

电力系统动态仿真的一种改进迭代算法

王蕾¹, 胡翔勇², 李咸善², 哈恒旭¹

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049; 2. 三峡大学电气信息学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 基于电力系统动态仿真计算中微分方程与代数方程的交替迭代算法, 提出了一种新的混合式迭代解法。该方法的基本原理是在延续了电力系统模块化建模及迭代算法特点前提下, 将微分方程的求解方法多样化。仿真结果证明, 混合式迭代解法应用在电力系统动态仿真计算中, 计算结果正确, 突破了传统的电力系统各模块计算时使用单一的数值解法的局限。

关键词: 动态仿真; 交替迭代算法; 混合式

中图分类号: TM74 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)14-0042-04

0 引言

电力系统暂态稳定问题是检验电力系统在遭受较大扰动后, 各机组间能否保持同步的运行状态^[1], 并在此基础上研究解决影响电力系统不稳定的因素和提高系统的稳定性的措施。由于电网实际情况的限制, 通常采用数字仿真的方法来进行分析研究。目前应用于电力系统稳定分析的数学方法通常可分为联立解法和交替解法两大类。联立求解适用于各种隐式积分方程, 求解的方法通常采用牛顿-拉夫逊迭代法, 即在求解过程中形成统一的 Jacobian 矩阵, 计算修正量。这种方法具有不存在交接误差、精度高且数值稳定性好、计算量大但收敛性好、可维护性和可扩展性差的特点。交替迭代解法适用于隐式和显式积分方程, 求解方法为首先预测某几个状态量, 然后求得网络方程中所需的变量, 求解网络方程得结果后校正预测量, 直至预测量与校正量近似相等。交替迭代算法具有微分方程式和代数方程式彼此独立, 并可以独立选择方法、计算量相对减少、可维护性和可扩展性好的特点。

1 混合式迭代算法

研究电力系统动态行为问题主要包括两大项内容: 一是合理建立电力系统的数学模型。建模是进行计算机仿真的首先要解决的问题。电力系统动态仿真主要涉及发电机、励磁系统、调速系统、输电线路、负荷及各种控制元件等, 所涉及模型元件多, 元件的数学模型复杂, 这就使得在选择模型时要从全局考虑。二是选择合适的数值方法求解。由于电网中大多数元件属于非线性元件, 因此描述整个电网的数学模型包括一阶微分方程组和非线性代数方程

组, 分析电力系统动态行为也就是对这一组微分-代数方程组进行数值求解, 即 DAE (Differential and Algebraic Equation problem)^[2]。

$$\frac{dX}{dt} = f(X, V) \quad (1)$$

$$0 = g(X, V) \quad (2)$$

1.1 基本原理

电力系统时域仿真方法(联立求解和交替解法)在各元件建模过程中是采用同一种建模差分方法。在联立求解中动态元件采用隐式梯形差分法建模, 交替解法中也是采用一种数值算法对动态元件进行差分, 因此当有动态元件需要添加到原有的电力系统中时, 其元件建模必须与其他动态元件差分方法一致, 这给模型灵活性方面带来不便。因此本文尝试性地提出一种混合仿真方法, 该方法的最大特点是元件模型的建立可与其他元件不同, 突破了传统的使用单一的数值方法的局限。所谓混合仿真方法, 就是电力系统各动态元件可选用不同的数值方法建模, 各动态元件的仿真步长可以相同, 也可以不同, 其依据是保证数值方法的稳定性, 保证仿真结果正确的一种时域仿真方法。

电力系统无论是处在稳态还是暂态情况下, 各环节的状态量的变化速度是不一样的, 有时能相差很大的数量级。因此其解常常出现这种现象: 变化快的分量很快地趋于它的稳定值, 而变化慢的分量缓慢地趋于它的稳定值。从数值解的观点来看, 当解变化快时应该用小步长积分, 当变化快的分量已趋于稳定, 或者说已没有变化快的分量出现时, 就应该用较大的步长积分^[3]。由于显式方法的特点决定了其步长不能放得太大, 因此本文在实现这一混合仿真算法时采用了隐式梯形法。图 1 给出了混合

仿真方法中几个不同变化速率变量的关系示意图。本文仅以带有励磁系统的发电机来说明混合式仿真方法的基本原理。 H 表示一个较大步长,由于发电机转子角相对于发电机电磁暂态量 E_q, E_d, E_d 和励磁系统暂态量 E_f ,其惯性时间常数相对较大,因此可以认为在较大步长 H 内保持不变,而 E_q, E_d, E_d 和 E_f 在步长 H 内需要以步长 h 循环迭代计算,直至计算到 $(t+H)$ 为止^[4]。

