

低频振荡研究现状与展望

陈佳佳¹, 邵能灵²

(1. 广东省电力设计研究院, 广州 510663; 2. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 低频振荡现象是目前电力系统研究关注的热点之一。文章从机理解释、分析方法和抑制措施三方面综述了近年来该领域取得的突破与进展, 并指出应对一些用弱阻尼机理无法解释的振荡现象, 特别是“超低频振荡”现象给予足够的重视。

关键词: 低频振荡; 机理; 分析方法; 抑制措施

Status quo and Perspective of Low-Frequency Oscillation Research

CHEN Jiajia¹, TAI Nengling²

(1. Guangdong Electric Power Design Institute, Guangzhou 510663, China;

2. College of Electric Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The research on low-frequency oscillation phenomena of the power system is one of the hotspots currently. This paper overviews the breakout and evolution of the research over the mechanism explanation, analysis method and control measure of the phenomena, pointing out that attention enough should be paid to some phenomena, especially that of super low-frequency oscillation, which is unable to be explained with the underdamping theory.

Key words: low-frequency oscillation; mechanism; analysis method; control measure

低频振荡是电力系统的固有现象。随着电网互联规模的扩大, 高放大倍数快速励磁的广泛采用, 以及受经济性、环保等因素影响下电网的运行越来越接近稳定极限, 在实际电网中低频振荡发生的概率增加, 低频振荡问题引起了更为广泛的关注。按振荡涉及的范围和振荡频率的大小, 低频振荡通常分为两类^[1, 2-3]: 局部振荡模式和互联振荡模式。在近年的报道中出现了一些过去鲜见的异常动态行为, 如频率低于 0.1 Hz 的超低频振荡, 及由于联络线功率振荡远大于预想结果而导致全网阻尼下降的情况^[4-5]。

本文针对低频振荡研究的机理解释、分析方法和控制措施三个方面取得的新进展, 介绍了低频振荡研究现状与发展, 并提出了未来工作的方向。

1 低频振荡的产生机理

迄今为止, 对于低频振荡的诱因尚无确切定论,

最为广泛接受的是欠阻尼机理。然而, 该机理仍无法解释系统出现的各种异常动态行为。为此, 近年来强迫振荡机理和谐振机理等其他机理解释重新成为了人们讨论的热点:

1) 模态谐振机理

电力系统的线性和模态随参数的变化而变化, 当两个或多个阻尼振荡模态变化至接近或者相同的状态, 由于相互影响导致一个状态变得不稳定。若此时系统的线性化模型是非对角化的, 就称之为强谐振状态; 反之, 为弱谐振状态。

文献[6]对振荡模式之间的相互作用进行了深入研究, 系统地提出了强共振导致系统振荡失稳的机理: 当系统接近或者出现强谐振状态时, 特征根将迅速移动, 变化接近 90°, 对于频率接近的特征根在强谐振后, 阻尼很快变得不同, 其中一对特征根的阻尼将迅速减小。该机理通过对 3 节点和 9 节点的小系统进行数学分析得以验证。文献[7]在对南方电网直流调制器进行设计的过程中, 发现了由于控制参数设计不当而引发的谐振现象, 首次在复杂的实际电力系统中验证了这一机理, 是该机理在实

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50577042)。

Foundation item: Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50577042).

