

综合变量分组与退出策略 的电力系统长过程动态数值仿真方法

常永吉, 于继来

(哈尔滨工业大学电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 变量分组策略对于解决电力系统长过程动态仿真的刚性问题发挥了积极作用。但由于参与分组的变量在动态全过程中均需要进行积分运算, 制约了计算效率的进一步提高。对此问题, 在变量分组的基础上引入变量适时退出策略: 当某些变量变化幅度降到设定的阈值以下时, 可将它们暂时退出分组和积分运算。此措施既能降低参与分组变量的维数, 又能减小仿真过程的运算量, 从而提高系统仿真的整体计算效率。算例结果表明, 所提方法具有随着系统规模增大、计算效率提高越明显的优良特性。

关键词: 电力系统; 动态仿真; 变量分组; 变量退出

A long term dynamic numerical simulation method of power system integrated variables grouping and seceding grouping strategy

CHANG Yong-ji, YU Ji-lai

(Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Variables grouping strategy exerts active effect on solving stiff problem in long term dynamic simulation for power system. But variables participating in grouping all need attend integration operation in full dynamic process, which restricts computational efficiency further enhancement. To this problem, this paper brings variables seceding grouping strategy based on variables grouping strategy, that is, some variables may secede grouping and integration operation temporarily after their varied amplitude or variety rate is under prescriptive threshold value. This measure reduces dimension of variables participating in grouping, and diminishes operation quantity, thus the whole computational efficiency is improved. Test results show that the computational efficiency can be enhanced obviously with the accretion of system size.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (No.50877014).

Key words: power systems; dynamic simulation; variable grouping; variables seceding

中图分类号: TM75 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)20-0023-05

0 引言

动态仿真是电力系统稳定分析与控制的常用工具, 也是调度部门指导运行的主要依据^[1]。电力系统动态仿真计算量很大, 对速度要求较严格。目前的难点在于既要模拟慢速现象又要模拟快速现象的长期动态仿真问题^[2]。由于电力系统由大量发电机、励磁器、调速器、负荷、变压器、电力电子设备等组成, 因此其动态仿真模型通常由大量的微分-代数方程组成; 同时, 系统各环节的时间常数从几十毫秒到 100 s 以上, 差异较大, 使得系统呈现高阶非

线性、强刚性的特点^[3]。常规的数值仿真方法难以适应。系统的刚性实质是: 在计算慢变解的过程中, 存在迅速衰减的快变扰动, 使得慢变解的数值计算复杂化^[4]。对电力系统长过程动态问题, 刚性表现得更为明显和特殊。如果此时运用传统固定小步长积分方法, 则需要很长的计算时间。如何在保证精度的前提下提高计算效率, 是研究电力系统长过程动态数值仿真不可回避的主要问题之一。

通常, 可将变步长策略应用于电力系统动态仿真。当系统遭受扰动且当快变部分衰减到几乎不起作用时, 就可以提高慢变部分的积分步长以提高计算效率。然而, 此种方式受快变部分衰减特性的影响较大: 只要快变部分尚未衰减到足够小, 慢变部

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50877014)

分的积分步长就难以得到明显增大,效率提高程度也就受到严重制约。文献[5~7]等注意到,在刚性系统中,通常只有一小部分系统呈现快变特性,若将快变部分和慢变部分分开区别对待,则可进一步提高计算效率。此策略的核心就是变量分组。其中,文献[5]还将变量组别划分、相对步长因子调整、最小积分步长调整三种措施进行了统一处理,克服了现有方法难以做到同时自适应调整多个控制参数的不足,使计算效率得到了进一步提高。

变量分组策略虽使计算效率得到了提高,但由于变量分组和分组后的积分计算贯彻整个动态过程,因此,效率提高受到一定程度的制约。实际上,许多变量在动态过程中趋于平稳化后,可以不再参与变量分组及分组后的积分计算。如依据一定的准则将趋于平稳化后的变量退出分组和分组后的积分,使其转入简单代数运算,则可显著降低这些变量的计算量,还可以松弛被这些变量制约的其它变量,从而提高整个计算过程的效率。

