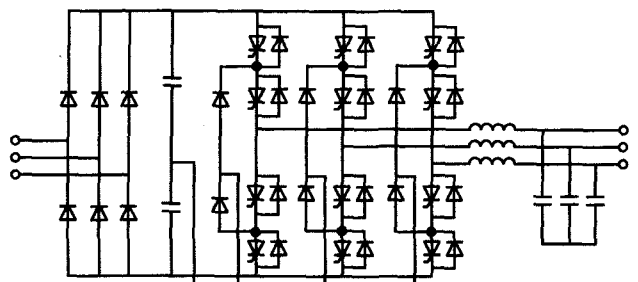


图 1 NPC TLI 的电路原理图

基金项目:安徽省“十一五”科技攻关资助项目(06012143H)

定稿日期:2007-05-22

作者简介:胡存刚(1978-),男,安徽宿松人,博士生,讲师。研究方向为电力电子与电气传动和生物医学工程。

图 2 示出 NPC 三电平逆变器(NPC TLI)的 A 相电压波形 u_{AN} 。由图 2 波形的对称性可见,零次和偶次谐波已自然消除,因而可用傅立叶级数表示,为:

$$u_{AN}(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \sin(n\omega t) + b_n \cos(n\omega t)]$$

$$= \sum_{n=1}^{\infty} U_{sm(n)} \sin n\omega t \quad (n=1,3,5,\dots) \quad (1)$$

$$U_{sm(n)} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} U_d \sin(n\omega t) d(\omega t)$$

$$= \frac{2U_d}{n\pi} \sum_{i=1}^N (-1)^{i+1} \cos(n\alpha_i) \quad (i=1,3,5,\dots) \quad (2)$$

式中 U_d ——直流侧电源电压 N ——半个周期的脉冲数

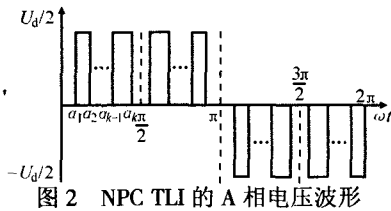


图 2 NPC TLI 的 A 相电压波形

考虑到 NPC TLI 应用系统中线电压不存在零序谐波,所以重点消除 5,7,11,13,⋯,6i-1,6i+1(i=1,2,3,⋯)次谐波。由式(2)可知,各次谐波的幅值是开关角 α_i 的函数,只要适当选择 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots$ 的值,就可使 $U_{sm(i)}=0$,即消除了频率为 $i\omega$ 的高次谐波。令 $\alpha=[\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N]^T$,对于向量 α 的约束条件是:

$$0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_{N-1} < \alpha_N < \pi/2 \quad (3)$$

$$\begin{cases} f_1(\alpha) = \frac{U_{sm(1)}}{U_d/2} = \frac{4}{\pi} \sum_{i=1}^N (-1)^{i+1} \cos \alpha_i = m \\ f_n(\alpha) = \frac{U_{sm(n)}}{U_d/2} = \frac{4}{n\pi} \sum_{i=1}^N (-1)^{i+1} \cos(n\alpha_i) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

(n=5,7,11,⋯,6i-1,6i+1,⋯N)

式中 m ——可消除的最高次谐波次数

将式(4)写成向量形式,为:

$$F(\alpha)=[f_1(\alpha), f_2(\alpha), \dots, f_N(\alpha)]=[m, 0, \dots, 0]^T \quad (5)$$

3 ACA 及方程的求解

ACA 来自于对自然状态下蚂蚁觅食行为的研究,是意大利学者 Dorigo M 于 1991 年首次提出的。其本质上是一个复杂的智能系统,具有较强的鲁棒性,优良的分布式计算机制,易于与其他方法结合。如今这一新兴的仿生优化算法已经成为人工智能领域的一个研究热点。ACA 已广泛用于对离散空间最优化的研究^[4,5],但在电力电子中的应用较少;然而它用于电力电子将具有广阔的前景,它能为复杂的非线性方程组求解,也能为非线性功率变换器和其他电力电子器件的开关规律提供一种全新的思路和方法。

与基本 ACA 最接近的一种连续空间蚁群算法

(Touring Ant Colony Optimization, 简称 TACO) 是 2000 年 Hiroyasu 等人提出的,之后 Karaboga 等人对 TACO 做了改进。实践表明,使用类似于离散优化 ACA 结构的连续优化 ACA 能以较快的速度求得函数的最优解,而且这种类型的方法,在收敛性和收敛速度等许多方面都能很方便地借用已有的理论。现将连续空间 ACA 用于 SHEPWM 非线性超越方程组的求解,得到了较好的效果。

