

文章编号: 1008 - 7842 (2005) 04 - 0022 - 04

自然采样 SPWM 逆变器的计算机仿真

宋术全, 李 红

(铁道科学研究院 机辆所, 北京 100081)

摘 要 根据自然采样 SPWM 基本原理, 结合 SABER 软件仿真分析了调制系数、载波频率、互锁时间对逆变器输出电压的影响。逆变器系统的仿真结果和试验结果的对比验证了 SABER 软件仿真结果的准确性, 同时也说明 LC 滤波器对高频谐波良好的抑制能力。

关键词 SPWM; 逆变; 计算机仿真; SABER

中图分类号: TM464; TP391.9 **文献标志码**: A

正弦脉宽调制技术 SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation) 是用所期望的正弦波为“调制波”(Modulation Wave), 而以 N 倍于调制波频率的三角波(或锯齿波)为“载波”(Carrier Wave)的一种逆变器控制技术^[1]。这项技术的特点是原理简单, 通用性强, 控制和调节性能好, 具有消除谐波、调节和稳定输出电压的多种作用, 是一种比较好的波形改善法, 在目前的中小型逆变器中获得了广泛的应用。

近年来, 随着计算机技术的进步, 以计算机为基础的仿真技术广泛地应用于各个领域。在电力电子方面, 采用计算机仿真可以帮助研究人员深入了解系统的各种特性, 对比不同控制方案的优劣, 选择合适的结构和最优的参数, 同时避免了设计研发的盲目性, 加速了设计周期, 节约了开发成本。本文介绍了利用 SABER 软件对自然采样 SPWM 逆变器的仿真过程, 并给出仿真结果, 同时结合试验结果对仿真结果进行对照说明。

1 SABER 软件

SABER 软件是 Synopsys 公司系统设计方面的主要产品之一, 并成为目前系统设计领域的主要 CAE 工具。目前, SABER 是唯一的多技术、多领域的系统仿真产品, 它可以仿真电力电子元件、电路和系统。从结构上看, 它主要由 3 部分组成: SABER SKETCH、SABER GUIDE、SABER SCOPE。SABER SKETCH 用于以图形形式输入被仿真的系统; SABER GUIDE 把输入的系统当作一个网络, 通过网络列表 (Netlist) 提取系统的结构信息, 然后通过直流分析 (DC Analysis) 得到系统的静态工作点, 在此基础上进行时域 (Time Do-

main) 及频域 (Frequency Domain) 范围内的各种分析; SABER SCOPE 用于观看所有变量的波形, 并对波形进行各种分析计算^[2]。

2 三相 SPWM 逆变器的基本原理

三相 SPWM 逆变器的主电路如图 1 所示, 它由 6 个带反并联二极管的全控开关器件构成。在控制上, 3 个半桥间依次相差 $1/3$ 个周期 (120°), 同一桥臂上下两开关轮流导通和关断。滤波前相电压是幅值为 $U_d/2$ 的方波 (U_d 为直流侧电压), 线电压是幅值为 U_d 的方波。

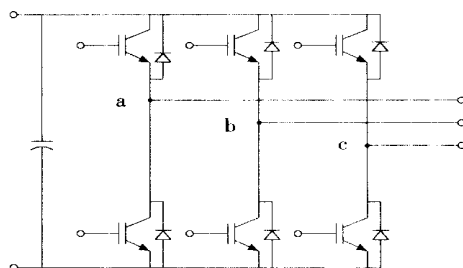


图 1 三相 SPWM 逆变器主电路原理图

SPWM 控制技术的采样方法有多种, 自然采样法是以正弦波和三角波的交点来作为开关导通和关断的时刻。图 2 和图 3 分别为载波比 $N = 45$ 时的相电压和线电压波形。

线电压频谱如图 4 所示, 线电压频谱具有以下特点:

线电压谐波主要集中在三角波频率 f 及其倍频 $2f$, $3f$, ... 为中心的周围, 而且不含有相对于基波的低次谐波。

宋术全 (1976 -) 男, 山东诸城人, 硕士生 (收稿日期: 2005 - 05 - 17)