基于文献[5],本文引入快变量逐步退出分组和积分运算的策略,使参与分组的变量间的刚性得到相应的降低,从而为进一步提高计算效率创造条件。

1 方法描述

1.1 变量分组与积分步长的统一自适应控制策略

电力系统动态仿真采用变量分组的理论基础源于刚性分布具有的时空局部性^[5]。其中,时间层面的局部性使得只需针对出现局部刚性的时段采取特别的积分措施而其余柔性时段可以采取常规积分措施;变量空间层面的局部性说明:在局部时段出现刚性的情况下,也只是一小部分变量相对于其它变量呈现刚性,而绝大部分变量空间是柔性的,即真正呈现刚性的变量空间维数实际上比全变量构成的空间维数要低得多。

基于此,整个系统根据某一规则或某些指标(如局部截断误差)分成快慢两个或多个部分,然后采用低阶积分方法(如隐式梯形积分)进行仿真。图1给出了快慢2组变量求解的示意。

设仿真已进行到 T_0 时刻。在快慢变量时间点未平齐到 T_1 时刻之前,快变组采用小步长 Δt 积分,慢变组采用低阶插值方法计算。在2组变量平齐到 T_1 时,对所有变量采用大步长 ΔT 进行校正积分计算,同时,调整2组变量的组成及相对步长因子($\Delta T/\Delta t$)和最小积分步长 Δt ,以达到自适应柔性分组的目的。

由上述过程可见,在 T_1 时刻,文献[5]算法可同时完成四件任务:变量分组;调整组别间相对步长

因子;调整最小积分步长;精度的积分校正。这四件任务是根据积分进程自适应完成的,它们在保证精度的前提下显著提高了计算效率。

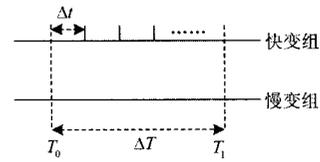


图1 快、慢变量的分组协调求解

Fig. 1 Coordinated calculation between fast and slow groups

减如前文分析,文献[5]虽采取了四项策略,但效率并没有达到最大,还可借助其它措施进一步提高效率。其中,部分变量到一定阶段趋于平稳化后暂时退出积分运算,就是进一步可采用的措施之一。

1.2 变量退出策略

由1.1知,文献[5]由局部截断误差的大小决定变量组别,且所有变量在整个求解过程中一直参与分组。然而,对电力系统长周期动态过程而言,有许多变量作用的时间较短,它们在边界层内很快衰减,当超出边界层后,解分量受这部分变量变动成分的影响已很小,此后若继续维持这些变量参与分组和积分运算,则会干扰变量分组、制约组别间相对步长因子和最小积分步长,并因此限制其它变量积分步长的放大,从而导致效率提高出现“瓶颈”。

为消除此“瓶颈”现象,可在快变量变动成分衰减到很小或快变量本身变得比较平稳后,将其退出分组和积分运算,并在其后的时间内固定其值为变量包络中心值。不断有快变量平稳后退出分组与积分运算,可使参与分组和积分运算的变量数越来越少,计算规模得到逐步降低;同时,还可显著加快剩余变量积分的计算速度。

下面分析变量退出对最终计算精度的影响。

假设含有慢变量 x 和快变量 y 的系统如下:

$$\dot{x} = f(t, x, y) \quad (1)$$

$$\dot{y} = g(t, x, y) \quad (2)$$

其中: t 是时间变量。

通常,在某一扰动后,如果 y 在下一扰动之前呈逐渐衰减趋势,并在一定时刻 t_x (先于下一扰动发生时刻)后,其变化幅度小于某一阈值,则可在下一扰动之前的时间范围内,忽略该变量的波动成分,将其取为变量包络中心值 y_b ,这相当于 \dot{y} 近似为0,即

$$g(t, x, y) \approx 0 \quad t > t_x \quad (3)$$

对在下次发生扰动之前系统变量趋于振荡幅度衰减的情况,由于 y 已经可以固定为变量包络中

心值 y_b , 只要波动幅度阈值取得充分小, y_b 相对于最终真解的偏差可忽略不计, 即

$$\left| \lim_{t > t_x, \Delta t \rightarrow \infty} y(t) - y_b \right| = 0 \quad (4)$$

y 的精度可通过设定充分小的波动幅度阈值得到保证。那么, x 最终结果的精度是否可以得到保证呢?

