

特高压交直流电网的小干扰稳定性分析

仲悟之, 宋新立, 汤涌, 卜广全, 吴国阳, 刘涛

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

Small Signal Stability Analysis for UHV AC/DC Power Grids

ZHONG Wu-zhi, SONG Xin-li, TANG Yong, BU Guang-quan, WU Guo-yang, LIU Tao

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: Along with the rapid development of UHV power grids in China, the static and dynamic behaviours of power grids become more and more complex, so special attentions are paid to small signal stability analysis. In this paper, the main problems existing in the simulation of small signal stability analysis in China are analysed and the thinking to solve these problems are put forward. They are: small signal stability analysis combining with wide area measurement system (WAMS), small signal stability analysis for medium-and-long-term process, regional automatic searching algorithm of eigenvalues, research and application of eigenvalue sensitivity and online pre-decision-making for small signal stability and so on. The technique for interfacing small signal stability software with online dynamic security analysis for early warning system as well as the significance of adopting parallel calculation are researched. It is pointed out that small signal stability analysis is an important means for the research and analysis on low-frequency oscillations in UHVAC/DC power grids and stabilizing measures of them.

KEY WORDS: UHV AC/DC power grids; small signal stability; wide area measurement system (WAMS); full dynamic; online security analysis; parallel computing

摘要: 分析了我国小干扰稳定仿真技术存在的主要问题, 提出了解决问题的思路, 包括: 结合广域测量系统(wide area measurement system, WAMS)的小干扰稳定性分析、中长期过程中的小干扰稳定性分析、特征值的区域自动搜索算法、特征值灵敏度研究与应用、小干扰稳定在线预决策技术等。探讨了小干扰稳定性分析软件与在线动态安全分析预警系统的接口技术, 以及并行计算技术的重要性, 并指出小干扰稳定性分析技术是研究和分析特高压交直流电网低频振荡问题及其稳定措施的重要手段。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2004CB217901)。

The National Basic Research Program of China(973 Program) (2004CB217901)。

关键词: 特高压交直流电网; 小干扰稳定性; 广域测量系统; 全过程动态; 在线预决策; 并行计算

0 引言

区域电网互联已成为我国电网发展的趋势^[1-2], 由于大型交直流互联电网存在电气联系薄弱环节, 使得电网的低频振荡问题相当突出。低频振荡对供电设备构成很大的威胁, 甚至可能诱发连锁故障, 造成大面积停电、系统瓦解等灾难性后果。因此, 对特高压交直流电网进行小干扰稳定性安全评估, 深入掌握系统的小干扰稳定特性具有重要的现实意义^[3-7]。

本文结合我国小干扰稳定性仿真技术的现状和对特高压交直流电网仿真系统的要求, 探讨有关小干扰稳定性的若干关键技术。

1 研究现状及关键技术

电力系统小干扰稳定性分析方法有4类: 数值仿真法、特征值分析法、频域分析法和非线性理论分析法^[8]。特征值分析法通过计算在系统状态矩阵的全部特征值、阻尼比、机电回路相关比、特征向量、特征值灵敏度和参与因子等, 揭示振荡模式是否稳定、各振荡模式与发电机之间的关联程度以及振荡不稳定的原因, 并为阻尼控制器的设计与检验提供依据, 是现有的小干扰稳定性分析方法中最成熟的方法。

传统的小干扰稳定性特征值分析大多采用 QR 算法, 一次求出全部特征值, 得到系统的所有模式。该方法不会漏掉负阻尼和弱阻尼模式, 但计算量大、计算速度慢, 当数学模型较复杂时, 该算法无法满足计算精度的要求。基于特征值分析法提出了部分特征值分析方法, 包括: 选择模式分析法^[9]、AESOPS^[10-11]、S 矩阵法^[12]、Rayleigh 商迭代法^[13]、

同时迭代法^[14]以及改进 Arnoldi 法^[14]等。这些方法只需要计算对稳定性判别有关键影响的部分特征值, 其计算精度和速度都可以满足大规模电网的小干扰稳定性分析的要求。

中国电力科学研究院从 1992 年起, 开展了电力系统小干扰稳定性仿真技术研究, 当时采用的算法是选择模式分析法, 由于计算规模受限和计算时间较长, 不能满足大型电力系统动态稳定仿真的需要。2004 年开发研制了新的电力系统小干扰稳定计算软件, 该软件采用 QR 算法和隐式重启动 Arnoldi 算法, 解决了老版本程序对模拟机组规模限制的问题。为满足我国特高压交直流电网安全分析的需要, 小干扰稳定性仿真技术还有如下关键技术有待进一步完善。