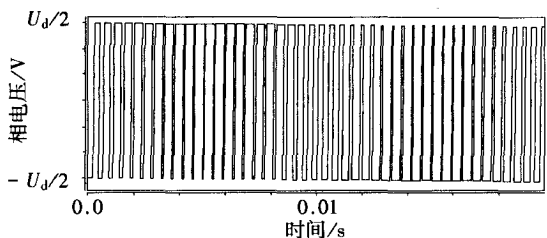


图 2 $N = 45$ 时相电压波形

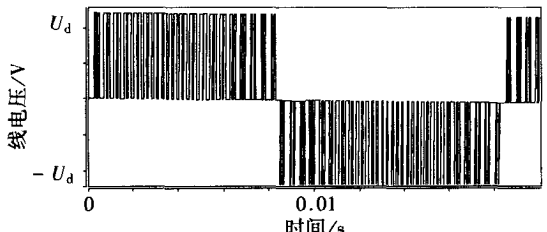


图 3 $N = 45$ 时线电压波形

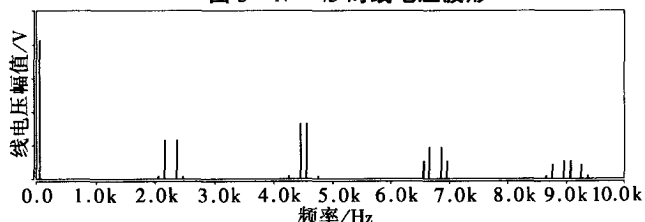


图 4 线电压的频谱特性

在输出频谱中存在的谐波频率为

$$f_{ni} = (kN + j)f, \text{ 并且 } U_{k+N+j} = U_{k+N-j}。$$

其中 k 代表第 k 个分布中心, $k=1, 2, 3, \dots$, 当 k 取偶数时, j 取奇数, 即 $j=1, 3, 5, \dots$; 当 k 取奇数时, j 取偶数, 即 $j=2, 4, 6, \dots$ 。

线电压中 $3k$ 次谐波的幅值为 0 ($k=1, 2, 3, \dots$)^[5]。

3 各因素对输出电压的影响

3.1 调制系数 M

在 SPWM 中, 通常正弦调制波的峰值与三角形载波的最大值之比称为调制系数 (也称“调制比”), 用 M 来表示。三相 SPWM 逆变器基波幅值 $B_1 = \frac{\sqrt{3}M \cdot U_d}{2}$ ^[4], 所以在 U_d 一定的情况下, 交流侧线电压的基波幅值 B_1 随着 M 的增大而增大。调制比的不同也会影响到输出电压的谐波, 通常 M 在 $0 \sim 1$ 之间变化, 在该范围内, 随着 M 增大谐波含量减小。表 1 是不同 M 下仿真出的基波幅值及谐波含量 THD (载波比 $N=45$ 、 $U_d=600V$)。

表 1 不同调制系数的仿真结果

调制系数 M	0.6	0.7	0.8	0.9
基波幅值 B_1/V	313.7	365.5	416.1	468.9
谐波含量/%	119.5	104.6	91.4	79.6

3.2 载波频率

根据上面的结论可知 SPWM 电压型逆变器的输出电压谐波皆分布在载波频率的整数倍周围。也就是说逆变器输出电压的谐波与载波频率是密切相关的。如果提高 SPWM 的载波频率, 则逆变器输出电压的主要谐波也会分布在较高的频率段^[5]。为了确保输出电压是正弦波, 通常在输出电压侧加装低通 LC 滤波器, 如果线电压的谐波频率越高, LC 滤波器的抑制能力越强, 输出电压的谐波含量越低。

3.3 互锁时间

逆变器主回路的功率开关器件选用的是 IGBT, 由于 IGBT 存在着一定的开关时间, 为了防止上下桥臂直通, 往往根据 IGBT 的开关时间设置一段互锁时间 T_d (也称“死区时间”)。在逆变器中互锁时间和 IGBT 开关时间的存在也会影响输出电压的谐波。