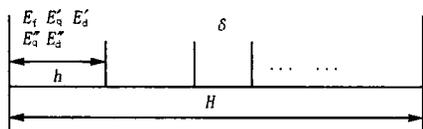


图 1 混合仿真方法的基本原理

Fig 1 Basic theory of composite simulation method

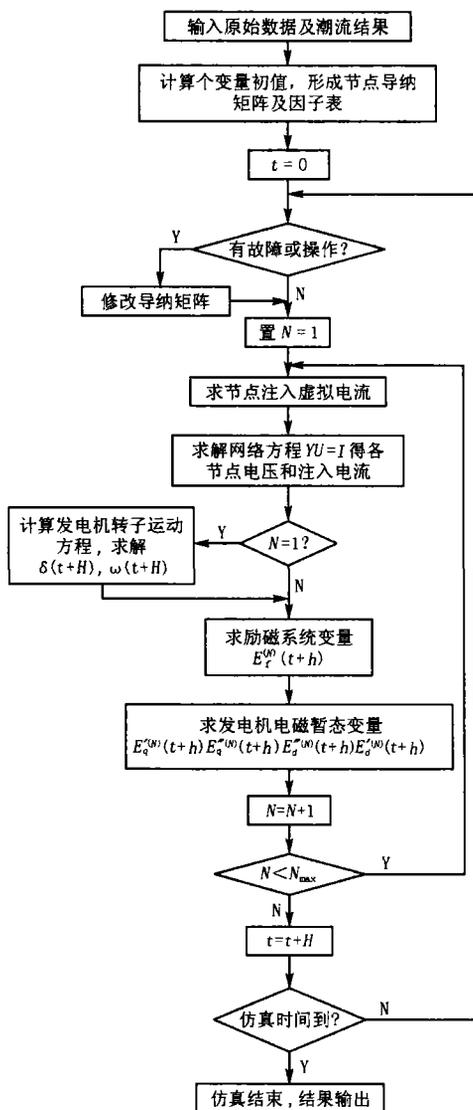


图 2 混合仿真方法流程图

Fig 2 Flow chart of composite simulation method

根据图 1,在计算仿真时不同变化速率的变量可以取相同步长,也可以取不同步长,因此可以将混合仿真方法分为两类:

混合仿真方法 { 多方法单步长
多方法多步长

1.2 程序流程

实现流程借鉴了隐式梯形交替算法^[5]和变步长的仿真方法,流程图如图 2 所示。

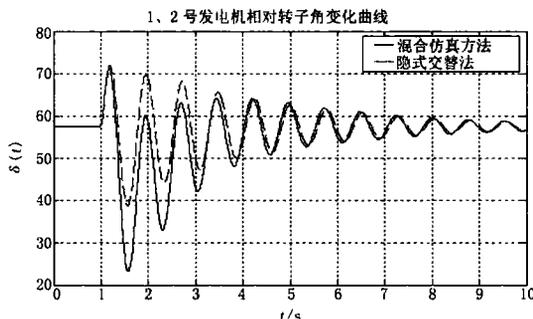


图 3 发电机转子角变化曲线

Fig 3 Curve of dynamotor rotor angle

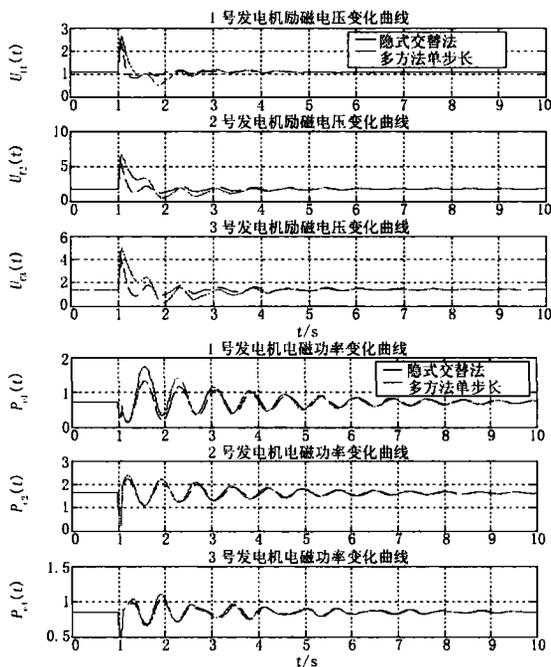


图 4 发电机电磁功率输出与励磁电压输出

Fig 4 Output of generator electromagnetic torque and excitation voltage

1.3 实现混合仿真方法需要注意的几个问题

1)模块化建模问题。混合仿真方法可以有效地解决模型单一的问题,但在模型分解建立模块化模型时需要注意如何分割。本文中系统分解按照电

力系统各元件的物理意义进行,即每个子系统能够相对独立地完成某个元件的计算,另外对于发电机模块的处理,本文采用将转子运动方程与发电机电磁暂态方程分离的方法。

2)各模块子程序积分方法和积分步长的选取。

3)各模块间的数据传输。分割后的各子系统并不是完全孤立的,各模块间需要其他模块变量的支持。由于各部分可以采用不同步长的积分方法,因此在仿真过程中需要注意各变量的变化和各模块间的数据传输。