际大系统中应用的一大突破。

2) 共振(强迫振荡)机理

电力系统强迫振荡的理论指出:持续的周期性小扰动会引起系统的强迫振荡,当扰动频率接近系统固有频率时,会引起频率谐振,导致大幅度的强迫功率振荡。

文献[5]对2005年9月1日内蒙古电网发生的3次相对华北主网的振荡采用在电网不同地点施加周期性冲击负荷的方法计算电网的动态响应,分析线路的功率摇摆情况,通过将仿真结果与实际测量数据的比对得出了万家寨电厂出力增加,阻尼恶化,从而引发了全网性振荡的结论。文献[8]则基于汽轮机压力脉动引发电力系统低频振荡的共振机理,分析汽轮机压力脉动的产生原因,介绍压力脉动类型和特征。研究表明,汽轮机压力脉动的类型复杂,频率成分丰富,其中复杂压力脉动如果含有与电力系统固有频率一致的脉动分量时,会引发电力系统共振机理的低频振荡,而准周期压力脉动和冲击性压力脉动由于其幅值的快速变化,并未引发共振。在研究共振机理时,准确地找出实际的扰动源是揭示其本质的关键。文献[9]作了初步的探索,根据汽轮机功率扰动引起电力系统低频振荡的共振机理,研究了汽轮机功率变化的原因。应用MATLAB建立了火力发电厂动力系统和电力系统相互作用的机网耦合模型。仿真分析表明,调节汽门扰动频率与电力系统自然振荡频率一致或接近时,均可能引起电力系统发生共振机理的低频振荡。由于锅炉具有很大的惯性,锅炉燃烧率扰动很难引起电力系统发生共振机理的低频振荡。

2 低频振荡的分析方法

长期以来,低频振荡的分析多归于小干扰稳定问题。在这个时期,低频振荡的模式是与大干扰的非线性作用无关的。模态级数法引入使得低频振荡的分析进一步延拓到了大干扰分析的范畴。由于良好的工程实用性,信号分析法尤其是Prony算法在近年来得到了迅猛的发展和广泛的应用,取得了一系列可喜的成果。

1) 模态级数法

模态级数法属于非线性动态理论分析方法,它在电力系统中的应用是崭新的,可用来表示非线性响应和获得非线性系统零输入响应的近似闭式解表

达式,而不需要非线性变换^[10]。此法能够提供比正则技术更准确的非线性近似,因为二次模态近似比二次正则近似可捕获更多的非线性作用。文献[11-12]将模态级数法应用于交直流互联电力系统的模式非线性相关分析。文献[13]用模态级数法分析了电力系统的模态谐振,并推导了系统谐振时非线性相关因子。

2) 信号分析法

信号分析法是将实测信号视为某些频率固定、幅值按指数规律变化的正弦信号(振荡模式)的线性组合,从而将方法归纳为对各频率(模态)与阻尼系数的识别。电力系统中应用最广的是Prony分析法。

影响Prony分析精度的有三大要素:噪声的抑制;信号的选取;模型阶数的确定。文献[14-15]则采用隔直,加设滤波器等方式消除信号中的高频噪声。文献[16]对Prony方法应用于电力系统低频振荡的有效性进行了研究,讨论了信号噪声、信号的非平稳性对Prony方法的影响,并提出了相应的改进策略,如通过计算均方差(MSE)结果确定算法的阶数、将分析数据窗分成更小的窗口等,并用低频振荡的仿真数据和实测数据验证了Prony方法的有效性。文献[14]提出了一种基于WAMS和改进Prony算法的电力系统低频振荡模式的分析方法,并采用二阶矩样本矩阵的奇异值分布特征来估计系统的实际阶数,并指出信号子空间对应的奇异值远大于噪声空间对应的奇异值。文献[15]构建了基于WAMS的在线低频振荡分析框架,并根据自回归模型的行列式比来估计系统的实际阶数。

另外,Prony法经过补充和扩展,在电力系统的传递函数辨识方面也取得了突破。文献[17]提出迭代Prony算法进行传递函数的辨识,该法不仅能辨识系统的降阶模型,而且能估计系统的初始状态。文献[18]将Prony方法和留数法相结合设计电力系统稳定器(PSS)的参数。文献[19]以Prony方法为基础,用单纯形法对PSS参数进行优化设计,设计出的PSS具有较好的有效性和鲁棒性。文献[20]则发展了一种用Prony算法辨识互联电力系统等值线性模型的方法,将其用于天广交直流并联输电系统低频功率振荡的研究,并设计出用于抑制区域间功率振荡的直流阻尼控制。

