

基于开关函数的三相电压源型逆变器的新型仿真模型

武小梅¹, 徐新², 聂一雄¹

(1. 广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006; 2. 国电蚌埠发电有限公司, 安徽 蚌埠 233411)

摘要: 静止电力变换器的性能可以通过 PSPICE 等电路仿真软件来进行分析。然而, 在研究其性能时通常采用一组实际的开关来模拟, 这样会由于电路结构复杂而导致运行时间过长和出现收敛问题。提出在 PSPICE 中采用宏观模型来模拟三相电压源型逆变器(VSI), 所提出的宏观模型基于 VSI 的开关函数而不是实际的电路结构。这种模型适用于稳态和大扰动暂态分析。使用这种方法, VSI 可以被模拟成多端口网络以避免由于使用电力开关的实际非线性微观模型而产生的问题。给出了使用 SPWM 技术的 VSI 的模型, 并通过仿真研究计算了输出电流的谐波畸变率, 证明了所提出模型的有效性。

关键词: 三相电压源逆变器; 宏观模型; 开关函数; 仿真

New simulation model of three-phase voltage source inverter based on switching functions

WU Xiao-mei¹, XU Xin², NIE Yi-xiong¹

(1. Faculty of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;
2. Guodian Bengbu Power Generation Co., Ltd, Bengbu 233411, China)

Abstract: Three-phase inverters can be analyzed by simulation software packages such as PSPICE, MATLAB, and PSIM. But when analyzing their performances, they are commonly modeled as a set of real switches, which brings about long executive times and sometimes convergence problems due to complex circuit configuration. Macromodels to simulate three-phase voltage source inverter (VSI) on PSPICE are proposed in this paper. The proposed macromodels are based on inverter switching function rather than real circuit configuration. These models are applicable to steady state and large signal transient analysis. By using this method, voltage source inverter (VSI) is simulated as multiport networks avoiding the physical nonlinear micromodels of the power switches. The VSI model with SPWM is proposed. Then the total harmonic distortion (THD) of output current is calculated through simulation. And the effectiveness of the proposed models is proved.

Key words: three-phase voltage source inverter; macromodel; switching function; simulation

中图分类号: TM743 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)11-0074-04

0 引言

在电力电子系统中包括无源元件、二极管、晶闸管和其它固态开关。因此当这些开关在控制器的作用下作为时间的函数开和关的时候, 电路的拓扑结构就会发生变化。通常不可能也不需要把这些电路状态(电压和电流)用时间的闭环函数来表示。但是通过计算机仿真可以模拟类似的电路。

计算机仿真通常用来研究分析新电路的性能, 以加深对电路的理解。由于使用计算机仿真比在实验室的硬件面包板上更容易获得某个参数对系统性

能的影响, 所以在工业上这种仿真可以缩短整个设计过程。仿真被用来计算电路波形、系统的动态和稳态性能, 以及不同元件的电压和电流额定值。值得注意的是在电力电子领域信号级的计算机仿真和在实验室中用硬件样机来证明概念是互补的。也就是说不能认为计算机仿真可以代替硬件(面包板)样机。

对开关型电力变换器的研究^[1-6]表明传递函数和开关函数的概念对于变换器的研究和性能优化都是一个强有力的工具, 这些变换器包括电压源型逆变器、电流源型逆变器(CSI)以及可控 PWM 整流器(CR)等。事实证明这种技术对谐波分析和系统仿真都是非常有好处的。它允许将变换器模拟为一个连接输入和输出端口的多端口电路, 其中包括电压控制电压源和电流控制电流源等。控制这些电源

基金项目: 广东省教育厅专项重点实验室基金(IDSYS200701)和广东工业大学青年教师基金(052032)

的信号为由 PWM 技术和变换器运行模式所确定的两级或三级开关函数。

本文以电压源型逆变器为例, 通过对其性能的分析, 建立了基于两级开关函数的三相电压源型逆变器的 PSPICE 仿真模型, 给出了 VSI 在 SPWM 控制方案下的详细模型, 并通过仿真计算验证了这种方法在谐波分析中的作用以及所提出模型的有效性。

1 不同级别的电力电子系统仿真

在电力电子系统的计算机仿真中非常关键的几个因素如下:

1) 包括二极管和晶闸管在内的固态开关, 当它们从一个状态向另一个状态转换时呈现出极端的非线性。仿真程序应该以合适的方式表示这些状态的转换。

2) 仿真也许需要很长时间。对于系统中的不同部分的响应时间, 即时间常数, 可能会相差几个数量级。例如, 在电机驱动的例子中, 半导体开关具有毫秒级甚至更小的开关时间, 然而机械时间常数或电机和负载的响应时间是秒一级甚至分钟级的数量级。这就需要仿真要以很小的时间步长来进行以得到能代表最小时间常数的分辨率的精度, 例如开关。因此, 在同一仿真中, 最大的仿真时间通常很长并且由最大的时间常数决定。

