

VLSI仿真下的单机无穷大电力系统暂态稳定分析

张晓芳, 陈星莺

(河海大学电气工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 鉴于电力系统仿真的重要性, 首先介绍了使用模拟 VLSI 进行电力系统暂态稳定仿真在国内外的研究状况及优点。其次通过一系列的公式推导, 将 E 恒定的单机无穷大电力系统映射到线路上, 并在 Pspice 下进行建模。最后分别在不考虑阻尼和考虑阻尼情况下进行仿真。Pspice 仿真工具下与其他仿真工具所得结果基本一致, 但有一定误差, 该文分析了误差存在的原因和解决方法。Pspice 仿真速度是 ns 级的, 大大提高了仿真速度。

关键词: 电力系统仿真; 模拟 VLSI; 暂态稳定; 功角曲线; Pspice

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2006)10-0023-04

0 引言

当今, 世界各国的电力系统发展得越来越庞大, 为了提高电网安全稳定运行水平, 对电力系统仿真技术提出了更高的要求。传统的数字和模拟仿真都有一个不可忽视的缺点: 造价比较昂贵, 仿真速度比较慢。目前, 国外有学者提出了一种新的方法即使用模拟 VLSI(超大规模集成电路)进行电力系统暂态稳定仿真^[1]。文献 [1~4] 从理论上提出了使用模拟 VLSI 对电力系统的暂态稳定仿真, 并使用开关电容代替电阻, 达到集成的目的, 提高仿真的精度。本文使用 VLSI 对单机无穷大电力系统进行暂态稳定仿真分析。先通过一系列的公式推导, 将 E 恒定的单机无穷大电力系统映射到线路上, 并在 PSpice 下进行建模。然后分别在不考虑阻尼和考虑阻尼情况下进行仿真。最后将仿真结果和 Matlab 仿真结果进行比较, 提出了改进误差的方法。

1 发电机功角曲线在 VLSI 下的模拟实现

暂态稳定性描述了在静态稳定的潮流计算和受到扰动后的动态行为。VLSI 仿真的优点是代价低, 计算时间快, 不依赖网络的规模和发电机, 功率消耗少, 规模小。以下将阐述如何将电力系统功角求解过程映射到 VLSI 模拟板上, 进行仿真分析。

1.1 发电机功角的求解方法

在电力系统中, 通过发电机的功角曲线来分析电力系统的暂态稳定。发电机转子运动方程如下:

$$\begin{cases} \frac{M}{2 f_0} \cdot \frac{d}{dt} = P_m - P_e - D \cdot \\ \frac{d}{dt} = \end{cases} \quad (1)$$

为了说明的方便, 假设系统阻尼 $D = 0$ 。重新修改上式写成积分形式为:

$$= \frac{2 f_0}{M} (P_m - P_e) dt^2 + c_0 \quad (2)$$

1.2 求解功角过程中积分电路在 VLSI 下的实现

在分析单机无穷大电力系统暂态稳定过程中, 最主要的是分析发电机是否失稳, 发电机功角曲线就成为分析暂态稳定的主要依据。同时由于研究条件的限制, 所有在 VLSI 实现的功能将在 Pspice 仿真软件下仿真实现。以下讲述积分电路在 Pspice 的实现。

积分电路传统的实现方法是用运放电阻电容电路来实现^[4]。而文献 [5] 提供了比运放电阻电容电路频带更宽的积分电路, 那就是跨导电容电路。它的工作原理与运放电阻电容相似, 在这里不再详述。集成运放下的双重积分如图 2 所示。

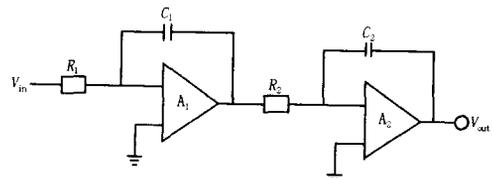


图 1 双重积分的实现

Fig 1 Implementation of the double-integrator

$$\text{输出 } V_{out} = \frac{1}{R_1 C_1 R_2 C_2} V_{in} dt^2 + V_0 \quad (3)$$

2 使用 VLSI对单机无穷大电力系统进行暂态稳定仿真

使用 VLSI对电力系统进行暂态稳定仿真最大的优点是可以提高仿真速度。特别是在 Pspice 仿真工具下,它的时间为 ns级,这样可以大大提高仿真速度,对事先预测电力网络故障切除后的暂态稳定有很好的指导意义。