(1) 空载和阻性负载

上下桥臂不设置互锁时间时相电压 u_{ao} 波形见图 2, 设置互锁时间以后, 上桥臂 IGBT 导通时相电压为 $U_d/2$, 下桥臂 IGBT 导通时相电压为 $-U_d/2$ 。在互锁时间 T_d 内, 上下 IGBT 均不导通, 两个反并联二极管均截止。跟未设置互锁时间相比, 逆变器相电压 u_{ao} 在上下桥臂导通前都有一段为 0, 其输出电压值为 0, 如图 5 所示。此时, 相电压的电压波形 u_{ao} 可以看成未设置互锁时间时的电压 u_{ao} 与误差波 u_{aa} 的叠加 ($u_{ao} = u_{ao} + u_{aa}$), 误差波 u_{aa} 见图 6。对误差波进行傅立叶分析得到的仿真结果见图 7。

空载和阻性负载时, 反馈二极管不续流, 死区对

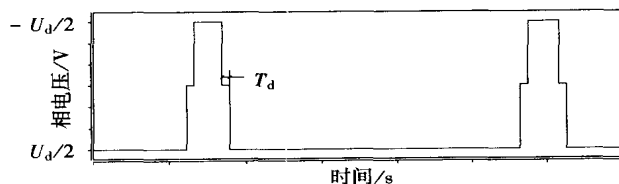


图 5 空载或阻性负载时相电压波形

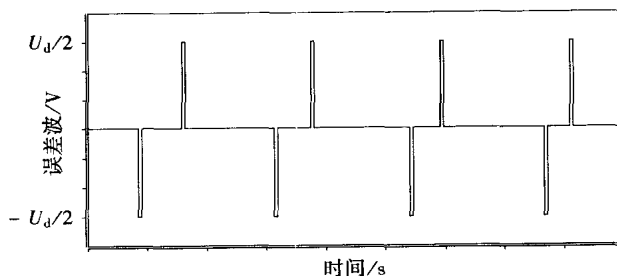


图 6 空载或阻性负载时误差波 u_{aa} 的波形

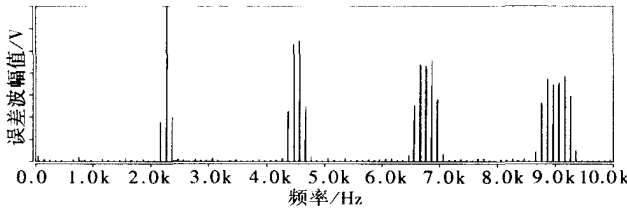


图 7 空载或阻性负载时误差波 u_{aa} 的频谱特性

基波没有影响,也不产生新的低次谐波,只对原有高次谐波幅值产生影响^[4],图 7 的 SABER 仿真结果也验证了这一结论。

(2) 感性负载

逆变器带感性负载时,由于续流二极管的存在,在互锁时间内,若相电流大于 0,下桥臂反并联二极管续流,所有的正脉冲宽度都减小 T_d ,所有负脉冲宽度都增加 T_d ;若相电流小于 0,上桥臂反并联二极管续流,所有的正脉冲宽度都增加 T_d ,所有负脉冲宽度都减小 T_d ;此时的误差波 u_{aa} 如图 8 所示。相应的误差波 u_{aa} 的频谱图见图 9。

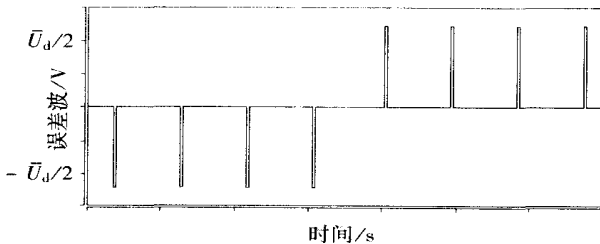


图 8 感性负载时误差波 u_{aa} 的波形

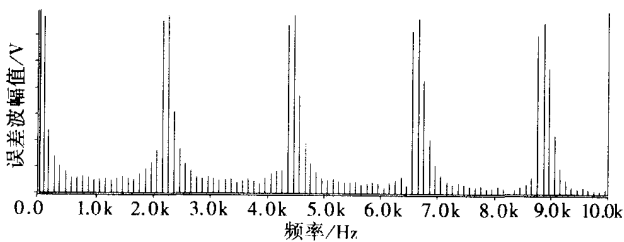


图 9 感性负载时误差波频谱特性

从图 9 可以很明显地看出,逆变器带感性负载时,反馈二极管续流,因而在相电压中产生了基波附近的低次谐波(3, 5, 7, ……等奇数次谐波)。

以上所讨论的是互锁时间对相电压的影响,至于线电压可以利用相电压和线电压的关系(线电压中 3k 次谐波幅值为 0,基波和非 3k 次谐波幅值是相应相电压幅值的 $\sqrt{3}$ 倍)得出互锁时间对线电压的影响。