3) 并不是总需要精确模型。这对电力半导体器件尤其正确。

4) 有时即使是只对稳态波形感兴趣, 但由于在仿真开始时电路的初始状态是未知的, 也会导致仿真时间过长。

上述因素要求进行仿真前仔细地分析仿真的目的。通常, 不需要仿真系统的所有细节(至少在仿真之初是这样, 但也许在最后一步需要这些细节)。原因是细节导致仿真时间过长, 仿真的输出结果会很多, 以致掩盖了我们感兴趣的问题。由于这些原因, 最好的仿真是用最简单的仿真来达到仿真的目的。也就是说, 必须简化系统来达到仿真的目的。

电力电子系统的计算机仿真主要包括下面两个等级^[2]:

1) 在开关级和电路级的变换器仿真

微观模型通常被用在开关电路的仿真分析中, 例如电力开关、驱动器或缓冲电路的仿真中, 用来研究开关的损耗。并且可以用在参数调整和系统应用的仿真中。在微观模型中二极管、双极型场效应管以及其它普通开关都被描述成非线性可控电源, 其中包括指数函数。因此会导致执行时间长、产生

大量的数据(在数值积分中需要小的时间步长)并且偶尔会发生收敛问题。

2) 系统级的仿真

系统级仿真关心的是如何验证变换器的设计和进行性能分析。在这一级仿真中不需要变换器开关的精确模型。取而代之的是每个变换器都可以模拟成一个多端口网络。这个多端口网络的传递函数可以用 PSPICE 中的受控源很容易实现仿真。

2 逆变器模型的建立

三相逆变器的拓扑结构如图 1 所示, 其中 V_d 为逆变器的直流输入电压:

$$T_A^+ \text{ 合上时, } V_{A0} = \frac{V_d}{2};$$

$$T_A^- \text{ 合上时, } V_{A0} = -\frac{V_d}{2}.$$

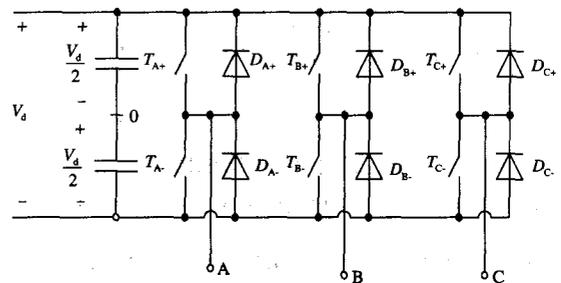


图 1 三相逆变器

Fig.1 Three-phase inverter

2.1 传递函数

电压源型逆变器的解析模型可以由通用逆变器的传递函数导出。逆变器作为非线性网路有三个端口: 直流、交流和控制端口。直流和交流端口根据运行模式可以是逆变器的输入或输出。而控制端口则只包含逆变器的输入。传递函数表示直流输入/输出和交流输入/输出变量间的瞬时关系。

2.2 开关函数

施加给控制端口的信号是两级开关函数, 用来产生 VSI 的交流单臂输出。使用开关函数的概念需要假设逆变器中没有损耗和寄生的无功元件。两级开关函数的波形如图 1。

2.3 电压源型逆变器的模型

在 VSI 中输出电压等于瞬时输入电压与开关函数的乘积, 输入电流等于瞬时输出线电流与开关函数的乘积。这两个过程可以用下面的向量解析表达式来表示:

$$\text{交流输出: } \hat{v}_o(t) = v_i(t) \cdot \hat{s}_f(t) \quad (1)$$

直流输入: $i_i(t) = \hat{i}_0(t)^T \cdot \hat{s}_f(t)$ (2)

$$\text{其中: } \begin{cases} \hat{v}_0(t) = [v_a(t) \ v_b(t) \ v_c(t)]^T \\ \hat{s}_f(t) = [s_{fa}(t) \ s_{fb}(t) \ s_{fc}(t)]^T \\ \hat{i}_0(t) = [i_a(t) \ i_b(t) \ i_c(t)]^T \end{cases}$$

$\hat{v}_0(t)$ 是瞬时三相输出电压向量; $\hat{i}_0(t)$ 是三相瞬时输出线电流的向量; \hat{s}_f 是一个对于变换器的每个桥臂都包含两级开关函数的向量。同样, $v_i(t)$ 和 $i_i(t)$ 分别是瞬时输入电压和电流 (直流量)。