2.1 E 恒定模型下使用 VLSI对单机无穷大电力系统进行暂态稳定仿真分析

根据式 (2)可得积分形式的功角的求解值。并且根据 (3)可知在 VLSI下的双重积分的求解方法。由此可将 E 恒定的电力系统模型的暂态稳定分析转化到 Pspice进行仿真分析。其中 $P_e = EV \sin / (X_d + X_l)$ 。在 Pspice 仿真下,以恒定电流源代替恒定机械功率,电压输出代表功角,把相应的加减运算增益^[4]、积分、正弦^[7]转化到 Pspice 下实现。在 Pspice 下 $P_e = A \cdot \sin(V)$ 。

由于两者的时间常数不同,需要注意的是两者比例系数之间的关系。定义参数的比例系数以及时间比例系数为:

$$\begin{cases} K_p = I_{\text{model}} / P_{\text{system}} \\ K = V_{\text{model}} / \text{system} \\ K_t = t_{\text{system}} / T_{\text{model}} \end{cases} \quad (4)$$

其中: P_{system} 为实际系统的输入机械功率; I_{model} 为模拟电路中的输入电流; system 实际系统的功角; V_{model} 为模拟电路中的输出电压; T_{model} 为对应于模拟电路中的时间量值; t_{system} 为实际系统的时间量值。

把 (4) 代入 (2),令 $\omega_0 = 2$,可得:

$$V_{\text{model}} = \frac{2 f_0 K K_t^2}{M K} I_{\text{model}} dT^2 \quad (5)$$

与 (2)式比较可得比例系数之间的关系为:

$$\frac{M}{2 f_0} = \frac{R_1 R_2 C_1 C_2 K^2 K_t^2}{K_p} \quad (6)$$

因此,由式 (6)可得到实际发电机的惯性时间常数和电容器及跨导之间的关系。实际发电机的暂态电抗及传输线电抗和放大系数 A 之间的关系,既:

$$A = \frac{K_p \cdot P_e}{\sin(V_0)} = \frac{|E| \cdot |V| \cdot K_p}{(X_d + X_l)} \quad (7)$$

式 (6)和式 (7)为将实际系统等效到电子电路中提供了理论依据。

2.2 考虑阻尼情况下使用 VLSI对单机无穷大电力系统进行暂态稳定仿真分析

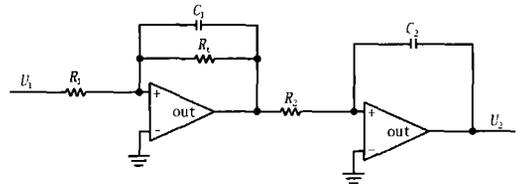


图 2 带有阻尼的双重积分电路

Fig 2 Double-integrator circuit with damp

考虑阻尼情况的转子运动方程:

$$\frac{M}{2 f_0} \cdot \frac{d^2}{dt^2} + D \frac{d}{dt} = P_m - P_e \quad (8)$$

根据上述方法同理可得:

$$R_1 R_2 C_2 C_2 \frac{d^2 U_2}{dT^2} + \frac{R_1 R_2 C_2}{R_t} \frac{dU_2}{dT} = U_1 \quad (9)$$

把 (4)带入 (9),并和 (8)比较有:

$$\begin{cases} \frac{R_1 R_2 C_1 C_2 K K_t^2}{K_p} = \frac{M}{2 f_0} \\ \frac{R_1 R_2 C_2 K K_t}{R_t K_p} = D \end{cases} \quad (10)$$

3 仿真算例

已知: $X_l = 0.3, X_d = 0.05, V_t = 1.05, V = 1.0, P_m = 0.5, M = 10, D = 20$ 。

假定相应的 Pspice 下电路参数 $R_1 = 4, R_2 = 10, C_1 = C_2 = 50, K_p = 1e-9, K_t = 1e+9$,根据式 (6)和 (7)可得: $K = 1e-7, A = 302.9$

