

电力系统在线暂态稳定分析方法评述

何瑞文, 陈少华

(广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510090)

摘要: 电力系统最具在线应用前景的暂态稳定分析方法是直接法, 又可分为暂态能量函数法(又称李雅普诺夫直接法)和扩展等面积法。对这两类方法进行了评述, 指出这些方法存在的关键问题是可靠性问题, 并分析了主要的原因。认为需要开拓新的研究思路去实现可靠的在线暂稳定量分析方法。

关键词: 暂态稳定; 直接法; 暂态能量函数法; 扩展等面积法

中图分类号: TM712

文献标识码: A

文章编号: 1007-7162(2004)01-0026-04

电力系统互联能带来明显的经济和技术效益, 是电力工业发展的必然趋势。但是互联对电力系统的安全稳定运行提出了严峻的挑战。常规的稳定分析算法和稳定控制系统已经无法满足电力系统在越来越小的稳定裕度下运行的要求, 官方关于美国西部系统事故的分析报告明确提出, 造成灾难的主要原因之一是缺乏在线的稳定性量化分析及自适应的稳定控制决策支持^[1], 因此建立在线的稳定性定量分析及快速有效的控制技术有十分重要的意义。

电力系统最具在线应用前景的暂态稳定分析方法是直接法, 直接法计算速度快, 能对暂态稳定程度进行定量分析, 有一定的实际使用, 但是到目前为止, 还没有一种直接法在模型的详细程度、准确度和可靠性方面能与常规的时域仿真法相比。

1 暂态能量函数法

1.1 暂态能量函数法的特点

暂态能量函数法是基于李雅普诺夫稳定性理论的暂态稳定分析方法, 在暂态稳定的定量分析和快速性方面优势独特, 到目前为止, 应用李雅普诺夫直接法分析电力系统暂态稳定性已基本趋同于暂态能量函数法。20多年来, 研究主要致力于对于自治系统如何确定临界能量 V_{cr} 。基于相关不稳定平衡点求解的 RUEP 法、基于势能界面搜索的 PEBS 法及两者相结合的 BCU 法等的研究取得了很大的进展, 并趋于实用化^[2]。

暂态能量函数法是有完善稳定理论支持的暂态稳定分析方法。可以说快速性还不是真正体现暂态能量函数法优势的一点, 可以定量分析稳定程度才是它具有的真正独特优势。充分发掘暂态能量函数法在自治系统和非自治系统暂态稳定分析应用中的潜能, 让其充分展示出暂态能量函数法的独特优势就成为一个很有吸引力且颇有难度的课题^[3]。

目前暂态能量函数法只能作为暂态稳定分析的辅助工具, 还不能作为一种在线稳定分析的工具的最主要原因是存在着可靠性问题, 即计算的结果不够精确, 其原因作以下分析^[2-7]。

李雅普诺夫稳定性理论是面向自治系统的, 而电力系统本质上是非自治的, 对于非自治系

收稿日期: 2003-04-07

作者简介: 何瑞文(1969), 女, 讲师, 主要研究方向为电力系统稳定与控制、灵活交流输电技术。

统的暂态能量函数法的理论和应用方面的研究还有待于突破.而且李雅普诺夫直接法只给出了稳定性的充分条件,所以可能导致分析结果的保守性.目前暂态能量函数法主要用于第一摇摆稳定分析,对于多摇摆稳定性问题,需要精确计及各种阻尼因素,尚待进一步研究.

对单机无穷大系统,能量函数是严格的李雅普诺夫函数,但对于即使是自治的多机电力系统,若计及网络中线路的电阻,或负荷的电压特性,或采用高阶的发电机模型和计及励磁系统动态等等,由于系统势能的积分计算与系统运动轨迹有关,难以解析证明能量函数 V 的正定性,因此,相应的能量函数也不是严格的李雅普诺夫函数,相应的暂态稳定分析也不能严格满足李雅普诺夫稳定性定理,所以只是近似的直接法暂态稳定分析.

全系统的暂态能量只有部分能量真正对稳定性起作用,但要分离出对稳定起作用的能量是有困难的,采用双机等值校正只能一定程度上改善精度.而且,由发电机之间转移导纳决定的耗散势能 V_{diss} 的计算与积分路径有关,而暂态能量函数法中不计算实际系统故障后的发电机转子摇摆曲线,故计算中通常作线性路径假定,这会带来一定误差.

