

一种简捷快速的暂态稳定仿真算法

白雪峰¹, 郭志忠¹, 王永刚²

(1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 许昌继电器研究所, 河南 许昌 461000)

摘要: 在对 Taylor 级数法暂态稳定计算的步长进行分析的基础上, 根据计算精度的要求, 提出了 Taylor 级数法暂态稳定计算步长的动态控制, 并由此实现了一种简捷、快速的暂态稳定计算方法。分析与计算结果表明, 由于在计算过程中按计算精度的要求来动态地选取步长, 从而在保证计算精度的前提下, 有效地提高了 Taylor 级数法暂态稳定计算的解算效益。

关键词: 电力系统; 暂态稳定; Taylor 级数法

中图分类号: TM712

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2000)01-0001-02

1 引言

快速高阶 Taylor 级数暂态稳定计算方法从发电机节点的解析入手, 在基于发电机各种状态量的导数递推关系和高效因子表技术的基础上, 利用高阶 Taylor 级数展开式求解系统的微分方程。在满足相同精度的前提下, 其速度较常规的 Runge - Kutta 法快 6 倍左右, 是一种优秀的暂态稳定计算方法^[1]。本文根据 Taylor 级数法的固有特性, 在确保计算精度的前提下, 提出了变步长 Taylor 级数暂态稳定计算方法, 该方法有效地提高了 Taylor 级数法的解算效益。

2 发电机模型的选取

发电机采用暂态电抗后暂态电势维持不变的经典发电机模型, 微分方程为

$$M_i \frac{d\delta_i}{dt} = P_{mi} - P_{ei} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i \quad (2)$$

式中 ω_i —发电机的角频率偏差;

δ_i —发电机的转子转角;

M_i —惯性常数;

P_{mi} —发电机的机械功率;

P_{ei} —发电机的电磁功率。

而

$$P_{ei} = U_{Xi}I_{Xi} + U_{Yi}I_{Yi} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中 I_{Xi} —发电机定子电流 X 轴分量, 用网络坐标系表示;

I_{Yi} —发电机定子电流 Y 轴分量, 用网络坐标系表示;

U_{Xi} —发电机定子端电压 X 轴分量, 用网络坐标系表示;

U_{Yi} —发电机定子端电压 Y 轴分量, 用网络坐标系表示。

消去用恒定阻抗替代的负荷节点和网络节点后形成的只含发电机节点的系统网络方程为:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \dots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{式中, } Y_{ij} = \begin{bmatrix} G_{ij} & -B_{ij} \\ B_{ij} & G_{ij} \end{bmatrix} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n, i \neq j) \quad (5)$$

$$Y_{ii} = \begin{bmatrix} G_{ii} & -B_{ii} + 1/X_{di} \\ B_{ii} - 1/X_{di} & G_{ii} \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

发电机定子 Norton 电流

$$I_i = \begin{bmatrix} I_{Xi} \\ I_{Yi} \end{bmatrix} = \frac{E_i}{X_{di}} \begin{bmatrix} \sin \delta_i \\ -\cos \delta_i \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

发电机定子端电压

$$U_i = (U_{Xi}, U_{Yi})^T \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

3 算法描述

在相同的计算精度的前提下, Taylor 级数法中的步长比传统的暂态稳定计算中的步长要大得多。

收稿日期: 1999-09-02

作者简介: 白雪峰(1974-), 男, 博士研究生, 从事电力系统分析与控制方面的研究。

文献^[1]在 Taylor 级数法步长的选取方面做了大量的工作,进行了深入的分析。但是,这些分析都是在假定步长为定值的情况下做出的,并没有对动态步长控制进行分析。积分步长作为 Taylor 级数法中最主要的控制变量之一,就如何根据计算过程中的实际需要来进行动态控制是很有必要的。下面就如何在保证计算精度的前提下,对 Taylor 级数法进行动态步长控制来进行讨论。

Taylor 级数法直接利用积分步长区间的初始点的若干阶 Taylor 级数展开来逼近下一积分区间的解。由于暂态稳定计算的最终结果要通过发电机摇摆角来表述出来,那么就从发电机摇摆角的 Taylor 展开式的余项入手进行分析。

t_{k+1} 时刻发电机摇摆角 (t_{k+1}) 在 t_k 时刻的 Taylor 展开式如下:

$$(t_{k+1}) = (t_k) + (t_k)h + (t_k)h^2/2! + \dots + {}^{(p)}(t_k)h^p/p! \quad (9)$$