有上述参数可知,在 Pspice 下 ns级相当于 matlab 下的 s级。

E 恒定,无阻尼情况在 Pspice 下的模型如图 3;有阻尼情况如图 4。

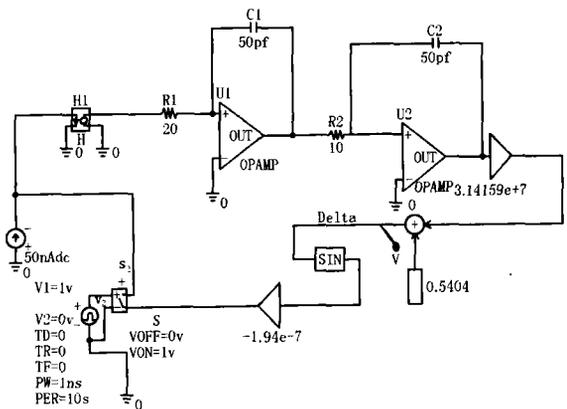


图 3 Pspice 下忽略阻尼

Fig 3 Pspice without damp

其中以电流源表示机械功率, H 为电流控制电压源,再经双重积分后的电压表示功角,当然它们之

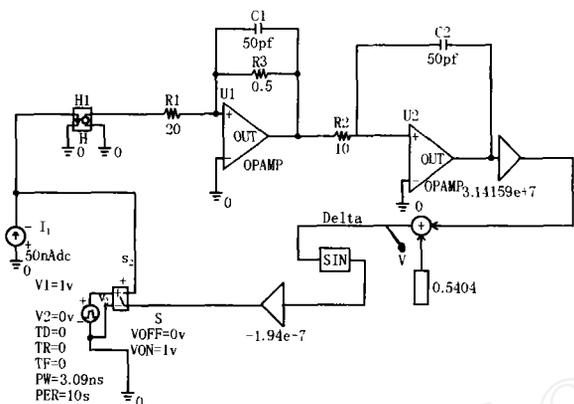


图 4 Pspice 下,计及阻尼影响

Fig 4 Pspice with damp

间还存在着一定的比例,由增益 K 转换到功角值,通过正弦电路获得电磁功率,再通过增益 A 可获得电磁功率在 Pspice 下值。电压控制开关源的作用是控制仿真过程中故障切除时间。

4 仿真结果及分析

系统无阻尼,图 5(a)为 PSpice 下 0.409 ns 切除故障,图 5(b)为 Matlab 下 0.421 s 切除故障后的功角曲线。

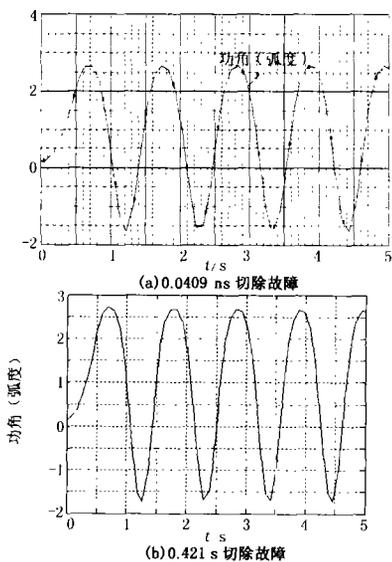


图 5 无阻尼情况下的功角曲线

Fig 5 Power angle curve without damp

系统无阻尼,图 6(a)为 Pspice 下 0.569 ns 切除故障,图 6(b)为 Matlab 下 0.582 s 切除故障后的功角曲线。

阻尼情况下, $R_i = 10$ (相应的阻尼 $D = 20$) 图 7 (a)为 Pspice 下 0.569 ns 切除故障,图 7(b)为 Matlab 下 0.582 s 切除故障后的功角曲线。