由于暂态能量函数法中不计算实际系统故障后的发电机转子摇摆曲线,所以临界能量 V_{cr} 都不是从临界轨迹获得的.由于临界能量 V_{cr} 的确定方法不同,形成了不同的直接暂态稳定分析方法,国内外研究的比较多的暂态能量函数法主要有相关不稳定平衡点法(RUEP)、势能界面法(PEBS)、基于稳定域边界的主导 UEP(BCU)法等.各种方法在计算 V_{cr} 时的近似都会带来误差.如:

①在 RUEP 法中,主导失稳模式的准确判别是有困难的.而且,实际多机系统的运动轨迹并不经过 RUEP 点,所以用 RUEP 点的势能作为 V_{cr} ,也有一定的误差.

②在 PEBS 法中,认为持续故障轨迹(代替临界轨迹)与势能界面相交的一点就近似地等于 UEP,以该点的势能作为该故障位置的临界能量.而这种近似是有条件的,因此会带来误差.

③在 BCU 法中,是用经过主导 UEP 的恒值能量面(代替稳定流形)去近似出口点的.而且,与 RUEP 法类似,以偏差功率方程为零确定的主导 UEP 点的势能作为 V_{cr} ,是有误差的.

1.2 暂态能量函数法的进展

暂态能量函数法对复杂元件模型的适应性较差,计及复杂元件模型后,由于暂态能量的定义以及临界能量的确定,相对于简单模型下的计算有较大变化,使计算的速度和精度问题非常突出.目前暂态能量函数法对复杂元件模型的考虑基本建立在准稳态模型上,并作一定的近似.准稳态模型简单,但忽略了元件内部的动态特性,这在处理暂态稳定这类需要考虑动态过程的问题时缺乏准确性.因此,研究电力系统在较精确模型下的暂态能量函数及临界能量,对于准确分析电力系统的暂态稳定性非常重要.文献[8]在直接法暂态稳定分析中考虑了 TCSC 与 SSSC 的准稳态模型,修正能量函数的形式来求取极限切除时间 CCT.

李雅普诺夫稳定理论具有初始扰动性质的条件,即初始扰动后再无其他扰动,所以基于自治系统的李雅普诺夫稳定性理论是很难考虑控制作用的.而一些响应速度快的动态控制元件,如切机和切负荷控制、汽门快关控制、快速励磁调节、FACTS 控制系统以及直流输电控制等,对电力系统暂态稳定性的发展过程起着重要的影响.因此,应用直接法分析受控电力系统的暂态稳定性是一个具有挑战性的课题,广义 Hamiltonian 系统理论的研究可能为此带来契机.文献[9]应用哈密顿系统理论对具有发电机励磁控制的电力系统暂态稳定性分析作了一定的探讨.

多机电力系统本质上是非自治的,即参数随时间而变的时变系统及有输入的定常系统(如

控制输入), 因此, 研究李雅普诺夫直接法在非自治系统的理论具有特别重要的意义. 如果只是建立在能量函数的修正上, 可能会有所偏差. 因为对于非自治系统, 确定稳定性的不返回点不再是由静态不稳定平衡点 UEP 决定, UEP 是一个描述静止状态的概念, 它只是不平衡功率的一个具有不稳定特征根的解, 动态过程中的不稳定平衡点与静态不稳定平衡点 UEP 是不同的^[10]. 目前李雅普诺夫直接法在非自治系统中的应用还没有突破性的进展, 因此也无法解决多摆稳定性问题, 因为只有自治的单机系统的多摆轨迹才是不断重复的, 非自治系统的各摆轨迹是变化的.

2 扩展等面积法

薛禹胜院士在《运动稳定性量化理论——非自治非线性多刚体系统稳定性的定量分析》一书中, 深入研究了非自治非线性多刚体系统的运动规律和特点, 揭示了非自治系统暂态稳定性很多重要的特征, 如动态鞍点 (DSP) 的概念. 提出的互补群群际能量壁垒准则 (CCEBC) 方法是根据多机系统受扰轨迹来判断非自治多刚体运动系统稳定的充要条件, 并从中提取有关稳定性的各种定性和量化信息. EEAC 是作为这个思想的一种实现方法^[10, 12].

CCEBC 方法是数值积分法和等面积准则的结合, 在 R^n 空间用数值积分来满足对复杂模型的适用性和精度要求, 所以在足够长的积分时间内可以分析多摆稳定性问题, 但这是以牺牲速度为代价来换取稳定性的定量分析的. 为了提高速度, EEAC 在 R^n 采用大步长的泰勒级数展开来代替数值积分, 并用正弦预报进行轨迹聚合, 聚合后的 OMIB 系统虽然具有时变性, 但只是逐段定常的 OMIB, 由此会带来计算误差.