2.1 多方法单步长仿真结果

采用 3机 9节点系统^[3,6]进行仿真。在 I型励磁系统作用下,运行 1 s时在线路 5 - 7靠近母线 7 处发生两相接地短路故障,故障在 1.06 s切除线路 5 - 7取消。发电机采用隐式梯形积分法,励磁系统采用二阶龙格库塔法,仿真步长取 0.01 s。

2.2 多方法多步长仿真结果

仿真模型与故障设置同上。发电机采用隐式梯形积分法差分,仿真步长为 0.01 s,励磁系统采用二阶龙格库塔法差分,仿真步长为 0.005 s。

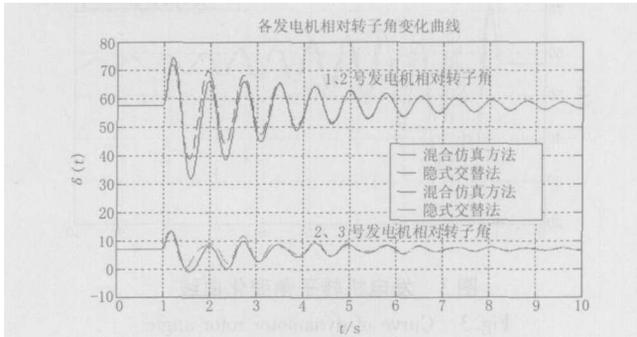


图 5 发电机转子角变化曲线
Fig 5 Curve of generator rotor angle

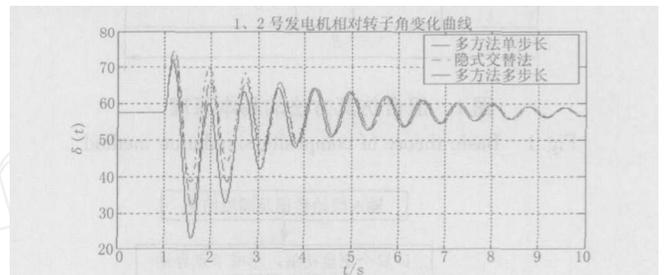


图 7 应用三种方法得到的发电机相对转子角运动曲线比较
Fig 7 Comparison of generator relative rotor angle using three methods

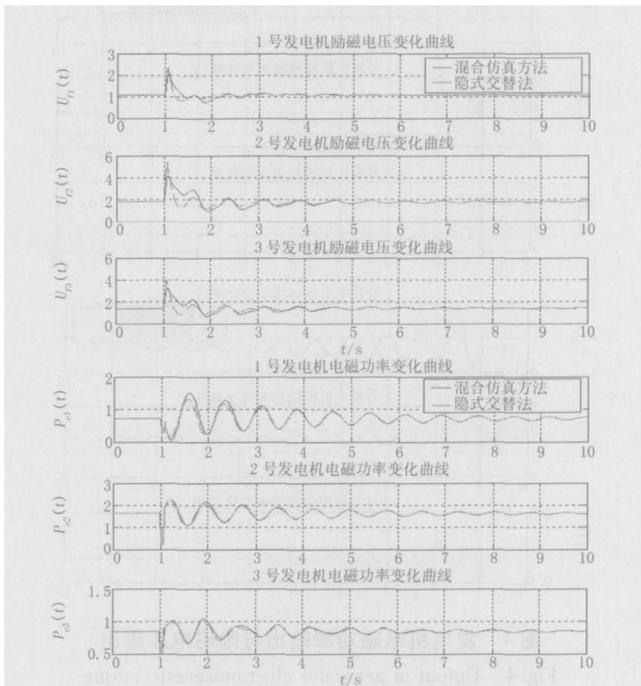


图 6 发电机电磁功率输出与励磁电压输出比较
Fig 6 Output of generator electromagnetic torque and excitation voltage