3 逆变器模型的仿真实现

由受控电压源和受控电流源构成的 VSI 宏观模型如图 2 所示。

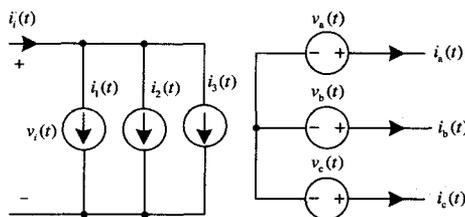


图 2 三相 VSI 的宏观模型

Fig.2 Macromodel of three-phase voltage source inverter

使用 PSPICE 中的 ABM 选项, 逆变器的宏观模型如图 3 所示, 受控源用 E 和 G 模块来实现。

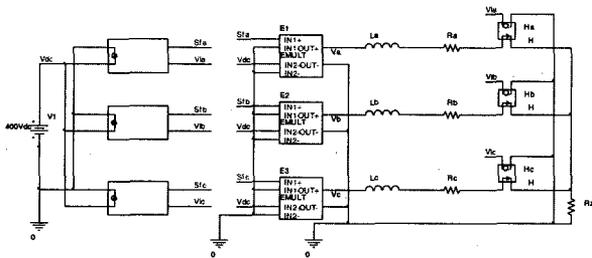


图 3 宏观模型的 PSPICE 仿真

Fig.3 PSPICE simulation of macromodel

在这个模型中, 由一个 5 kHz 的正弦脉宽调制器来产生一个三相两级的开关函数, PSPICE 仿真模型如图 4 所示。调制度和频率可通过调节电压源的幅值和频率来改变。逆变器直流输入电压 $V_d = 400$ V, 连接电感 $L_a = L_b = L_c = 16$ mH。图 5 给出了逆变器输入和输出波形的仿真结果。

图 6 给出了逆变器输出线电流的傅里叶分析结果, 在仿真过程中可以测得线电流基波和主要谐波分量的数值如表 1。

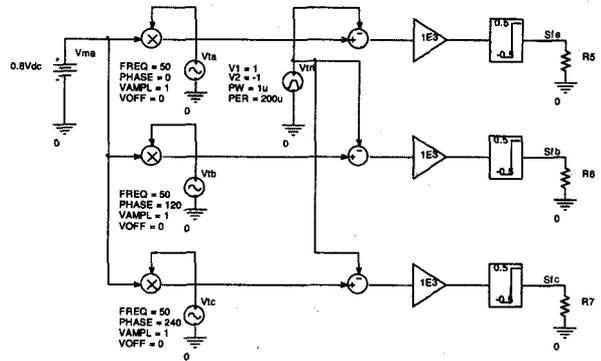


图 4 SPWM 控制回路 PSPICE 仿真

Fig.4 PSPICE simulation of SPWM control loop

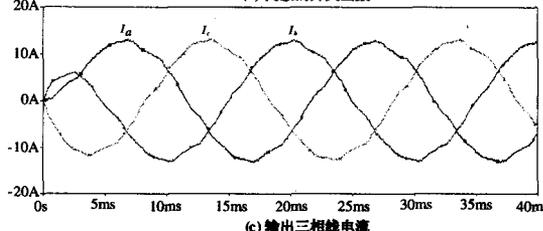
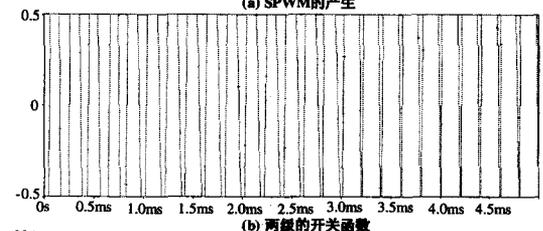
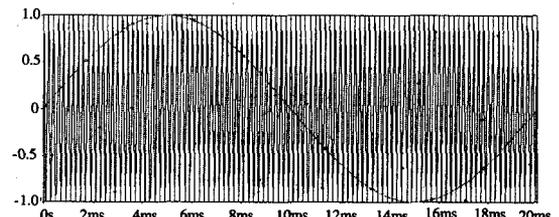


图 5 VSI 系统的仿真结果

Fig.5 Simulation results for the VSI system

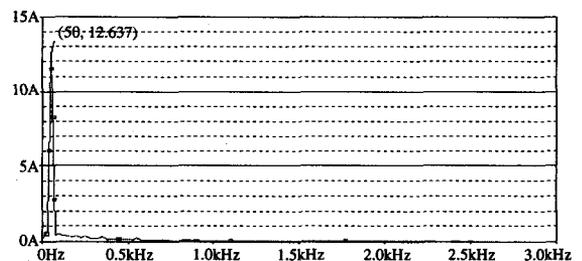


图 6 输出线电流的傅里叶分析

Fig.6 Fourier analysis of line output current

表 1 输出线电流基波和主要谐波分量

Tab.1 Fundamental and harmonics components
of line output current

| I_{11}/A | I_{12}/A | I_{13}/A | I_{14}/A | I_{15}/A | I_{16}/A | I_{17}/A |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 12.637 | 0.430 6 | 0.333 6 | 0.305 1 | 0.336 8 | 0.183 6 | 0.268 1 |