希尔伯特-黄变换(HHT)法是继Prony算法之

后在电力系统实测数据分析中新兴的一种算法。该方法的优点在于能够对非线性、非平稳信号进行分析。该方法由经验模态分解 (EMD) 及 Hilbert 变换 (HT) 两部分组成, 其核心部分是 EMD 分解, 先通过 EMD 对非线性、非平稳的数据进行线性和平稳化处理, 得到固有模态函数 (IMF) 分量, 然后再对各分量进行 Hilbert 变换, 得到瞬时频率及瞬时振幅, 进而可得到信号的 Hilbert 谱和 Hilbert 边界谱, 以实现时频分析[21-23]。文献[22]将 HHT 算法用于电力系统低频振荡分析, 并比较其与小波脊算法的结果, 指出 HHT 算法具有高分辨率和短数据处理能力, 并能细腻地刻画各模式间的非线性作用等优点。文献[23]研究了基于 HHT 法从广域测量系统的实测数据中提取电力系统时变振荡特性的一种实用方法, 并在贵州电网的初步实验结果证明了该方法的有效性。该算法在电力系统中的应用仍处于研究的初级阶段, 需要更多有力的结论证明其有效性与实用性。

3 低频振荡的抑制措施

随着技术的不断进步, 广域测量 (WAMS) 系统的不断发展, 低频振荡的抑制方式不再局限于传统的局部测量信号和固定参数的控制器, 广域控制、自适应控制、智能控制等一列新的控制方法的引入大大改善了系统的性能。

1) 电力系统稳定器 (PSS)

PSS 是目前世界上使用最为广泛、最经济而且较成熟的发电机励磁附加控制技术。

传统的 PSS 多采用相位补偿法和根轨迹法等线性控制系统的经典控制方法进行参数的整定。近年来, 随着控制系统设计方法的不断完善和发展, PSS 的设计方法突破了传统的局限, 向多元化的方向发展。各种优化算法, 遗传算法^[24]和禁忌搜索算法^[25]等被引入到多机 PSS 系统的协调整定中, 从整体上提高了 PSS 的控制性能。鲁棒控制方法也成为 PSS 设计方法中的一大亮点。文献[26]则引入了同伦参数法为多机系统设计分散鲁棒的低阶 PSS。文献[27]采用无模型法辨识输入输出数据得到电力系统模型, 在该模型基础上采用线性二次型高斯 (LQG) 调节方法设计 PSS, 所得的闭环系统在多种运行参数下均具有良好的鲁棒性, 且有较好的故障恢复能力。为了适应实时变化和难以预测的系统动态, 自

适应 PSS 也成为另一大发展趋势。文献[28]采用改进的二次型性能指标计算简单自适应控制的适应律, 并设计了新型的电力系统稳定器。该稳定器具有良好的动态品质和调节精度, 能提高电力系统的动态稳定性、抑制低频振荡。文献[29]采用改进的自适应广义预测控制 (GPC) 算法设计 PSS, 设计采用快速算法, 避免了矩阵求逆运算, 从而节省了计算量。

2) FACTS

FACTS 技术是基于电力电子技术改造交流输电的系列技术, 它对交流电的无功(电压)、电抗和相角可以进行控制, 从而能有效提高交流系统的安全稳定性, 使传统的交流输电系统具有更高的柔性和灵活性, 使输电线路得到充分利用, 以满足电力系统安全、可靠和经济运行的目标。

FACTS 设备安装地点和反馈信号的选择是影响其控制效果的关键因素, 众多学者在这两方面做出了不懈的努力。文献[30]采用混合整数规划的方法来优化 TCSC 的安装地点和确定装置的最初补偿水平。优化过程基于改进的潮流方程和二元连续乘积的线性化结果, 并在满足负载能力和电压质量要求的约束下使投入成本最低。文献[31]引入暂态能量函数的思想, 通过评估 SVC 提供的附加关键能量支撑效果来选择安装地点, 以此达到改善系统第一摆稳定极限的目的。

3) 直流调制

直流调制的原理是在已有的直流输电控制系统中加入附加的直流调制器, 从两端交流系统中提取反映系统异常(如大幅度的功率突变、大的频率改变等)的信号, 来调节直流输电线路传输的功率, 使之快速吸收或补偿其所联交流系统中的功率过剩或缺额, 起到紧急支援和阻尼振荡的作用。