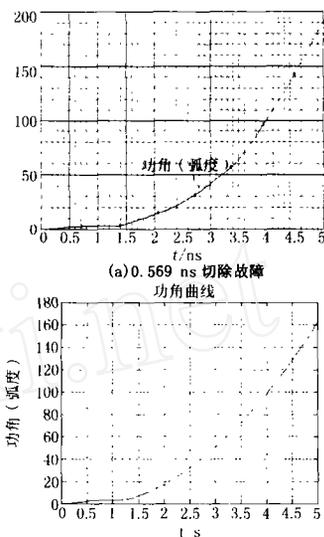


图 6 无阻尼情况下的功角曲线

Fig 6 Power angle curve without damp

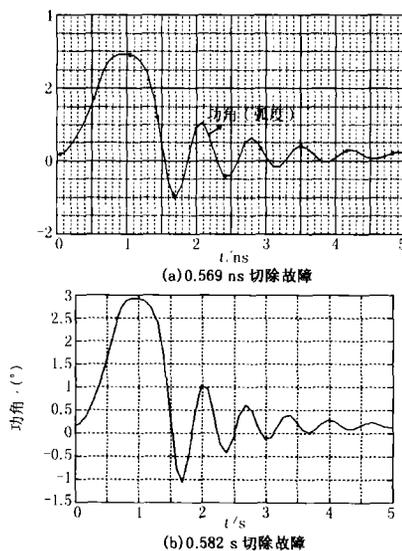


图 7 有阻尼情况下的功角曲线

Fig 7 Power angle with damp

由于系统不考虑阻尼,图 5(a)、图 5(b)应为等幅,两者比较 Pspice 仿真下结果更精确一些。不考虑阻尼情况下增大故障切除时间,0.569 s 切除故障,系统失稳。在阻尼情况下,0.569 s 切除故障,系统不会失稳。增强阻尼,系统稳定性增强。由 matlab 和 Pspice 下的仿真结果比较可知,两者第一摆基本吻合,从第二摆开始有一定偏差,但总体上关于系统是否失稳是一致的。但 Pspice 仿真速度为 ns 级,完全能满足电力系统对仿真时间的要求,牺牲一定的精度换取更快的仿真速度在工程上是可取的。当然有待进一步提高精度。

5 误差分析和改进

由上述仿真结果可知, Pspice 下的仿真结果较 Matlab 的仿真结果保守。即 Pspice 下故障切除时间比 Matlab 下故障切除时间短。这是由于积分电路中电容器和开关的影响造成的。通过对开关的控制来模拟系统发生故障至故障切除这一时段,但是由于机械制造的原因,开关开断存在着一定的延时性。其实在实际中,故障切除过程也需要一定的时间,这样 Pspice 下的仿真更接近于实际系统。关键问题是如何改善积分电路引起的误差。

积分电路在变化初期, V_0 的上升比较缓慢,以致实际的输入波形落后于理想情况一段时间。这种滞后现象是由于组件的通频带不够宽,即对快速变化的反应比较迟钝。解决方法:选通频带比较宽的组建;选用快速积分电路。快速积分的思路是在原来 RC 积分环节上再引入一个小时间常数的环节,则在开始阶段,将按 R_1 、 C_1 的回路进行积分,使 V_0 速度比较迅速。快速积分电路如图 8。

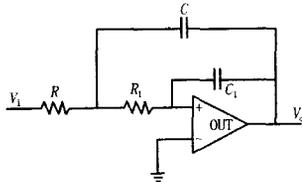


图 8 改进的积分电路

Fig 8 Improved integrator circuit

改用上积分电路进行仿真,将 Pspice 和 Matlab 的仿真结果进行比较,故障切除时间差距变小,但选取合适的电容需要经过不断尝试,比较费时。所以有待进一步提高仿真精度。

6 结论

当电力系统发生故障时,希望能快速对系统进行仿真分析以此来分析系统的稳定性。以往的仿真工具精度较高,但仿真速度较慢。Pspice 仿真速度快,为 ns 级,完全能满足电力系统对仿真时间的要求。本文使用 VLSI 对单机无穷大电力系统进行了暂态稳定仿真,结果与 Matlab 仿真结果基本一致,但存在一定误差。这是由于电子元器件的存在,特别是电容器的影响,仿真精度略差。如何提高 Pspice 下的仿真精度及消除仿真滞后性值得进一步

研究。

参考文献:

- [1] Fried R, et al Approaches for Analog VLSI Simulation of the Transient Stability of Large Power Networks [J]. IEEE Trans on Circuits and Systems- : Fundamental Theory and Applications, 1999, 46(10): 1249-1263.
- [2] 汤涌. 电力系统数字仿真技术的现状与发展 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26(17): 66-71.
TANG Yong Present Situation and Development of Power System Simulation Technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(17): 66-71.
- [3] GU Jun, Karady G G Real-time Analysis of Transient Stability Using Reconfigurable Analog VLSI[A]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(3): 1207-1209.
- [4] 杨素行. 模拟电子技术基础简明教程(第二版)[M]. 北京:高等教育出版社, 1997.
YANG Su-xing The Basic Short Tutorial of Analog Circuit [M]. Beijing: Higher Education Press, 1997.
- [5] Nauta B. A CMOS Transconductance-C Filter Technique for very High Frequencies [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1992, 27(2): 142-153.
- [6] 侯耀. 使用 VLSI 进行电力系统暂态稳定分析中仿真器重构的研究 [D]. 南京: 2005.
HOU Yao Simulator Reconfigure of Power System Transient Stability Analysis Using Analog VLSI [D]. Nanjing: 2005.
- [7] Fried R, Cherkaoui R S, Enz C C Low-power CMOS, Analog Transient-stability-simulator for a Two-machine Power System [A]. Proceedings of IEEE International Symposium on Circuit and System. 1997. 137-140.
- [8] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
NI Yi-xin, CHEN Shou-sun, ZHANG Bao-lin The Theory and Analysis of the Dynamic Power System [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.