由式(1)知, \dot{x} 因 y 退出而产生的偏差为(忽略高阶无穷小项)

$$\Delta \dot{x} = \frac{\partial f}{\partial y} \Delta y \quad (5)$$

式(5)中, 在式(4)满足时, $|\Delta y|$ 在 $t > t_x$ 且 $t \rightarrow \infty$ 的条件下, 进一步衰减并趋于0; 而 $\frac{\partial f}{\partial y}$ 在 $t > t_x$ 且 $t \rightarrow \infty$ 条件下, 数值有界, 导致 $\left| \frac{\partial f}{\partial y} \Delta y \right|$ 最终也趋于0, 即

$$\lim_{t > t_x, \Delta t \rightarrow \infty} |\Delta \dot{x}| = 0 \quad (6)$$

式(6)说明, y 退出对 x 导数的影响最终趋于0。因此, 在忽略高阶无穷小项的情况下, x 因 y 退出而产生的精度偏差, 理论上最终也应趋于0。

当然, 实际计算的 $|\Delta y|$ 最终可能存在某一微小误差(主要由 y_b 取值误差引起), 并因此导致 x 产生误差。只要 $|\Delta y|$ 充分小, x 误差就可控制在工程允许范围内。

下面以一简单系统验证上述结论。

设含有快慢变量的简单系统为:

$$\dot{x} = -0.2x + 9.8y \quad (7)$$

$$\dot{y} = -10y \quad (8)$$

其初始值 $x(0)=0.15$, $y(0)=-0.1$ 。初始点对应的系统特征值分别为 10 和 0.2, 其比为 50, 由式(7)和式(8)组成的系统精确解为:

$$x(t) = 0.05e^{-0.2t} + 0.1e^{-10t} \quad (9)$$

$$y(t) = -0.1e^{-10t} \quad (10)$$

在这个系统中, 变量 x 和 y 可分别认为是慢变量和快变量。图 2 和图 3 分别给出了 y 变化幅度小于某一阈值时取包络中心值后, y 和 x 相对于真解的误差。其中, 曲线 a 对应的阈值为 10^{-4} (y 退出积分运算的时刻是 0.75 s, $y_b = -6.1125 \times 10^{-5}$), 曲线 b 对应的阈值为 10^{-5} (y 退出积分运算的时刻是 0.98 s, $y_b = -6.1283 \times 10^{-6}$)。图 2 和图 3 说明快变量的变化幅度小于给定阈值后退出积分运算, 对自身及慢变量最终结果的精度影响可控制在工程允许范围内。

在电力系统长周期动态过程仿真中, 与发电机组电磁关系有关的变量, 变化较快^[8], 衰减也较快; 另外, 远离扰动中心的变量, 由于受扰动影响小, 它们趋于平稳化的时间也较短。对这些变量, 可在

适当的时候暂时退出待求解的微分代数方程组。若后续过程又出现新的扰动, 则可将它们重新纳入积分运算。

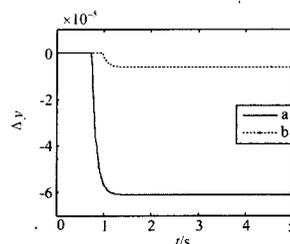


图 2 y 误差曲线

Fig.2 Error of y

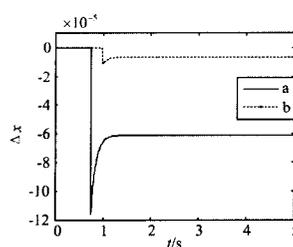


图 3 x 误差曲线

Fig.3 Error of x

判断变量是否可暂时退出的规则如下:

当快变变量经历一定时间后, 变化幅度相对很小(此时它们或微幅振荡, 或变化率较小, 可近似认为接近平稳), 即事先设定某一阈值, 若快变变量变化幅度小于该阈值, 则认为其变动成分的影响微乎其微。此时, 可认为这些变量的变化率近似为零。

下面以与发电机组励磁系统电势有关的变量为例说明变量退出的具体处理方法。

由发电机 5 阶模型^[8]可知, 其实用计算时的转子绕组暂态方程近似为

$$T_{d0}' \dot{E}_q' \approx E_{fq}' - E_q' - (X_d - X_d') I_d \quad (11)$$

$$T_{d0}'' \dot{E}_q'' \approx -E_q'' + E_q' - (X_d' - X_d'') I_d \quad (12)$$

$$T_{q0}'' \dot{E}_d'' \approx -E_d'' + (X_q - X_q'') I_q \quad (13)$$

上述方程各变量含意见文献[8]。

设系统在遭受扰动一段时间后, 已有变量 E_q' 、 E_q'' 、 E_d'' 满足前述的退出条件, 则式(11)~(13)可近似写为:

$$0 \approx E_{fq}' - E_q' - (X_d - X_d') I_d \quad (14)$$

$$0 \approx -E_q'' + E_q' - (X_d' - X_d'') I_d \quad (15)$$

$$0 \approx -E_d'' + (X_q - X_q'') I_q \quad (16)$$

从变量退出到下一扰动再次发生的时间范围内, 式(14)~(16)中的 E_q' 、 E_q'' 、 E_d'' 可取常数, 于是

得到 I_d 、 I_q 、 E_{fd} 的表达式:

$$I_q = \frac{E_d^*}{X_q - X_q^*} \quad (17)$$

$$I_d = \frac{E_q^* - E_q}{X_d^* - X_d} \quad (18)$$

$$E_{fd} = E_q^* + (X_d - X_d^*)I_d \quad (19)$$

在后续计算中, 式(11)~(13)用式(17)~(19)代替, 从而就可略去这部分变量变化成分对系统的影响。相应的, 网络方程中的发电机端电压则根据定子回路方程(20)来计算。

$$\begin{cases} V_d = X_q^* I_q + E_d^* \\ V_q = -X_d^* I_d + E_q^* \end{cases} \quad (20)$$

2 算法步骤

综合 1.1 节变量分组策略^[5]和 1.2 节变量退出策略, 可形成如下电力系统长过程动态仿真算法:

- ① 输入原始数据、赋给或计算相关变量初值。
- ② 当前时刻有无网络故障或操作?若有, 则处理, 且所有变量参与积分和分组; 若无, 则继续。
- ③ 判断发电机电磁方程、励磁系统中的变量是否满足退出条件, 若满足, 则设置该变量退出标记, 并将相关变量置成某一平稳数值。
- ④ 对无退出标记的变量采用 1.1 节方法^[5]进行组别划分、相对步长因子调整、最小积分步长调整。
- ⑤ 按分组顺序分别进行各组内变量的插值和积分运算以及不同组别间的自校正积分运算^[5]。
- ⑥ 计算终止判定: 若系统已经失去稳定或时间已经达到预先设定的上限 t_{max} , 则停止计算; 否则, 返回②继续。

步骤③中, 在程序实现上: 在每一大步长平齐时刻, 考察相关变量当前时刻的数值与前面若干求解点分别比较, 差的绝对值是否均低于所设定阈值, 若是(阈值越小, 变量退出的时刻越靠后, 通常可取 $\leq 10^{-4}$), 则满足退出条件, 以此来保证当前时刻的各个快变量的变化幅度相对很小。

