

利用系统辨识进行超前预测中止的在线快速仿真法

周良松,彭波,夏成军,胡会骏

(华中理工大学电力工程系,湖北 武汉 430074)

摘要: 应用基于系统辨识的快速暂稳预测方法,超前判别系统的稳定性及稳定裕度,在充分保证判断准确性的情况下,对某些可以确认为稳定的故障,超前中止仿真计算,从而大大节省在线动态安全分析的宝贵时间,以实现在线准实时稳定控制。

关键词: 电力系统稳定; 系统辨识; 稳定预测

中图分类号: TM743 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2000)11-0009-04

1 引言

国内外用于在线暂态稳定分析的方法很多,但直接用于电力系统实时控制的在线稳定分析结果,在实施紧急控制的过程中,不可能接受人工审查和校核,必须保证正确无误。因此在这些方法当中,由于时域仿真法比较成熟,可以考虑各种复杂模型,其精度也能满足工程要求,所以仍然是进行精确在线暂态稳定分析的主要手段。

但是在在线实时或准实时暂稳控制系统的实际应用当中,即使可以采用一种较好的快速事故筛选方法在较短的时间内将事故预想集近三分之二的预想事故快速筛除掉,大大减轻在线暂态稳定分析的负担。但是仍然有将近三分之一的预想事故需要进行详细的时域仿真计算,并且要计算出具体稳定控制措施。而根据目前的计算机条件,采用传统的时域仿真法要做到准实时(5~10min内)完成这些任务仍然较难。实际上,利用时域仿真法进行仿真计算花费的总时间与实际系统被仿真的暂态过程持续时间有关,如果能够设法减少对实际系统的仿真观察时间,则仿真计算所花的时间就可以大大减少。因此,寻求一种较好的中止仿真的判据和方法具有较高的实用价值。通常在时域仿真过程中一般通过判别发电机相对运动角速度有否小于零,或发电机之间最大相对角是否大于180度来判断系统是否初摆稳定或不稳定,从而终止仿真计算。有些文献^[1]曾提出一些超前中止仿真判据,但判断准确性较差,效果不太理想。为此,本文在基于系统辨识快速暂稳预测方法的基础上,提出了一种新的超前中止仿真方法,该方法是在时域仿真过程中,定时根据仿真输出的有关发电机功角和角速度的中间结果,应用基于系统辨识的快速暂稳预测方法,超前判别系统的稳定性及稳定裕度,对某些可以确认为稳定的故

障,则超前中止仿真计算,从而大大节省在线动态安全分析的宝贵时间,并充分保证了判断的准确性。

2 超前中止仿真方法的基本原理

2.1 基于系统辨识的暂态能量函数直接分析法

电力系统是一个非常复杂的时变的严重非线性多输入多输出系统,采用基于系统辨识的暂态稳定预测方法可以更准确地对系统进行预测模拟。该方法是一种利用系统参数辨识技术,直接对描述系统暂态过程的动态微分方程组模型参数进行辨识,进而推测系统的动态行为和稳定性的预测方法。当电力系统遭受大的故障冲击扰动时,其摇摆的运动轨迹由系统当时的运行状态和参数决定,根据系统在初始摇摆过程中所反映出来的一些外部状态量,利用系统辨识的方法,求取系统的内部参数模型,进而根据模型参数,利用能量函数法快速预测系统的稳定裕度及稳定性。这种利用系统辨识的方法,能够较准确地反映系统的运动轨迹,预测时不需要预先知道发电机的确切参数,避免了因参数与实际情况不符而造成的预测误差。并且由于在暂态过程中(尤指故障切除后)电力系统参数随时间缓慢变化,因此采用渐消记忆辨识法,用遗忘因子给历史数据加权,将旧的数据逐渐遗忘,从而达到人为地削弱历史数据的影响,强调当前数据的作用的目的,可以较好地避免了“数据饱和现象”的发生,较好地适应电力系统暂态稳定预测的特点。

对于一个多机电力系统,当受到大扰动时,对于判别首次摇摆稳定,即适用于故障后1~2s的短过程稳定分析,其系统运动方程往往采用若干简化假设的二阶模型,即所谓经典模型。而且,对于暂态过程来说,在故障切除后1~2s的首次摇摆过程中,若电力系统网络结构没有大的变动,则系统运动方程参数是缓慢变化的时变参数,可以近似假设为常数,