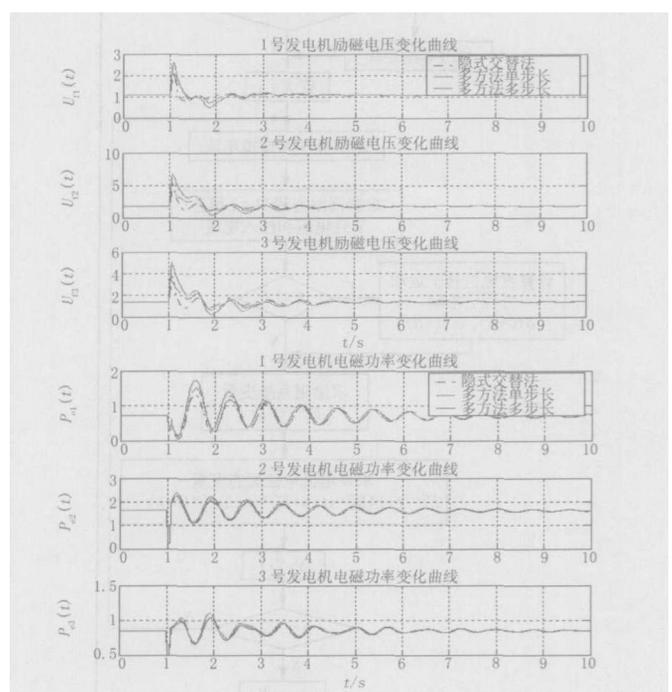


图 8 应用三种方法得到的发电机励磁电压及电磁功率输出比较
Fig 8 Comparison of generator electromagnetic torque and excitation voltage using three methods

2 算例仿真结果

比较图 3、4、5、6 三种仿真方法的计算结果 (以

上述故障情况为例),可得 1、2号发电机转子角的运动曲线如图 7所示,各发电机励磁电压输出及电磁功率变化曲线如图 8所示。

从图 7、8中可以看出,故障后 2.5 s内三种方法的计算结果有一定差别,由于文中的混合仿真方法是综合了求解微分方程的显式与隐式两种解法为一体,两种方法对仿真步长的要求不同,并且计算误差不同,因此笔者总结仿真结果的差别是系统突变时算法本身的差别造成的。

3 结束语

电力系统动态仿真计算的混合仿真方法具有不受数值方法和积分步长局限的特点,不仅继承了交替迭代仿真算法的优点,而且在模型灵活性方面具有一定的突破。通过算例仿真结果比较,该方法计算结果基本正确,适合于电力系统动态仿真分析。

参考文献:

- [1] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论与分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002
NI Yi-xin, CHEN Shou-sun, ZHANG Bao-lin. The Principle and the Analysis of Dynamic Power System[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002
- [2] 卢强. 数字电力系统(DPS)——新世纪电力系统科技发展方向[J]. 中国电力,2000,33(5):15-18
LU Qiang. Digital Power System——the Power System Technological Trend in New Century[J]. Electric Power,

- 2000,33(5):15-18
- [3] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京:科学出版社,2003.
WANG Xi-fan. Modern Power System Analysis[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [4] 易善军. 电力系统暂态稳定数值仿真方法研究(硕士学位论文)[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2001.
YI Shan-jun. The Research of Power System Transient Stability Digital Simulation, Thesis[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2001.
- [5] 夏道止. 电力系统分析(下册)[M]. 北京:中国电力出版社,1995.
XIA Dao-zhi. Power System Analysis, Part II[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.
- [6] 苏宏天. 电力系统稳定性数字仿真算法的研究(硕士学位论文)[D]. 天津:天津大学,2001.
SU Hong-tian. The Research of Power System Stability Digital Simulation Methods, Thesis[D]. Tianjin: Tianjin University, 2001.

收稿日期: 2005-12-07; 修回日期: 2006-02-20

作者简介:

王蕾(1978-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统仿真;E-mail:w17811@163.com
胡翔勇(1959-),男,教授,研究方向为电力系统仿真;
李咸善(1964-),男,副教授,博士,研究方向为电力系统远动、电力系统仿真。

An improved alternate iteration method for simulation of power system dynamics

WANG Lei¹, HU Xiang-yong², LI Xian-shan², HA Heng-xu¹

(1. Department of Electric and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;

2. College of Electrical Engineering & Information Science, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: A new alternate composite iteration method is proposed based on the iteration arithmetic of differential equations and the algebraic equations in power system dynamics simulation. The fundamental of the new method is diversified the solutions of differential equations which continues the characteristics of modular modeling and alternate arithmetic. Applying the alternate composite iteration method to power system dynamics simulation shows that the simulation result is correct and breaches the limit of single numerical method used to calculate the different model of power system simulation.

Key words: dynamics simulation; alternate iteration method; composite method

上海安科瑞电气有限公司招聘

诚聘低压配电保护研发工程师,从事低压受电保护、馈电保护、电动机保护、电容器保护软硬件研发、设计,有5年及以上工作经验的,本科及以上学历。

工作地点:上海市嘉定区;晋升方向:项目主管、项目经理、技术部副经理、技术部经理、总工及股权激励。

有意者请与公司负责人联系:

联系人:周中 手机:13301683907 电话:021-59104832-101

Email:ACREL002@vip.163.com

地址:上海市嘉定工业园区棕坊桥洪德路99号,201801