收稿日期: 2005-10-17; 修回日期: 2005-12-03

作者简介:

张晓芳(1980-),女,硕士研究生,从事电力系统仿真方面的研究;

陈星莺(1964-),女,博士,教授,博士生导师,主要从事电力系统经济运行分析与控制、输配电自动化及电力市场等方面的研究。Email: xychen@hhu.edu.cn

(下转第 45 页 continued on page 45)

- 书店, 1996
- ZHANG Wei-ying Game Theory and Informational Economics [M]. Shanghai: Shanghai Sanlian Bookstore, 1996
- [8] 马莉,文福拴, David A K 采用分段报价规则的竞价策略初探 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26(9): 16-19
- MA Li, WEN Fu-shuan, David A K A Preliminary Investigation on Bidding Strategies Employing Step-wise Bidding Rules [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(9): 16-19
- [9] 魏宗舒. 概率论与数理统计教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1983
- WEI Zong-shu Probability and Mathematics Statistics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1983
- [10] 翟桥柱, 周佃民, 管晓宏. 发电竞价曲线的特征研究 [J]. 电网技术, 2002, 26(12): 9-12
- ZHA I Qiao-zhu, ZHOU Dian-min, GUAN Xiao-hong Study on Characteristics of Curves Generation Bidding [J]. Power System Technology, 2002, 26(12): 9-12
-
- 收稿日期: 2005-10-21; 修回日期: 2005-11-28
- 作者简介:
- 杨根 (1981 -), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力市场理论及发电厂报价技术支持系统; E-mail: yanggen_mumu@163.com
- 周杰娜 (1958 -), 女, 教授, 主要从事电力市场理论、发电厂报价技术支持系统、电力系统运行与控制的研究工作;
- 胡志勇 (1980 -), 男, 助理工程师, 主要从事电力系统运行与管理工作。

Application of bidding strategies based on probability theory and game theory for generation companies

YANG Gen¹, ZHOU Jie-na¹, HU Zhi-yong²

(1. School of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, China;

2. Nanyang Power Supply Branch, Nanyang 473000, China)

Abstract: In electricity market environment, generation company can gain maximum profits with tactical bidding strategies. Based on these present bidding strategies, this paper presents a mathematical bidding model based on probability theory and game theory. In order to meet the maximum profits for generation company, it details the successful bidding possibility of generation company, and draws an optimal bidding strategies that can fulfill the maximum expectation profits by comparing the possibility distributing of bidding and market clearing price (MCP) and solving mathematical expectation. A simple numerical example proves, the given model and method are effective and feasible.

Key words: electricity market; game theory; probability theory; bidding strategy

(上接第 26 页 continued from page 26)

Analysis of the transient stability of the one-machine infinite bus system using VLSI

ZHANG Xiao-fang, CHEN Xing-ying

(Department of Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Considering the importance of the simulation of the power system, firstly, this paper presents the researches and advantages of using analogue VLSI to solve the transient stability of the power system. Then, a single-machine infinite-bus power system (invariable) is mapped to the chip of the analogue VLSI through a series of the formulas and the model is created at Pspice. At last, it is simulated both with and without damp. The result is basically the same as the result of Matlab. The reason of the inaccuracy is analysed and the method to solve the problem is mentioned. The simulation time of Pspice is several ns, so the simulation time is largely increased.

Key words: power system simulation; analogue VLSI; power system transient stability; power-angle curve; Pspice

(上接第 40 页 continued from page 40) also considered, which ensure the solution of the model is DC bad flow solution. The problem is solved by interior point methods. On one hand, this algorithm can handle inequality constraints conveniently which is quite difficult in traditional methods, in this way, the computational results are more accurate. On the other hand, little computation and computational efficiency are achieved by rearrangement variable, reduced correction equation and relaxation technique. The numerical examples and results show that the method is feasible and effective.

Key words: power system; coordination equation; interior point; network flow model; security-constrained; economic dispatch