文献[32]研究了直流调制对南方电网交直流混联输电系统暂态稳定裕度的影响, 研究结果对实际电网运行中直流调制措施的制定具有一定的参考价值。文献[33]通过分析南方电网的区域功率振荡模式以及对采用不同直流调制方式的系统进行时域仿真, 设计了可以有效抑制南方电网内区域功率振荡的直流调制控制器, 并将其应用于贵广直流工程中, 从而提高了南方电网交直流并联系统运行的稳定性。随着 WAMS 的不断发展和逐步成熟, 基于广域测量信号的调制措施成为研究的新热点。文献[34]

提出模式可观惯量中心(OCOI)的概念,用于分析和筛选多区域互联电网的广域信号,并以等效的OCOI转速差作为直流调制的新信号。在南方电网的仿真测试表明,新信号可以很好地反映区间功角摇摆。所提出的广域直流调制策略物理意义明确,对区间振荡的抑制效果优于传统的直流阻尼调制方法。

4) 广域阻尼控制(WADC)

近年来,随着以PMU为基本单元的WAMS的不断完善与发展,使得以远方信号作为反馈信号的WADC系统的实现成为可能。WADC系统在设计时考虑了全局的因素,具有良好的动态性能,弥补了以本地信号作为反馈信号的传统控制器(主要是PSS)协调能力较差,对于区间低频振荡难以充分发挥阻尼控制作用的缺陷。WADC系统主要包括远方反馈控制、多回路PSS及使用全局信号的FACTS等几种控制方法^[35-36]。

4 低频振荡研究的展望

至今,低频振荡研究已取得了丰硕的成果,然而,新发展总是伴随着新问题的出现,以下几个方面是今后研究可以参考的方向:

1) 机理研究应符合我国的实际电力系统情况,这样才能揭示引发低频振荡现象的真正原因。谐振机理与实际系统的结合尚在初始阶段,未来可探讨出了控制参数外还有哪些实际参数可能引发谐振现象。共振机理的研究范畴里,找寻可能存在的振源和准确辨别其所在位置是目前迫切需要解决的问题。

2) 发展可实时在线分析低频振荡的方法,并与SCADA和EMS互联,使全网状态处于运行人员的持续监控和掌握中,便于正确的紧急控制手段的制定。

3) 逐一解决新型控制方式在应用中所面临的实际问题,考虑切实可行的协调措施,解决广域阻尼控制系统的时滞问题。

5 结语

本文从机理、分析方法和抑制措施三方面介绍了低频振荡研究的现状和近年来所取得的进展,总结了现今研究中存在的问题,并提出了未来该领域发展的方向。在振荡机理的研究中,一些用欠阻尼

机理无法解释的振荡现象,特别是“超低频振荡”现象应引起研究人员足够的重视。在低频振荡实时监控系统的研发过程中,应考虑系统的各种非线性特性,将基于动态模型的非线性分析法的分析结果与在线信号分析法相结合。低频振荡的分析方法与控制措施应向实时、在线、智能化发展。

参考文献:

- [1] KUNDUR P. Power System Stability and Control [M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1994.
- [2] ROGERS G. Power System Oscillations [M]. USA: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [3] 王锡凡,方万良,杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [4] 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.
- [5] 李丹,苏为民,张晶,等. “9·1”内蒙古西部电网振荡的仿真研究[J]. 电网技术, 2006, 30(6): 41-47.
LI Dan, SU Weimin, ZHANG Jing, et al. Simulation Study on West Inner Mongolia Power Grid Oscillations Occurred on September 1st, 2005 [J]. Power System Technology, 2006, 30(6): 41-47.
- [6] DOBSON I, ZHANG J F, GREENE S, et al. Is Strong Modal Resonance a Precursor to Power System Oscillation [J]. IEEE Trans. Circ. & Sys., 2001, 48(3): 340-349.
- [7] 李鹏,吴小辰,张尧,等. 南方电网多直流调制控制的交互影响与协调[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(21): 90-93.
LI Peng, WU Xiaochen, ZHANG Yao, et al. Interaction and Coordination of Modulation Controllers of Multi-infeed HVDC in CSG, 2007, 31(21): 90-93.
- [8] 韩志勇,贺仁睦,徐衍会. 汽轮机压力脉动引发电力系统低频振荡的共振机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 47-51.
HAN Zhiyong, HE Renmu, XU Yanhui. Study on Resonance Mechanism of Power System Low Frequency Oscillation Induced by Turbo-pressure Pulsation [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2008, 28(1): 47-51.
- [9] 徐衍会,贺仁睦,韩志勇. 电力系统共振机理低频振荡扰动源分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(17): 83-87.
XU Yanhui, HE Renmu, HAN Zhiyong. The Cause Analysis of Turbine Power Disturbance Inducing Power System Low Frequency Oscillation of Resonance Mechanism [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2007, 27(17): 83-87.
- [10] PARIZ N, SHANECHI H M. Explaining and Validating Stressed Power System Behavior Using Modal Series [J]. IEEE Trans on PWRs, 2003, 18(2): 778-785.
- [11] 刘红超. 交/直流互联电力系统的非线性模态分析和柔性协调控制 [D]. 成都: 四川大学, 2004.
- [12] 郑云海,李兴源. 基于模态级数法的交直流系统的非线性模式交互作用分析[J]. 电工电能新技术, 2005, 24(3): 45-48.
ZHENG Yunhai LI Xingyuan. Analysis of Nonlinear Modal Interactions in HVDC/AC Power System Using Modal Series Method [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2005, 24(3): 45-48.
- [13] 邓集祥,许自然. 应用模态级数方法分析电力系统模态谐振[J]. 现