对系统辨识来说,这种假设是非常有意义的。当忽略阻尼时,系统运动方程可写成:

$$\ddot{\delta}_i = C_{i0} + \sum_{j=1}^n (C_{ij} \sin \delta_{ij} + D_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (1)$$

式中 $C_{i0} = \frac{P_{mi} - E_i^2 G_{ii}}{M_i}$, $C_{ij} = -\frac{E_i E_j B_{ij}}{M_i}$, $D_{ij} = -\frac{E_i E_j G_{ij}}{M_i}$, G_{ij} 和 B_{ij} 分别是系统收缩导纳阵中元素 Y_{ij} 的实部和虚部。

该式是一个非线性的微分方程,用它进行系统辨识较复杂。为此,可令系统的输入为:

$$u_{0i} = 1, u_{1ij} = \sin \delta_{ij}, u_{2ij} = \cos \delta_{ij}; \quad \text{其中 } i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n$$

再令输出为: $y_i = \delta_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 。则式(1)可写成线性化的多输入多输出方程:

$$y_i = C_{i0} \cdot u_{0i} + \sum_{j=1}^n (C_{ij} u_{1ij} + D_{ij} u_{2ij})$$

将上式进行差分后可以写成系统辨识的统一格式:

$$y(k) = T_k + \dots(k) \quad (2)$$

式中:

$$y^T(k) = [y_1(k), y_2(k), \dots, y_n(k)] = [1, 2, \dots, n]$$

$$T_k = [u_{0i} I_n, u_{1i1} I_n, u_{2i1} I_n, \dots, u_{1in} I_n, u_{2in} I_n]$$

$$T = [C_{i0}, C_{i1}, D_{i1}, \dots, C_{in}, D_{in}]$$

对式(2)应用渐消记忆的最小二乘辨识算法^[2],引用递推方程式可以得出辨识参数 \hat{T} ,再根据所得模型参数,利用时域仿真法或直接法,就可以进行暂态稳定的快速预测。分析该方法的辨识函数模型时发现,当 $n = 2$ 时,式(1)可以写成:

$$\ddot{\delta}_1 = C_{10} + C_{11} \sin \delta_{12} + C_{12} \cos \delta_{12} \quad (3)$$

从上式可以看出,其辨识函数模型是一个类似的正弦函数,同传统的基于临界机正弦功角特性预测方法的拟合函数似乎有些相似,但是本方法与之相比具有优点,即在进行稳定性预测时不需要预先知道有关发电机的惯性时间常数和原动机出力,大大减少了数据采集量,并且避免了因这些给定参数的误差而造成稳定预测结果的大误差。而且,本方法的预测结果要比之更为准确些,这是因为实际电力系统在暂态过程中,原动机出力受调节器的作用会发生缓慢的变化,虽然两种预测方法均是从基于原动机出力不变的经典模型得来,但是本方法可以

将这种缓慢变化所产生的附加影响的最新结果考虑进来,因此更符合实际系统。

利用该方法对其它的多机电力系统进行大量的仿真分析表明,对于每个多机电力系统都有一个自己的最佳辨识模型群数,当采用该辨识模型群数时,预测的效果最好,而当采用的辨识模型群数低于或高于这个最佳群数时,预测误差会相应增大,而对于不同的多机电力系统,其辨识模型群数的最佳取值不一定相同。各个多机系统的最佳辨识模型群数同该多机系统实际暂态摇摆的发电机群数有较大的关系,通常当辨识模型群数选为该系实际可行的几种分群方案中最小分群群数时,预测的误差达到最小。

另外,该基于系统辨识的暂稳预测方法,由于经辨识所得到的辨识系统其动态方程组模型比较简单,属于经典模型,因此它有一个重要优点是:可以对辨识系统很方便地应用暂态能量函数直接分析法进行暂态稳定的定量分析,不但可以得出系统是稳定还是不稳定的定性结论,而且可以求得暂态动能、暂态势能、以及能量裕度的定量结果^[3]。

2.2 超前中止仿真计算流程

本文提出的超前中止仿真方法,其基本步骤是在时域仿真过程中,每间隔一定时间,就调用一次渐消记忆辨识算法,对系统的动态方程进行实时辨识,从而根据所得到的发电机动态方程参数,结合该时