映射在二维观察空间的 $2^n - 2$ 个映象子系统 ($n - 1$ 个独立两群划分方式) 是非常可观的数字, 因此, 该方法的关键是需要确定临界机群, 即有效地筛选出极少数的候选 R^1 . 在大系统中可靠辨识临界群的问题被公认为极其困难的, 而多机系统中, 辨识临界群和求取故障临界切除时间在本质上是相互依赖的. 由于失稳模式 (包括临界群和摇摆次数两个方面) 会随实际故障切除时间而变, 因此辨识临界群必须找到临界的失稳轨迹. 而要求取故障临界切除时间就必须先正确地构造能量函数, 而这又取决于临界群. 这样一来, 在 R^n 中就形成了一个死锁, 从本质上讲是难以直接解开的^[2]. EEAC 从操作上解开这个死锁, 但却不是严格的, 如果发生误判, 将产生很大误差.

3 结论

所有直接法在进行暂态稳定分析时, 都需要根据系统运行方式和故障条件判别故障失稳模式, 如相关不稳定平衡点法 (RUEP) 要确定与故障轨迹相关的不稳定平衡点、扩展等面积法 (EEAC) 要确定临界机群等. 而暂态能量函数法中临界能量不是从临界轨迹获得的, 如 RUEP 中仅用偏差功率方程为 0 作为检测不稳定平衡点的条件, 扩展等面积法只是从操作上先行近似判定一些临界机群, 这是目前直接法不可靠的根本原因.

由于直接法用于电力系统暂态稳定分析存在可靠性问题, 而且难以考虑复杂模型和控制问题, 所以面向整个电力系统的在线动态安全分析的实际应用尚有距离, 仅可作为暂态稳定分析的一种辅助方法, 充当暂态稳定分析的预处理器.

因此, 要实现可靠的在线暂稳定量分析方法还任重道远, 目前研究侧重于每一种方法的更深入的理论探索以及多种方法的相互结合, 甚至需要开拓新的思路去研究.

参考文献:

- [1] 薛禹胜. 现代电网稳定理论和分析技术的研究方向[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(10): 1-6.
- [2] 傅书, 倪以信, 薛禹胜. 直接法稳定分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [3] 万秋兰, 单渊达. 对应用暂态能量函数法分析电力系统暂态稳定性的评价[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(6): 57-59.
- [4] Athay T. A Practical Method for Direct Analysis of Transient Stability[J]. IEEE Trans. on PAS-98. 1979, 5730-584.
- [5] Chiang H, Wu F, Varaiya P P, et al. Foundation of the Potential Energy Boundary Surface Method for Power System Transient Stability Analysis[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, 1988, 35(6): 712-728.
- [6] Llamas A, Lopez J D, Mili L, et al. Clarification of the BCU Method for Transient Stability Analysis[J]. IEEE Trans on Power System, 1995, 10(1): 210-216.
- [7] 万秋兰, 单渊达. 对应用直接法分析电力系统暂态稳定性的再认识[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(9): 13-15.
- [8] Uros Gabrijel, Rafael Mihalic. Direct Methods for Transient Stability Assessment in Power Systems Comprising Controllable Series Devices[J]. IEEE Trans on Power System, 2002, 17(4): 1116-1122.
- [9] 孙元章. 考虑发电机励磁控制的电力系统暂态稳定分析[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(18): 1-5.
- [10] 薛禹胜. 运动稳定性量化理论——非自治非线性多刚体系统稳定性的定量分析[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1999.
- [11] 薛禹胜. EEAC 和 FASTEST[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(9): 25-30.
- [12] 薛禹胜. 暂态稳定预防控制和紧急控制的协调[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(4): 1-4.

A Review of On-line Methods for Power System Transient Stability Analysis

HE Rui-wen, CHEN Shao-hua

(Faculty of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090, China)

Abstract: The direct methods are very prospective for on-line use in power system transient stability. This paper describes the transient energy function method and EEAC. It is emphasized that the reliability is the key problem in the use of these methods, and the analysis of accuracy is given. It is suggested that a new thinking should be presented for reliable on-line transient stability analysis.

Key words: transient stability; direct method; transient energy function method; EEAC