3 算例分析

本文采用 WSCC3 机 9 节点系统^[9] (系统 I) 和 IEEE57 标准系统 (系统 II) 作为测试系统。2 个算例的发电机均采用 5 阶模型, 且每台发电机都带有励磁和一个 IEEE 普通调速系统及汽轮机。程序应用 Visual C++5.0 编制, 操作系统为 Win2000。

为方便, 将传统固定步长、常规变量分组和本文方法分别记为 Method1、2 和 3。其中, Method 1

步长为 0.01 s, Method 2 和 3 基准步长也取 0.01 s, Method 3 中发电机电磁方程、励磁系统变量退出积分的变动幅度阈值设为 10^{-4} 。

2 个系统的扰动序列设置如下:

系统 I 故障序列为: 1 s 时 7 号节点三相短路, 1.1 s 切除, 30 s 时, 8 号节点负荷切除 50%, 60 s 时, 8 号节点负荷又恢复到初始状态。仿真时间 90 s。

系统 II 故障序列为: 1 s 时 1 号节点三相短路, 1.1 s 时切除, 30 s 时, 1-17 和 1-15 号线路发生断线, 30.1 s 时 1-17 号线路断线故障解除, 仿真时间 80 s。

3.1 计算结果

图 4~7 给出了利用方法 Method 1 和 3 对系统 I 进行仿真所得的部分变量曲线。其中, 发电机电磁方程、励磁系统变量在 1 s、30 s、60 s 三次扰动后退出积分的时刻分别为: 20.91 s、48.67 s、87.33 s。

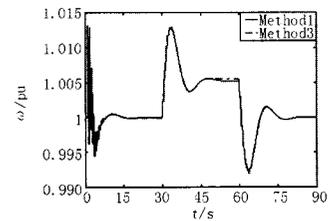


图 4 系统 I 2 号节点发电机角频率
Fig.4 Generator speed at node 2 of system I

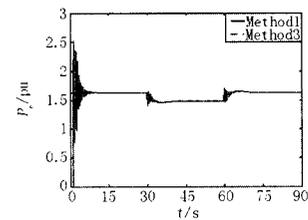


图 5 系统 I 2 号节点发电机有功功率
Fig.5 Generator active power at node 2 of system I

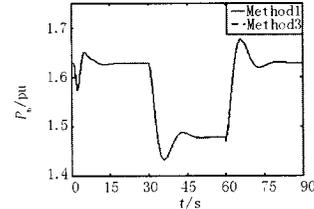


图 6 系统 I 2 号节点发电机机械功率
Fig.6 Generator mechanical power at node 2 of system I

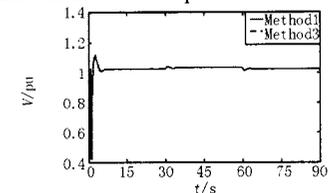


图 7 系统 I 2 号节点发电机端电压
Fig.7 Generator voltage at node 2 of system I

图 8~11 为利用方法 Method 1 和 3 对系统 II 进行仿真所得的部分变量 50 s 内的曲线。其中, 发电机电磁方程、励磁系统变量在 1 s、30 s 二次扰动后退出积分的时刻分别为: 23.85 s、45.45 s。