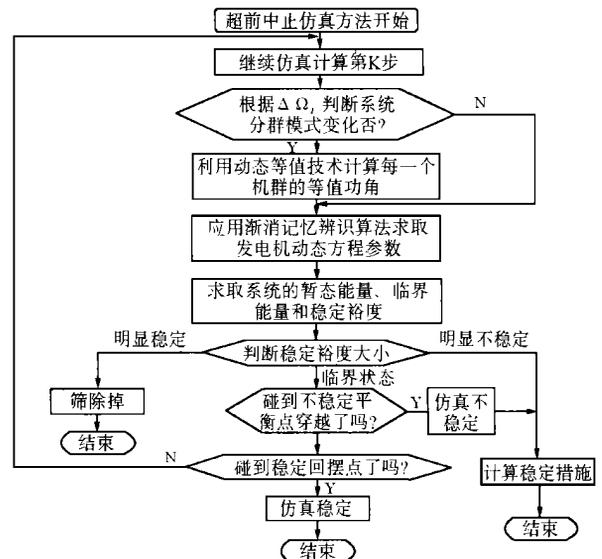


图1 超前中止仿真计算流程图

刻发电机的暂态动能,应用直接法超前判别系统的稳定性,并得出稳定裕度。该方法与文献^[4]中的快速事故筛选法有些相似,两者的主要区别是快速事

故筛选法只使用了故障切除后较少的几组仿真所得的发电机功角数据,而超前中止仿真方法则是对那些应用快筛选故筛选方法没有筛除掉的算例,继续进行仿真观察,不断地将仿真计算得到的发电机最新摇摆功角值加入到渐消记忆辨识算法中,再一次对系统动态方程参数进行辨识,求得系统稳定性的最新结果。如前所述,应用渐消记忆辨识算法可以很好地避免由于数据饱和而造成的辨识误差越来越大现象的发生;并使每次辨识的结果都最接近于实际系统,保证预测结果的准确性。该超前中止仿真计算方法的原理流程图如图1所示。

3 仿真分析

为了验证本文在线准实时暂态稳定综合分析法的可靠性和优越性,对该方法的在线分析速度和精度进行了仿真实验,并同传统的混合分析法^[1]进行了比较。以IEEE39节点的New England电力系统为例,分别对系统稳定、不稳定和临界稳定的预想故障进行了仿真分析。假定故障扰动为在29号母线至26号母线之间的33号支路上靠近26号母线的10%处发生三相接地短路故障,并且重合闸成功,通过改变故障切除时间,可以得到系统稳定和不稳定的各种情况,若系统稳定则输出稳定裕度^[4],若系统不稳定则输出保证系统稳定所需要的稳定控制措施。其中临界稳定平衡点附近的仿真比较结果如下。

算例1的故障切除时间为0.12s。用该方法仿真计算到故障开始后 $t = 0.50\text{s}$ 时,判断出系统稳定而超前中止了仿真,并得出暂态能量裕度为 $V = 0.97$,计算所花时间为0.30s。而用传统方法则仿真计算到 $t = 0.63\text{s}$ 时才判断出系统稳定,此计算过程所花时间为0.39s;另外为了计算稳定裕度,需要额外的计算时间 t_s ,该时间及稳定裕度的计算结果同具体方法有关。因此整个过程所花时间为 $(0.39 + t_s)$ 。

算例2的故障切除时间为0.13s。用该方法仿真计算到故障开始后 $t = 0.70\text{s}$ 时,判断出系统为稳定而超前中止了仿真,并得出暂态能量裕度为 $V = 0.34$,计算所花时间为0.51s。而用传统方法仿真计算到 $t = 0.74\text{s}$ 时发现系统稳定,计算所花时间为0.46s。故整个过程耗时 $(0.46 + t_s)$ s,其中, t 同上。

算例3的故障切除时间为0.14s。用该方法仿真计算到故障开始后 $t = 0.26\text{s}$ 时,判断出系统不稳

定,并估算出切机量为1台,然后按预估的切机量,对新的系统进行重新仿真计算,仿真结果为切1台机后系统稳定,计算机所花的总时间为0.59s。而用传统方法仿真计算到 $t = 0.73\text{s}$ 时才发现系统不稳定,然后计算稳定措施,输出结果为需切1台机,计算所花总时间为0.77s。

从仿真结果比较可以得出:对于系统比较稳定的算例,本方法大大快于传统方法;对于系统不稳定情况,本方法也明显快于传统方法;而对于系统为临界稳定算例中的绝大部分,本方法要比传统方法快得多,只有一小部分(如算例2),由于增加了附加计算,因而计算速度略慢一些,但相差不大。