1) 特征值自动搜索算法。现有小干扰稳定性分析软件的特征值算法, 多采用扫频法进行连续的单点搜索, 不能对指定区域自动搜索; 另外, 不能自动判断搜索范围是否覆盖复平面上所有关心的区域, 自动分析功能较弱。

2) HVDC 线性化模型。特高压 ± 800 kV 直流系统有可能采用多个 12 脉动换流器串联和并联的组合形式, 现有的 HVDC 线性化模型能否适用于特高压直流系统仿真有待进一步研究。

3) 柔性交流输电 (flexible axial current transmission system, FACTS) 设备小干扰稳定仿真。随着 FACTS 设备的大量采用, 为充分发挥 FACTS 元件的阻尼控制特性, 在小干扰稳定仿真中准确模拟 FACTS 设备模型非常迫切。

4) 考虑分布式发电系统(风力发电、太阳能光伏发电等)的小干扰稳定计算。

5) 计算速度。现有小干扰稳定性分析软件计算速度较低, 不能完全满足在线预警的需求。提高计算速度, 是实现实时的小干扰稳定性分析的前提。

2 基于广域相量测量的小干扰稳定性分析

广域相量测量系统(wide area measurement system, WAMS)以相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)为基层单元采集信息, 经过通信系统上传至调度中心, 实现对系统的监测。

WAMS 的出现为抑制区域间的低频振荡提供了强有力的工具。通过 WAMS 可获取区域间的发电机相对转子角和转子角速度信号等全局信息, 作

为阻尼控制器的反馈信号构成闭环控制。将采用 WAMS 信号的区域间阻尼控制器附加到发电机励磁控制器中, 可抑制区域间振荡; 采用 WAMS 信号作为装设于联络线上的可控串联补偿装置(thyristor controlled series compensation, TCSC)的控制输入, 基于线性 H_{∞} 控制理论设计 TCSC 区域间阻尼控制器。采用 WAMS 信号作为控制器输入时, 需要引起重视的是 WAMS 信号的时滞问题。采用的 H_{∞} 控制是一种鲁棒控制方法, 对时滞有一定的抑制作用, 但时滞过大可能引起闭环系统的不稳定。可见, WAMS 能够在分析和抑制电力系统低频振荡方面发挥作用。

基于 WAMS 的小干扰稳定性分析过程为: 将系统状态空间方程离散化, 利用 WAMS 提供的测量值, 由最小二乘法计算状态空间方程的系数矩阵, 再采用现有小干扰稳定性分析软件判断系统是否稳定。与常规的离线分析相比, 由于采用实际数据, 基于 WAMS 的低频振荡分析具有更高的可信度。

3 全过程动态稳定性分析

电力系统动态过程包括 3 个阶段: 电磁暂态过程、机电暂态过程和中长期动态过程, 这 3 个过程是连续的。全过程动态仿真将这 3 个过程有机地统一起来, 能够描述系统受到扰动之后整个连续动态过程。全过程动态仿真需要考虑时间常数较大的模型对动态过程的影响, 以及更多的自动装置的动作, 例如, 暂态稳定不予考虑的锅炉、水轮机模型、自动发电控制、变压器分节头的自动调整等。因而, 全过程动态仿真包含模型的种类众多, 其方程的阶数高。

目前, 小干扰稳定程序的仿真都是基于潮流的稳态平衡点。然而, 电力系统的很多小干扰稳定性问题往往发生在系统经历了很多扰动之后的动态过程中。如果能够对扰动后的系统进行准确的频域小干扰稳定性分析, 则对稳定措施的选择具有重要的指导意义。

中国电力科学研究院开发的电力系统小干扰稳定性分析软件(PSD-SSAP)和全过程动态仿真软件(PSD-FDS)是紧密联系的, 二者的状态矩阵模块是相同, 因而, PSD-SSAP 程序可以提供系统变化过程中任何时刻的状态矩阵, 可以在时域仿真过程中的任何时刻点都能准确进行系统小干扰稳定性

频域分析。

4 特征值灵敏度

特征值灵敏度可应用于分析系统的小干扰稳定性、指导元件参数整定和调整运行方式等方面。特征值灵敏度通常分为3种。

1) 特征值对参数灵敏度。特征值对元件参数的灵敏度是进行电力系统小干扰稳定控制设计不可缺少的重要工具,主要用于控制系统的选址和参数设计^[15]。

2) 特征值对传递函数灵敏度。特征值对传递函数灵敏度也可用于电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)的选址和参数设计,进行电力系统的阻尼分析。由于特征值对传递函数灵敏度考虑的是传递函数变化对特征值的影响,因而它比特征值参数灵敏度更加清晰和准确^[16]。