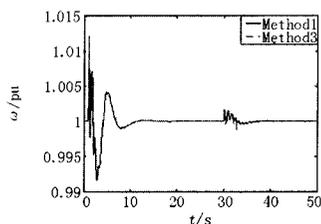


图 8 系统 II 1 号节点发电机角频率

Fig.8 Generator speed at node 1 of system II

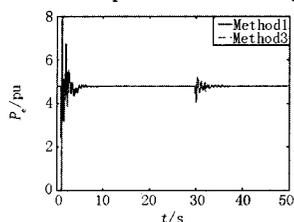


图 9 系统 II 1 号节点发电机有功功率

Fig.9 Generator active power at node 1 of system II

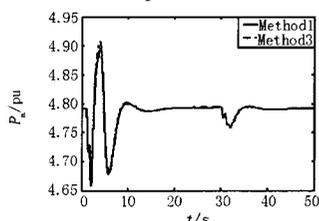


图 10 系统 II 1 号节点发电机机械功率

Fig.10 Generator mechanical power at node 1 of system II

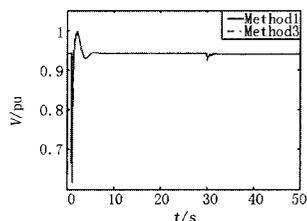


图 11 系统 II 1 号节点发电机端电压

Fig.11 Generator voltage at node 1 of system II

3.2 算例小结

由图 4~11 可见, Method 3 与 Method 1 的结果比较接近, 虽然中间有一定差别, 但变化趋势是相同的。

下面考察 2 个算例仿真精度。图 4~11 给出了 Method 2~3 相关变量在计算终点时相对于 Method 1 的精度 (表 1)。

由表 1 可见, Method 3 的精度相对于 Method 2 稍有下降, 但对于长过程动态仿真而言, 所得精度

足以满足工程需要。

表 1 方法 Method 2~3 终点精度比较

Tab.1 Precision comparison for Method 2~3 at the end

系统	变量	精度	
		Method2	Method3
I	P_e	-2.5600×10^{-6}	7.9210×10^{-5}
	ω	3.6000×10^{-7}	-4.7490×10^{-5}
	P_m	7.0000×10^{-7}	3.6940×10^{-5}
	V	-6.4833×10^{-9}	-8.5343×10^{-7}
II	P_e	2.5950×10^{-5}	-6.3209×10^{-4}
	ω	-1.4000×10^{-7}	6.2100×10^{-6}
	P_m	7.1710×10^{-5}	2.0022×10^{-4}
	V	-2.5167×10^{-7}	1.7663×10^{-6}

为考察计算效率, 用相对加速因子 Spf (Method 1 计算时间/其它方法计算时间) 来评估不同方法计算效率的差异。

表 2 给出了 Method 1~3 的计算时间和加速因子。由表可见, Method 3 相对于 Method 2 和 1, 效率明显得到提高。另外, 无论是 Method 2 还是 Method 3, 系统规模越大 (系统 II 规模大于系统 I), 计算效率提高的程度就越大, 而且, Method 3 比 Method 2 更具有随系统规模增长、效率提高越明显的特点。

表 2 Method 1~3 计算效率比较

Tab.2 Efficiency comparison for Method 1~3

系统	Method	计算时间/s	Spf
I	1	3.609	1
	2	2.469	1.46
	3	1.750	2.06
II	1	15.047	1
	2	6.984	2.15
	3	4.906	3.07

4 结论

基于综合变量分组和退出策略的电力系统长过程动态仿真算法, 可以在保持足够计算精度的前提下, 使计算效率得到进一步提高, 并且, 方法具有随系统规模增长, 效率提高越明显的特点。

参考文献

- [1] 马进, 王景钢, 贺仁睦. 电力系统动态仿真的灵敏度分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(10):20-27.
MA Jin, WANG Jing-gang, HE Ren-mu. Sensitivity Analysis of Power System Dynamic Simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(10): 20-27.
- [2] Kundur P. Power System Stability and Control Electric[J]. New York: McGraw-Hill, 1994.

(下转第 33 页 continued on page 33)