另外,可以从仿真输出的结果看出,本方法在关于系统是稳定还是不稳定的结论上,与传统方法完全一样,这是因为都是以时域仿真计算为参考依据,保证了最终的结果为时域仿真的精度;而当系统稳定时,该方法得出的稳定裕度与传统方法的结果相比会有一定的误差,但是由于系统本身是稳定的,这种误差是无关紧要的。且当系统越接近临界稳定时,本方法得出的稳定裕度越小。从理论上可以证明,当系统越接近临界稳定时,本方法得出的稳定裕度的误差越小。而当系统为临界稳定时,各种方法得出的系统稳定裕度的计算结果几乎相等,都趋近于零。这也是该方法的一个独特优点,它既有较高的计算速度,又保证了临界状态和不稳定状态下计算结果的可靠性。

4 结论

本文在基于系统辨识的快速暂稳预测方法的基础上,提出并研究了新的基于系统辨识的超前中止仿真法。研究表明,新方法不但具有计算速度较快,可靠性较高的特点,而且可以方便对系统稳定进行定量分析,得出暂态能量裕度。并利用暂态能量裕度作为事故筛选的指标,可以较方便地调整和控制失误率,较有效地避免把不稳定事故误判为稳定事故的发生。通过将渐消记忆辨识算法应用到超前中止仿真中,有效地避免了辨识过程中数据饱和现象的发生,提高了超前中止仿真算法的可靠性和准确性。

参考文献:

- [1] 汪芳宗. 电力系统暂态稳定仿真计算及分析方法研究. 华中理工大学博士学位论文, 1991.
- [2] 韩光文. 系统辨识. 华中理工大学出版社, 1986.

- [3] 刘笙,汪静. 电力系统暂态稳定的能量函数分析. 上海交通大学出版社,1996.
- [4] 周良松. 在线暂态稳定分析与综合稳定控制系统的研究. 华中理工大学博士学位论文,1999,2.

作者简介: 周良松(1967-),博士,讲师,主要研究方向为电力系统稳定与控制,电力系统自动控制及计算机监控;彭波(1975-),男,硕士,主要研究方向为电力系统稳定与控制及管理信息系统;夏成军,男,博士研究生,主要研究方向为电力系统稳定与控制及人工智能的应用。

收稿日期: 2000-05-24; 改回日期: 2000-06-05

Fast on-line simulation method based on system identification

ZHOU Liang-song, PENG Bo, XIA Cheng-jun, HU Hui-jun

(Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, 430074 China)

Abstract: A new method of fast predicating system stability based on system identification is presented in this paper. By means of distinguishing the stability margin of power system, stability simulation can be terminated in advance. Therefore, it is possible to realize online quasi-real-time stability control.

Keywords: power system stability; system identification; stability predication

(上接第8页)

4 结语

配电自动化系统的建模和高级应用软件的各种算法是目前在该系统研究中的难题,随着配电网一次系统的改造到位及配电自动化系统的 SCADA 子系统和馈线自动化子系统的逐步建立,其研究和应用将日益完善。我们对文中提到的推荐算法都在实验中初步完成,并在用户现场进行了试运行,具有较高的精度和运行效率。

参考文献:

- [1] 陈竟成,张学松,于尔铿. 配电管理系统(DMS)及其应

用功能. 电力系统自动化,1999,18(13).

- [2] 刘健,倪建立,邓永辉. 配电自动化系统. 北京:中国水利水电出版社,1999.
- [3] 黄振华,吴诚一. 模式识别. 杭州:浙江大学出版社,1991.
- [4] 徐秉铮,张百灵,韦岗. 神经网络理论与应用. 广州:华南理工大学出版社,1995.

收稿日期: 2000-05-26

作者简介: 苏红峰(1969-),男,硕士研究生,主要从事配电自动化系统的研究与开发工作;魏蛟龙(1965-),男,副教授,主要从事人工智能、配电网建模等方面的研究与开发工作。

Advanced application software and its arithmetic of distribution automation

SU Hong-feng, WEI Jiao-long

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The modeling of Distribution Automation has put out, several functions and arithmetic of advanced application software are analysed and discussed, and improvement is proposed.

Keywords: Distribution Automation; PAS; modeling; arithmetic