3) 特征值对运行参数灵敏度。特征值对运行参数的灵敏度,是运行方式变化时特征值的变化,它对保证系统的稳定运行有重要的指导意义:①可以指导控制系统的选址,对于PSS或其它励磁控制器,求出需要镇定的振荡模式相对于每台发电机有功功率变化的灵敏度,选择灵敏度较大的机组安装励磁控制器;对于静止无功补偿器(static var compensator, SVC)等,通过计算振荡模式相对于节点注入无功功率变化的灵敏度,来指导设备的最佳安装位置;②对于电力系统运行部门,在安排运行方式或系统运行过程中,可以通过计算特征值相对于给定运行方式变化的灵敏度,了解和改善系统的小干扰稳定性,以避免调整运行方式的盲目性^[17]。

5 与在线动态安全分析预警系统的接口

近年来,世界各国电力系统都将建立电网动态安全稳定分析和控制系统作为重要的课题。北美8.14大停电后,美国和欧洲国家都加大了该领域研究开发的投入力度,尤其是对在线安全分析手段的开发和完善。我国电网已在国家电力调度中心、华北电网和华东电网等进行了在线动态安全评估和预警系统的研究和应用。

在线稳定性分析采用通用的离线稳定性分析工具,输入在线潮流数据和电网模型数据,基于并行计算平台的自动分析与应用计算,实现在线稳定的全面分析,并且根据分析结果,对电网状态进行预警,通过能量管理系统人机界面反映给运行人员。

动态安全评估是系统安全评估的重要方法之一。当发现系统稳定水平不足时,针对不同的稳定问题,即时启动相应的稳定决策支持模块,为调度员提供调整运行方式的辅助决策支持,全面保证系统的稳定运行。

现有的小干扰稳定性稳定评估方法根据在线监测数据,计算当前状态下的频域特征值和阻尼比等离线程序实现的功能,其不足之处有:1)不能给调度运行人员提供辅助决策信息;2)不能模拟系统日负荷变化过程中的阻尼变化。在系统负荷缓慢增加时,由于发电增加和重要枢纽节点电压的下降,在电网结构薄弱处,容易发生低频振荡。所以,在系统负荷变化之前,准确模拟出系统的小干扰稳定性,并提出相应的辅助决策,具有重要的实际意义。

6 并行计算技术

对于实时仿真系统和在线动态安全分析预警系统,如果采用传统的串行计算方法,则其计算速度将无法达到仿真的快速性要求。高效的并行计算技术,是小干扰稳定仿真技术应用于实时仿真和在线动态分析系统的关键。

利用图论分割算法,将矩阵变换为对角块加边网络模型(block-bordered diagonal form, BBDF)形式,是应用最多的线性方程组并行求解的方法。适合小干扰稳定仿真的图论分割算法目前还不成熟,利用多核心CPU提高运算速度,是图论分割算法的研究方向。

随着分布式处理技术与并行计算技术的不断发展和成熟,采用分布式的并行计算解决方案为电力系统提供服务成为可能。特别是网格计算技术的出现,为开展电力系统分布式并行计算提供了现实的实现技术。网格计算能将分布的计算资源有效地组织起来协同工作,形成集成的计算资源环境。基于网格计算的平台体系可以联合分布计算和集中超级计算的优势^[18-19]。

7 结论

随着特高压交直流电网的建设、大型电网的互联和西电远距离东送,系统的机电振荡模式将发生很大变化。如果不充分研究小干扰导致的低频功率振荡问题,及大干扰后的欠阻尼振荡问题,特高压交直流电网的低频振荡问题会非常突出。因此,开