参考文献

- [1] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距的原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.
GE Yao-zhong. New Types Protective Relaying and Fault Location Theory and Techniques[M]. Xi' an: Xi' an Jiaotong University Press, 1996.
- [2] 徐丙垠. 利用暂态行波的输电线路故障测距技术 (博士学位论文)[D]. 西安: 西安交通大学, 1991.
XU Bing-yin. Fault Location Technology of Transmission Lines Based on Traveling Waves, Doctoral Dissertation[D]. Xi' an: Xi' an Jiaotong University, 1991.
- [3] Vassilios Chatzis, Ioannis Pitas. A Generalized Fuzzy Mathematical Morphology and its Application in Robust 2-D and 3-D Object Representation[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2000, 9(10):1798-1810.
- [4] Niemeijer M, Staal J, Ginneken B V, et al. Comparative Study of Retinal Segmentation Methods on a New Publicly Available Database[Z]. Image Sciences Institute, univ. Medical center Utrecht, the Netherlands Department of Ophthalmology and Visual Sciences, Univ of Iowa, USA, 2004.
- [5] 林湘宁, 刘沛, 刘世明, 等. 电力系统超高速保护的形态学-小波综合滤波算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (9): 19-24.
LIN Xiang-ning, LIU Pei, LIU Shi-ming, et al. A Novel Integrated Morphology-wavelet Filter Algorithm Used for Ultra-high Speed Protection of Power System[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (9): 19-24.
- [6] Lian Bao, Salama M M A. An Overview of Digital Fault Location Algorithms for Power Transmission Lines Using Transient Waveforms[J]. Electric Power Systems Research, 1994, 29:17-25.
- [7] Ancell G B, Pahalawaththa N C. Effects of Frequency Dependence and Line Parameters on Single Ended Traveling Wave Based Fault Location Schemes[J]. IEE Proceedings-C, 1992, 139(4):332-342.
- [8] 徐丙垠, 李京, 陈平, 等. 现代行波测距技术及其应用[J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (23):62-65.
XU Bing-yin, LI Jing, CHEN Ping, et al. Modern Traveling Wave Based Fault Location Technology and Its Application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (23):62-65.
- [9] 林湘宁, 刘海峰, 等. 基于广义多分辨形态学梯度的自适应单相重合闸方案[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (7):101-106.
LIN Xiang-ning, LIU Hai-feng, et al. Generalized Multi-resolution Morphological Gradient Based Self-adaptive Single-phase Reclosure Scheme[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (7):101-106.
- [10] 吴青华, 张东江. 形态学滤波技术及其在继电保护中的应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (7): 45-49.
WU Qing-hua, ZHANG Dong-jiang. Morphological Filtering Techniques and Applications in Protection Relaying[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (7): 45-49.
- [11] 陈平, 李庆民. 基于数学形态学的数字滤波器设计与分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (11): 60-65.
CHEN Ping, LI Qing-min. Design and Analysis of Mathematical Morphology-based Digital Filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (11): 60-65.

收稿日期: 2008-11-07; 修回日期: 2009-03-03

作者简介:

刘万超 (1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护与控制; E-mail: liuwanchao83@163.com

陈平 (1969-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统继电保护与控制;

马永明 (1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护与控制。

(上接第 27 页 continued from page 27)

- [3] Dan Yang, Venkataramana Ajarapu. A Decoupled Time-Domain Simulation Method via Invariant Subspace Partition for Power System Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(1): 11-17.
- [4] 刘德贵, 费景高, 汤铭端. 刚性系统数字仿真算法[J]. 系统仿真学报, 1993, 5(2): 2-10, 27.
LIU De-gui, FEI Jing-gao, TANG Ming-duan. Digital Simulation Algorithms for Stiff Systems[J]. Journal of System Simulation, 1993, 5(2): 2-10, 27.
- [5] 常永吉, 赵钢, 于继来. 电力系统动态过程的柔性自校正仿真方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(10):22-27.
CHANG Yong-ji, ZHAO Gang, YU Ji-lai. Power System Dynamic Simulation with Flexible Self-adjustment Method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(10): 22-27.
- [6] HOU Lan-juan. Power System Dynamic Simulation Using System Partitioning and Multiple Step Size Techniques[D]. Arizona State University, 1994.
- [7] Crow M L, Chen J G. The Multi-rate Simulation of Facts Devices in Power System Dynamics[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(1): 376-382.
- [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.
- [9] Anderson P M, Found A A. Power System Control and Stability[M]. John Wiley & Sons, Ltd, 2002.

收稿日期: 2008-10-28; 修回日期: 2008-11-21

作者简介:

常永吉 (1972-), 男, 博士生, 研究方向为电力系统动态仿真; E-mail: cyj@hagongda.com

于继来 (1965-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统分析与控制。