4 三相 LC 滤波器

三相 LC 滤波器如图 10 所示,它是一个低通滤波

器,它可以有效地抑制输出电压中的高次谐波。从前面的分析可知,滤波前电压与相电流有关,电感电流也会对滤波前的电压波形造成一定的影响。

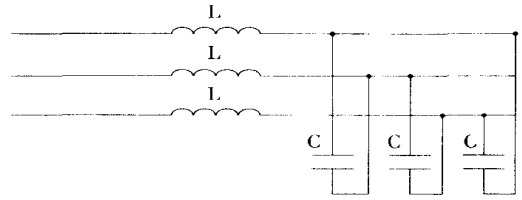


图 10 三相 LC 滤波器原理图

5 计算机仿真

5.1 仿真系统构成

以上部分讨论了调制系数、载波频率、互锁时间等因素对输出电压谐波的影响,作为一个电力电子系统,输出电压的谐波是多种因素综合的结果。

利用 SABER 软件对逆变器进行仿真,仿真系统如图 11 所示,仿真系统中的直流电源、三相全桥、LC 滤波和负载均按照要求采用 SABER 元件库中的元件搭建,具体的元件参数按照实际试验时的参数进行设置。“直流电压”环节将检测到的直流电压值送至“控制电路”,“线电压”环节取交流侧线电压的有效值。“控制电路”环节的输出是三相全桥中 6 个 IGBT 的驱动信号,当直流侧电压过低时降压降频工作,同时根据线电压的有效值来动态地调节调制系数 M 以保持线电压稳定。其中“直流电压”环节和“控制电路”环节是用 MAST 语言编写的模块,而“线电压”环节为 SABER 元件库中的元件。

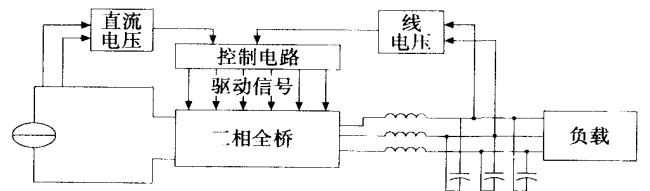


图 11 SPWM 逆变器仿真系统结构图

5.2 仿真参数

直流侧电压: $U_d = 340\text{V}$,载波比: $N = 48$,系统额定输出容量为 100kVA ,负载功率因数 $\cos = 0.8$,互锁时间 $T_d = 10\mu\text{s}$,滤波电感 $L = 0.4\text{mH}$,滤波电容 $C = 110\mu\text{F}$ 。

5.3 仿真结果

(1) 空载时

图 12 和图 13 分别是空载时线电压的仿真波形和试验波形,对线电压进行傅立叶分析,得到线电压的谐波含量是 3.1%,这跟试验结果是完全吻合的。图

14 和图 15 分别是滤波前后线电压的频谱，滤波前线电压主要是集中在载波频率的整数倍附近，另外还有少量的低次谐波，滤波后的线电压高次谐波已经大大地降低了，谐波主要是 5、7、11、13 等低次谐波。