大于 7 次以上的谐波幅值非常小, 在计算谐波畸变率时可以忽略。通过计算得到谐波畸变率 $THD_i\%$ 小于 5.4%。因此, 可以用上述基于开关函数的逆变器的宏观模型取代实际的电子器件进行电路性能的仿真分析。如果需要进一步减小谐波畸变率, 可以采取滤波等方式改善输出的波形。

4 结论

为了优化运行时间和内存, 以及在三相逆变器电路的计算机仿真中减少收敛问题, 必须针对不同的仿真目的使用恰当的仿真模型。本文针对标准的三相电压源逆变器的系统级仿真提出了仿真模型, 并通过谐波分析证明了该模型的使用不影响仿真结果的精度。所提出的模型当逆变器系统中有反馈控制时同样有效。

参考文献

- [1] Wiechmann E P, Ziogas P D, Stefanovic V R. Generalized Functional Model for Three Phase PWM Inverter/rectifier Converters[A]. In: IEEE IAS' 86[C]. 1986. 984-993.
- [2] Salazar L, Joos G. PSPICE Simulation of Three-Phase Inverters by Means of Switching Functions[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1994, 9(1): 35-42.

- [3] 李勋, 杨荫福, 陈坚. 基于 SPWM 控制的 UPFC 开关函数模型[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(9): 37-40.
LI Xun, YANG Yin-fu, CHEN Jian. Switching Function Mathematical Model of UPFC based on SPWM Control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(9): 37-40.
- [4] 李裕能. 开关函数法用于变流装置的谐波分析[J]. 电网技术, 2000, 24(6): 18-20, 49.
LI Yu-neng. Harmonics Analysis of Applying Switching Function Method to Current Converter[J]. Power System Technology, 2000, 24(6): 18-20, 49.
- [5] 郑超, 周孝信, 李若梅. 新型高压直流输电的开关函数建模与分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(8): 32-35.
ZHENG Chao, ZHOU Xiao-xin, LI Ruo-mei. Modeling and Analysis for VSC-HVDC Using Switching Function[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(8): 32-35.
- [6] Lee B K, Ehsani M. A Simplified Functional Simulation Model for Three-Phase Voltage-Source Inverter Using Switching Function Concept[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2001, 48(2): 309-321.

收稿日期: 2009-01-21; 修回日期: 2009-03-24

作者简介:

武小梅(1972-), 女, 博士研究生, 讲师, 从事电力系统运行与控制及电能质量等研究; E-mail: eexiaomei@126.com

徐新(1975-), 男, 工学学士, 工程师, 从事电力系统的运行检修与研究; 工作;

聂一雄(1964-), 男, 博士后, 副教授, 硕士生导师, 从事电工程理论与新技术的研究; 工作。

(上接第 73 页 continued from page 73)

- [7] Hadian S R, Iranmanesh H. Novel Direct Power Control for Compensating Voltage Unbalance and Load Fluctuations in PWM Rectifiers[J]. Automatic Control and System Engineering, 2006, 6(4): 39-45.
- [8] 王国君, 吴凤江, 孙力, 两种 PWM 整流器直接功率控制策略性能对比[J]. 电力电子技术, 2008, 42(8): 61-64.
WANG Guo-jun, WU Feng-jiang, SUN Li. The Comparison Between Two Modulations for PWM Rectifier based on Direct Power Control[J]. Power Electronics, 2008, 42(8): 61-64.
- [9] Malinowski M, Kazmierkowski M P. Control of Three-Phase PWM Rectifier- A Comparative Review[J]. IEEE Industrial Electronics Society Newsletter, 2004, 54(1): 5-11.
- [10] Malinowski M, Marek Jasinski, Kamierkowski P. Simple Direct Power Control of Three-phase PWM Rectifier

Using Space-vector Modulation (DPC-SVM)[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2004, 51(2): 447-454.

- [11] Malinowski M, Kazmierkowski M P, et al. Virtual Flux-based Direct Power Control of Three-phase PWM Rectifiers[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2001, 37(4): 1019-1027.

收稿日期: 2009-02-21; 修回日期: 2009-04-13

作者简介:

王继东(1969-), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为新能源发电与并网技术; E-mail: longcheng1998@163.com

苏海滨(1964-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力电子技术与智能控制。

王玲花(1965-), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究领域为电力生产过程控制、仿真与故障诊断。