其中 h 为步长, p 为给定的最高阶数, (t_k) 的各阶导数通过网络方程的解算来获得。

给定精度,当阶数 p 为定值时,总可以找到一个步长 h_1 ,当 $h < h_1$ 时,满足:

$$\left| {}^{(p)}(t_k)h^p/p! \right| \quad (10)$$

即

$$h < p \sqrt[p]{\frac{p!}{k}} = h_1 \quad (11)$$

h_1 是在满足精度 的条件下所能选取的步长的上限,通常可取 $h = h_1$ 。对于系统内的多台发电机,其 h_1 的值并不相同。在这种情况下,应取其中的最小值为动态步长。

对于给定步长的 Taylor 级数法,因 h 和 p 均是定值,这样对于不同的积分区间、不同的发电机,倘若 h 或 p 选取不当,其最后的 Taylor 展开式余项的值有可能满足不了精度的要求,同时又有可能超出精度的要求。由此将导致计算误差的增大和解算效益的降低。而 Taylor 级数法的动态步长控制则克服了 Taylor 级数法的上述不足,在给定阶数的前提下,可动态地根据计算精度的要求来求取最佳的积分步长,从而使整个暂态稳定计算的解算效益最佳。

对于精度,若取值过大,则使动态步长的选取偏大,虽然可减少计算量,但将导致计算精度的降低。若取值过小,则使动态步长的选取偏小,虽然可提高计算精度,但将导致计算量的增加。通过大量的实际运算,推荐取:

$$= a / (t_k) / = 0.001 / (t_k) / \quad (12)$$

4 算例分析

下面用具体的算例给出了在确保计算精度的前提下,原快速高阶 Taylor 级数法暂态稳定计算方法和采用动态步长控制的 Taylor 级数法在计算量方面的分析结果。测试系统采用文献^[2]中的 New England 10 机 39 节点测试系统。

本文暂态稳定计算的故障是 15 号节点发生三相短路故障,0.2s 后通过开断 15~16 号线路的首端切除。暂态过程解算至 3.0s。计算所使用的计算机是 AMD K6-166 操作系统采用 Windows 95。

取故障切除前积分步长为 0.1s,分别取最高阶数阶数为 10、8,利用动态步长控制进行解算,可得实际参与解算的各动态步长及仿真时间,分别如表 1 及表 2 所示。

在上述两种解算条件下利用动态步长控制所得的计算结果与不采用动态阶数控制的 Taylor 级数法所得的计算结果相差不超过 2%。

表 1 求导阶数为 10 时的动态步长及仿真时间

| 步数 | 动态步长 | 仿真时间 | 步数 | 动态步长 | 仿真时间 |
|----|-------|-------|----|-------|-------|
| 1 | 0.100 | 0.100 | 8 | 0.265 | 1.865 |
| 2 | 0.100 | 0.200 | 9 | 0.270 | 2.135 |
| 3 | 0.205 | 0.405 | 10 | 0.273 | 2.408 |
| 4 | 0.276 | 0.681 | 11 | 0.309 | 2.717 |
| 5 | 0.321 | 1.002 | 12 | 0.359 | 3.076 |
| 6 | 0.303 | 1.305 | 13 | 0.359 | 3.435 |
| 7 | 0.295 | 1.600 | 14 | 0.311 | 3.746 |

表 2 求导阶数为 8 时的动态步长及仿真时间

| 步数 | 动态步长 | 仿真时间 | 步数 | 动态步长 | 仿真时间 |
|----|-------|-------|----|-------|-------|
| 1 | 0.100 | 0.100 | 8 | 0.230 | 1.610 |
| 2 | 0.100 | 0.200 | 9 | 0.238 | 1.848 |
| 3 | 0.154 | 0.354 | 10 | 0.243 | 2.092 |
| 4 | 0.225 | 0.579 | 11 | 0.293 | 2.335 |
| 5 | 0.266 | 0.845 | 12 | 0.350 | 2.627 |
| 6 | 0.288 | 1.133 | 13 | 0.350 | 2.977 |
| 7 | 0.247 | 1.380 | 14 | 0.347 | 3.324 |