采用 TACO 求解非线性方程。由式(4)可得:

$$\begin{cases} g_1(\alpha) = \frac{4}{\pi} \sum_{i=1}^N (-1)^{i+1} \cos \alpha_i - m = 0 \\ g_2(\alpha) = \frac{4}{5\pi} \sum_{i=1}^N (-1)^{i+1} \cos(5\alpha_i) = 0 \\ \dots \\ g_N(\alpha) = \frac{4}{N\pi} \sum_{i=1}^N (-1)^{i+1} \cos(N\alpha_i) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

可将式(6)理解为求 N 个目标的最优化问题,

$$\text{即: Min: } \begin{cases} y_1 = [g_1(\alpha)]^2 \\ y_2 = [g_2(\alpha)]^2 \\ \dots \\ y_N = [g_N(\alpha)]^2 \end{cases} \quad (7)$$

根据目标规划法的相关原理,将上述 N 个目标统一为一个目标,即:

$$\text{Min: } y = -\frac{1}{1+y_1^2+y_2^2+\dots+y_N^2} \quad (8)$$

由式(8)可知,当 N 个目标函数均取到最小值零时, y 也就能达到最小。以此作为适应度函数,利用 TACO 便可求出方程的近似解(集)。

现以消去 5,7,11 次谐波为例,利用 AGA 解方程(6),计算出 $\alpha_1 \sim \alpha_4$,得到开关角度的解(集)为:

$$\begin{cases} \frac{4}{\pi} \cos \alpha_1 - \cos \alpha_2 + \cos \alpha_3 - \cos \alpha_4 - m = 0 \\ \frac{4}{5\pi} \cos(5\alpha_1) - \cos(5\alpha_2) + \cos(5\alpha_3) - \cos(5\alpha_4) = 0 \\ \frac{4}{7\pi} \cos(7\alpha_1) - \cos(7\alpha_2) + \cos(7\alpha_3) - \cos(7\alpha_4) = 0 \\ \frac{4}{11\pi} \cos(11\alpha_1) - \cos(11\alpha_2) + \cos(11\alpha_3) - \cos(11\alpha_4) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

由于得到的式(9)有多个解(集),因此在满足误差限制的前提下,采用以总谐波畸变率 THD 最小为

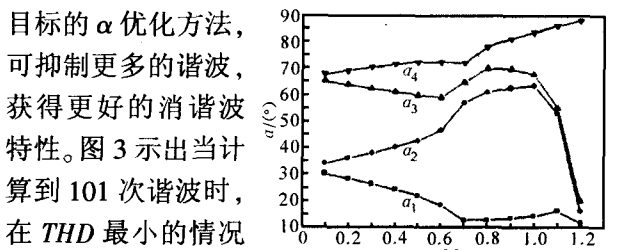


图 3 SHEPWM 开关角度的解轨迹

角度的解轨迹。

4 仿真研究

为了验证提出的 ACA 理论在 TLI 中消谐波的有效性, 采用 MatLab7.0/Simulink 仿真软件, 以 NPC TLI 逆变器为模型, 对调制指数为 0.9 时, 用于消除 5, 7, 11 次谐波进行了仿真研究。由 TACO 得到的开关角度分别为 $\alpha_1=13.3507$, $\alpha_2=62.5519$, $\alpha_3=69.6478$, $\alpha_4=81.1987$ 。图 4a, b 示出输出频率为 50Hz 时的线电压 u_x 仿真波形及其频谱分析。由图可见, 在基波频率为 50Hz 时, 相电压中的 5, 7, 11 次谐波被消除了。

5 实验研究

为了进一步证实基于 ACA 的 TLI SHEPWM 开关模式的正确性, 在实验室搭建了由 TMS320LF2407A DSP 控制, M57962AL 为驱动元件, 采用 2MBI200TA-600 IGBT 为主开关器件的 NPCTLI 实验平台。负载拖动为 0.75kW 风机, 运行频率为 50Hz。对在 $m=0.9$ 下, 用于消除 5, 7, 11 次谐波进行了实验。图 4c, d 示出采用 Tektronix 数字示波器实测的线电压 u_{ab} 波形及其频谱分析。