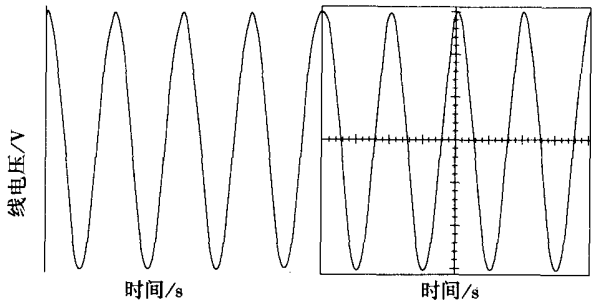


图 12 空载线电压的仿真波形 图 13 空载线电压的实际波形

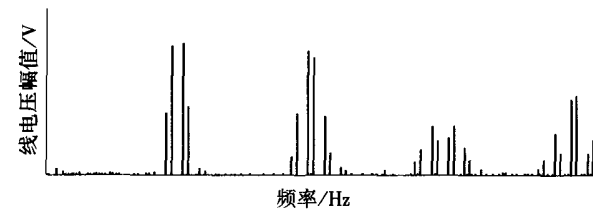


图 14 空载滤波前的线电压频谱特性



图 15 空载滤波后的线电压频谱特性

(2) 额定负载时

图 16 和图 17 是逆变器在额定负载时 (100kVA)，线电压的仿真波形和试验波形。图 18 和图 19 为逆变器在额定负载时滤波前后线电压的频谱特性，与空载时的情况类似，经滤波后线电压中的高次谐波基本上被滤掉了，线电压谐波含量为 2%，这进一步验证了 SABER 仿真结果的可信性。

6 结论

对自然采样 SPWM 逆变器的计算机仿真结果验证了调制系数、载波频率、互锁时间等因素对输出电压的影响。

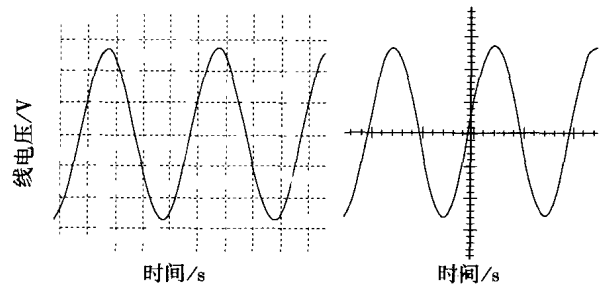


图 16 额定负载线电压的仿真波形 图 17 额定负载线电压的实际波形

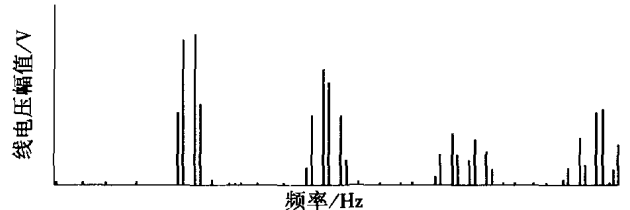


图 18 额定负载滤波前的线电压频谱特性

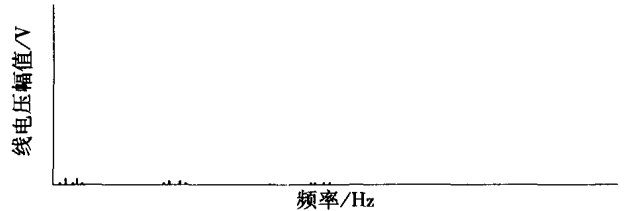


图 19 额定负载滤波后的线电压频谱特性

逆变器仿真结果和试验结果的一致性说明了 SABER 软件仿真结果的准确性。充分利用好 SABER 软件能够大大地提高电力电子产品的研发能力和设计水平。

参考文献

- (1) 邵国衡主编. 电力电子技术 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1997.
- (2) 李波. 四象限变流器 PWM 双闭环控制系统的计算机仿真 [J]. 机车电传动, 2000 (3): 16~19.
- (3) 佟为明, 李可敬, 翟国富, 徐会明. SPWM 电压源逆变器变压变频过程的谐波分析 [J]. 电力电子技术, 1995 (8): 47~51.
- (4) 刘凤君编著. 正弦波逆变器 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- (5) 吴忠, 李红, 左鹏, 刘伟志. 自然采样 SPWM 逆变电源的谐波分析及抑制策略 [J]. 电网技术, 2001 (4): 17~20.

Computer Simulation of Natural Sampling Inverter

SONG Shu - quan , LI Hong

(Locomotive and Car Research Institute , China Academy of Railway Sciences , Beijing 100081 , China)

Abstract: According to the basic principle of natural sampling SPWM, the software of SABER is used to simulate and analyse the factors that influence inverter output voltage. The factors include modulation coefficient, carrier wave frequency and dead time. By contrast the simulation and experimental results of inverter system, it can be verified the accuracy of simulation, and it shows that LC filter can filter the high frequency harmonic effectively.

Keywords: SPWM; invert; computer simulation; SABER