通过表 1 和表 2 的实际运行结果可以看出,在求导阶数为 10 阶时,仿真至 3s 需积分 12 步,在求导阶数为 8 阶时,仿真至 3s 需积分 13 步。与定步长 0.2s 时相比,计算效益分别提高了 20% 和 13.3%。

5 小结

本文首次提出了变步长快速高阶 Taylor 级数法暂态稳定计算方法。在确保计算精 (下转第 45 页)

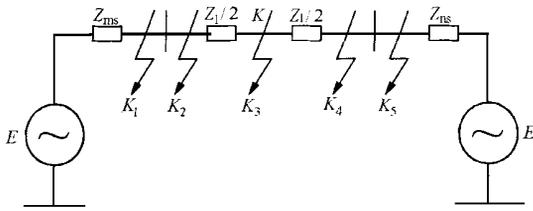


图2 系统模型图

Z_{MS} 为系统M侧的阻抗, Z_{NS} 为系统N侧的阻抗, Z_1 为线路阻抗, K 为零序阻抗补偿系数, E 为发电机电势。

5.2 系统模型参数的设定

5.2.1 为了保证故障电流小于测试设备允许输出的最大电流30A,因此,限定系统阻抗 Z_{MS} 及 Z_{NS} :

$$(E/Z_{MS}) \leq 15A \quad (E/Z_{NS}) \leq 15A$$

$$\text{即: } Z_{MS} (Z_{NS}) = 100/15 \times 1.732 = 3.8$$

5.2.2 为计算简便,设定系统M侧的零序、正序、负序阻抗都为 Z_{MS} ,系统N侧的零序、正序、负序阻抗都为 Z_{NS} 。

5.2.3 不考虑过渡电阻及对侧系统对本侧的影响。

5.2.4 固定线路阻抗角80度。

5.2.5 设置 K_1-K_5 五个故障点,故障类型为单相短路(AN, BN, CN),相间短路(AB, BC, CA),三相短路(ABC)。实验时双端设定相同实验时间,选取对应故障点相同故障相别。

5.2.6 为模拟系统故障时的非周期分量,应向故障电流中叠加相应的分量:

$$i_a = I_a \sin(\omega t + \alpha) + I_a \sin(\alpha - \omega t) e^{-t/T}$$
,直到非周期量衰减到足够小为止。

5.2.7 实验时应实时地监视保护的動作情况,在监测到保护动作时的两周波之后第一次电流过零点,切断短路电流,恢复正常电压。

5.2.8 各种短路情况下,故障参数分析如表1所示。

5 结语

利用GPS进行同步暂态实验,其最大的优点就是能够模拟更真实的故障,使得高压线路纵联保护的调试更加精确,为高压线路保护的远距离双端测试提供了非常优越的条件,相信以后在这一方面的研究会更加趋于完善。

Using GPS to realise distant two - end testing of HV line protection

ZHANG Ke-yuan¹, LUO Jing¹, ZHAO Ming²

(1. Xuchang Relay Research Institute, Xuchang 461000; 2. Bangfu Power Supply Bureau, Bengbu 233000, China)

Abstract: A distant two - end testing plan of HV line protection based on GPS is presented. It describes the principal structure and realization of the plan and the setup of the two - end experimental model and its application future.

Keywords: longitudinally - connected protection; synchro - clock; time setting

(上接第2页)度的前提下,通过在暂态稳定计算中灵活的控制积分步长,显著地减少了在定步长控制中的冗余计算量。实际运行结果表明,该方法有效地提高了快速高阶 Taylor 级数法暂态稳定计算方法在经典发电机模型下的解算效益。

参考文献:

- [1] 郭志忠. 电力网络节点解析新探. 华北电力学院博士学位论文, 1991: 70-75.
- [2] 郭志忠, 柳焯. 快速高阶 Taylor 级数法暂态稳定计算. 中国电机工程学报, 1991, 11(3): 8-16.

A new fast transient stability simulation method

BAI Xue-feng¹, GUO Zhi-zhong¹, WANG Yong-gang²

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001; 2. Xuchang Relay Research Institute, Xuchang 461000)

Abstract: Based on the analysis of calculation quantum and calculation precision in Fast Transient Stability Simulation by Higher Order Taylor Series Expansions, a dynamic order control is proposed under the requirement of calculation precision. The numerical simulation tests demonstrate that the dynamic order control improves the calculating efficiency greatly and has practical value in power system transient stability simulation and analysis.

Keywords: power system; transient stability; Taylor series method