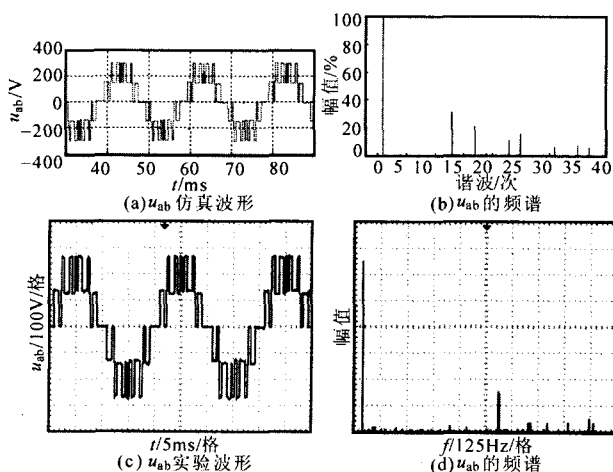


图4 仿真及实验结果

(上接第86页) 于 FPGA 的系统上实现了逻辑硬件电路的设计, 并在带电机负载的三电平逆变器上进行了实验。实验结果证实了它的可行性。该方法简单有效, 而基于 FPGA 硬件电路的设计仍有很大的扩展空间, 为更高电平及其死区补偿的实现提供了一种可能。

参考文献

- [1] Chen S, Joos G. Symmetrical SVPWM Pattern Generator using Field Programmable Gate Array Implementation[A]. Applied Power Electronics Conference and Exposition, 17th Annual IEEE[C]. 2002, 2: 1004~1010.
- [2] Zhigan Wu, Jianping Ying. A Novel Dead Time Compensation Method for PWM Inverter [J]. IEEE Power Electronics

and Drive Systems, 2003, 2: 1258~1263.

6 结论

在国家大力推广节能降耗新技术的背景下, 提出了基于蚁群算法求解非线性方程组的方法求取 SHEPWM 的开关角度, 蚁群算法在求解非线性方程组时不像牛顿迭代法、吴方法和同伦算法等, 无需给出方程的初值, 加快了计算速度, 随着 DSP 和 FPGA 技术的发展为在线计算提供了可能。以 NPC 三电平逆变器为模型, 用 Matlab 仿真研究了消谐波的效果, 并用 IGBT 自行搭建了三电平逆变器实验电路模型, 对基于蚁群算法的 SHEPWM 开关模式进行了实验验证。实验结果证明, 该基于蚁群算法的 NPC 三电平逆变器 SHEPWM 开关模式的有效性。提出的方法也可用于其它逆变器的消谐方程组的求解。

参考文献

- [1] A Nabae. A New Neutral-point-clamped PWM Inverter[A]. ISA'80[C]. 1980; 761~76.
- [2] Li Li, Yaguang Liu. Multilevel Selective Harmonic Elimination PWM Technique in Series-Connected Voltage Inverters[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2000, 36(1): 160~170.
- [3] Maswood A I, Shen We, Rahman M A. A Flexible Way to Generate PWM-SHE Switching Patterns Using Genetic Algorithm [A]. Sixteenth Annual IEEE of Applied Power Electronics Conf. and Exposition, 2001 [C]. 2001: 2008~1998.
- [4] 孙学勤, 刘丽, 付萍, 等. 一种连续空间优化问题的蚁群算法及应用[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(34): 217~220.
- [5] Annaluru, R Das, S Pahwa A. Multi-level Ant Colony Algorithm for Optimal Placement of Capacitors in Distribution Systems [A]. Congress on Evolutionary Computation, 2004 [C]. 2004, (2): 1932~1937.
- [3] Zhou Yuan, Xu Feipeng, Zhou Haoyong. Realization of An FPGA Based Space-Vector PWM Controller [A]. IEEE Power Electronics and Motion Control Conference [C]. 2006, 1: 1~5.
- [4] Zhichao Liu, Pengju Kong, Xuezhi Wu, et al. Implementation of DSP-based Three-level Inverter with Dead Time Compensation[A]. IEEE Power Electronics and Motion Control Conference[C]. 2004, 2: 782~787.
- [5] S Bolognani, M Zigliotto. Self-commissioning Compensation of Inverter Non-Idealities for sensor-less AC Drives Applications[A]. Proc. of IEEE Power Electronics Machines and Drives[C]. 2002, 30~37.