- 代电力, 2006, 23 (3): 11-15.
- [14] 肖晋宇, 谢小容, 胡志祥, 等. 电力系统低频振荡在线辨识的改进 Prony 算法 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(7): 883-887. XIAO Jinyu, XIE Xiaorong, HU Zhixiang, et al. Improved Prony Method for Online Identification of Low-Frequency Oscillations in Power Systems [J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2004, 44 (7): 883-887.
- [15] 鞠平, 谢欢, 孟远景, 等. 基于广域测量信息在线辨识低频振荡 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (22): 56-60. JU Ping, XIE Huan, MENG Yuanjin, et al. Online Identification of Low-Frequency Oscillations Based on Wide-Area Measurements [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2005, 25 (22): 56-60.
- [16] 王铁强, 贺仁睦, 徐东杰, 王昕伟. Prony 算法分析低频振荡的有效性研究 [J]. 中国电力, 2001, 11 (34): 38-41. WANG Tieqiang, HE Renmu, XU Dongjie, WANG Xinwei. The Validity Study of Prony Analysis for Low Frequency Oscillation in Power System [J]. Electric Power, 2001, 11 (34): 38-41.
- [17] 徐东杰, 贺仁睦, 高海龙. 基于迭代 Prony 算法的传递函数辨识 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (6): 40-43. XU Dongjie, HE Renmu, GAO Hailong. Transfer Function Identification Using Iterative Prony Method [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2004, 24 (6): 40-43.
- [18] 卢晶晶, 郭剑, 田芳, 吴中习. 基于 Prony 方法的电力系统振荡模式分析及 PSS 参数设计 [J]. 电网技术, 2004, 28 (15): 31-34. LU Jingjing, GUO Jian, TIAN Fang, WU Zhongxi. Power System Oscillation Mode Analysis and Parameter Determination of PSS Based on Prony Method [J]. Power System Technology, 2004, 28(15): 31-34.
- [19] 管秀鹏, 程林, 孙元章, 等. 基于 Prony 方法的大型互联网 PSS 参数优化设计 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (12): 7-11. GUAN Xiupeng, CHENG Lin, SUN Yuanzhang, et al. PSS Parameter Optimization on Large-scale Interconnection Power Grid Based on Prony Method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (12): 7-11.
- [20] 刘红超, 李兴源. 基于 PRONY 辨识的交直流并联输电系统直流阻尼控制的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (7): 54-57. LIU Hongchao, LI Xingyuan. Study of DC Damping Control in Ac/Dc Transmission Systems Based on Prony Method [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2002, 22 (7): 54-57.
- [21] MESSINA A R, VITTAL V. Nonlinear Non-Stationary Analysis of Interarea Oscillations via Hilbert Spectral Analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21 (3): 1234-1241.
- [22] 李天云, 高磊, 赵妍. 基于 HHT 的电力系统低频振荡分析 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (14): 24-30. LI Tianyun, GAO Lei, ZHAO Yan. Analysis of Low Frequency Oscillations Using HHT Method [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2006, 26 (14): 24-30.
- [23] 韩松, 何利铨, 孙斌, 等. 基于希尔伯特-黄变换的电力系统低频振荡的非线性非平稳分析及其应用 [J]. 电网技术, 2008, 32 (4): 56-60. HAN Song, HE Liqian, SUN Bin, et al. Hilbert-Huang Transform Based Nonlinear and Non-Stationary Analysis of Power System Low Frequency Oscillation and Its Application [J]. Power System Technology, 2008, 32 (4): 56-60.
- [24] ABDEL-MAGID Y L, ABIDO M A. Optimal Multiobjective Design of Robust Power System Stabilizers Using Genetic Algorithms [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2003, 18 (3): 1125-1132.
- [25] ABDEL-MAGID Y L, Y L Abdel-Magid. Robust Design of Power System Stabilizers Using Tabo Search Algorithm [J]. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, 2000, 147 (6): 387-394.
- [26] RAMOS R A, MARTINS C P, BRETAS N G. An Improved Methodology for The Design of Power System Damping Controllers [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2005, 20 (4): 1938-1945.
- [27] KO H S, LEE K Y, KIM H C. An Intelligent Based LQR Controller Design to Power System Stabilization [J]. Electric Power Systems Research, 2004, 71: 1-9.
- [28] 张少如, 吴爱国. 基于简单自适应控制的电力系统稳定器 [J]. 电工技术学报, 2006, 21 (9): 62-66.
- [29] 朱海貌, 刘天琪, 李兴源. 基于改进广义预测控制的电力系统稳定器 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (2): 6-7. ZHU Haimao, LIU Tianqi, LI Xingyuan. Power System Stabilizer Based on Improved Generalized Predictive Control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (2): 6-7.
- [30] YANG G Y, HOVLAND G, MAJUMDER R, et al. TCSC Allocation Based on Line Flow Based Equations Via Mixed-Integer Programming [J]. IEEE Transactions on Power systems, 2007, 22(4): 2262-2268.
- [31] HAQUE M H. Best location of SVC to Improve First Swing Stability Limit of a Power System [J]. Electric Power Systems Research, 2007, 77: 1402-1409.
- [32] 束洪春, 董俊, 孙士云, 等. 直流调制对南方电网交直流混联输电系统暂态稳定裕度的影响 [J]. 电网技术, 2006, 30(20): 29-33.
- [33] CHANG Y, ZHENG X, CHENG G H, et al. Coordinate damping control of HVDC and SVC based on wide area signal [C]// Proceedings of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Jun. 2006: 1-7.
- [34] 毛晓明, 张尧, 管霖. 基于广域测量信息的直流调制新方法 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (7): 45-49. MAO Xiaoming, ZHANG Yao, GUAN Lin. A Novel WAMS Based HVDC Modulation Method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (7): 45-49.
- [35] CHAUDHURI B, PAL B C. Robust Damping of Multiple Swing Modes Employing Global Stabilizing Signals with a TCSC [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19 (1): 49-506.
- [36] 石颀, 王成山. 考虑广域信息时延影响的 H_{∞} 阻尼控制器 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (1): 30-34. SHI Jie, WANG Chengshan. Design of H_{∞} Controller for Damping Interarea Oscillations With Consideration of the Delay of Remote Signal [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2008, 28 (1): 30-34.

收稿日期: 2009-06-17

作者简介:

陈佳佳 (1983), 女, 江苏人, 硕士, 主要从事电厂二次部分的设计工作 (e-mail) s_h_cjj@163.com;

邵能灵 (1972), 男, 江苏人, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为电力系统继电保护及电站综合自动化技术、电力市场。