发适合实际电力系统的小干扰稳定性分析工具, 开展在线小干扰稳定性评估, 对不断发展变化的电力系统进一步开展小干扰稳定研究是十分迫切的。

参考文献

- [1] 舒印彪. 我国特高压输电的发展与实施[J]. 中国电力, 2005, 38(11): 1-8.
Shu Yinbiao. Development and execution of UHV power transmission in China[J]. Electric Power, 2005, 38(11): 1-8(in Chinese).
- [2] 张运洲, 吕健. 我国未来同步电网的战略构想[J]. 中国电力, 2006, 39(3): 5-7.
Zhang Yunzhou, Lü Jian. Strategic conception of future synchronous power network in China[J]. Electric Power, 2006, 39(3): 5-7(in Chinese).
- [3] 张晋华, 刘云, 印永华, 等. 特高压交直流电网仿真技术研究[J]. 电网技术, 2007, 31(23): 1-5.
Zhang Jinhua, Liu Yun, Yin Yonghua, et al. Real-time simulation technology for UHV power grid[J]. Power System Technology, 2007, 31(23): 1-5(in Chinese).
- [4] 杜正春, 刘伟, 方万良, 等. 小干扰稳定性分析中按阻尼比递增的关键特征值子集计算[J]. 电网技术, 2006, 30(3): 7-12.
Du Zhengchun, Liu Wei, Fang Wanliang, et al. Calculation of critical eigenvalues with increasing damping ratios in small signal stability analysis[J]. Power System Technology, 2006, 30(3): 7-12(in Chinese).
- [5] 樊爱军, 雷宪章, 刘红超, 等. 研究大规模互联电网区域间振荡的特征值分析方法[J]. 电网技术, 2005, 29(17): 35-39.
Fan Aijun, Lei Xianzhang, Liu Gongchao, et al. Eigenvalue analysis methods for inter-area oscillations in large-scale interconnected power systems[J]. Power System Technology, 2005, 29(17): 35-39(in Chinese).
- [6] 李杨楠, 刘文颖, 潘炜, 等. 西北 750kV 电网动态稳定特性分析和控制策略[J]. 电网技术, 2007, 31(12): 63-68.
Li Yangnan, Liu Wenying, Pan Wei, et al. Analysis of dynamic stability characteristics of 750 kV northwest China power grid and research on its control strategy[J]. Power System Technology, 2007, 31(12): 63-68(in Chinese).
- [7] 汤宏, 吴俊玲, 周双喜. 包含风电场电力系统的小干扰稳定分析建模和仿真[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 38-41.
Tang Hong, Wu Junling, Zhou Shuangxi. Modeling and simulation for small signal stability analysis of power system containing wind farm[J]. Power System Technology, 2004, 28(1): 38-41(in Chinese).
- [8] 仲悟之. 大型电力系统小干扰稳定性分析方法研究和软件开发[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
- [9] Perez-Arriaga I J, Verghese G C, Schweppe F C. Selective modal analysis with application to electric power systems[J]. IEEE Transactions on PAS, 1982, 101(9): 3117-3134.
- [10] Byerly R T, Bennon R J, Sherman D E. Eigenvalue analysis of synchronizing power flow oscillations in large electric power systems[J]. IEEE Transaction on PAS, 1982, 101(1): 235-243.
- [11] SAUER P W, Rajagopalan C, Pai M P. An explanation and generalization of the AESOPS and peels algorithms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 6(1): 293-299.
- [12] Naoyuki U C, Nagao T. A new eigen-analysis method of steady-state stability studies for large power systems: S matrix method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(2): 706-714.
- [13] Angelidis G, Semlyen A. Improved methodologies for the calculation of critical eigenvalues in small signal stability analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(3): 1209-1217.
- [14] Wang L, Semlyen A. Applications of sparse eigenvalue techniques to the small signal stability analysis of large power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(2): 635-642.
- [15] Van Ness J E, Boyle J M, Imad F P. Sensitivities of large multiple-loop control systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1965, 10(7): 308-315.
- [16] Zhou E Z. Functional sensitivity concept and its application to power system damping analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(1): 518-524.
- [17] 刘晓鹏. 电力系统小干扰稳定性分析方法的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 1999.
- [18] 黄琦, 秦开宇, 汪文勇. 基于网格计算技术的电力系统分布式并行计算: 底层平台设计与实现[J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(27): 174-177.
Huang Qi, Qin Kaiyu, Wang Wenyong. Design and implementation of the infrastructure of power system distributed parallel computing based on grid computing[J]. Computer Engineering and Applications, 2006, 42(27): 174-177(in Chinese).
- [19] 肖连兵, 黄林鹏. 网格计算综述[J]. 计算机工程, 2002, 28(3): 1-4.
Xiao Lianbing, Huang Linpeng. Technology of grid computing [J]. Computer Engineering, 2002, 28(3): 1-4(in Chinese).



仲悟之

收稿日期: 2009-08-12。

作者简介:

仲悟之(1979—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统仿真与分析, E-mail: zhongwz@epri.sgcc.com.cn;

宋新立(1971—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统仿真与分析;

汤涌(1959—), 男, 博士, 教授级高级工程师,

研究方向为电力系统仿真与分析;

卜广全(1962—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统仿真与分析;

吴国响(1974—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统仿真与分析;

刘涛(1984—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统仿真与分析。

(编辑 蒋毅恒)