

我国智能电网背景下的低频振荡应对研究综述

石辉, 张勇军, 徐涛

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 为应对我国特高压智能电网的低频振荡问题, 综述了该领域的最新研究成果。分析了我国智能电网的特点及其与低频振荡的关系, 展示了近年来特征值法、频域法等振荡分析方法及 PSS、FACTS 等控制技术的机理、工作特点及研究进展, 评价了各自对我国智能电网的贡献。提出一种适用于我国智能电网实际的低频振荡在线监控初步构想, 并指出了当前需解决的核心问题。

关键词: 低频振荡; 智能电网; 特高压; 稳定性; 综述

Survey of response to LFO under the background of China smart grid

SHI Hui, ZHANG Yong-jun, XU Tao

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In response to the LFO issue of China's UHV smart grid, the latest research results of the field are summarized. Firstly, features of China smart grid (CSG) and its relations with LFO are analyzed. The mechanism, work characteristics and research progress of characteristic value analyzing, frequency-domain analyzing, together with control technologies such as PSS and FACTS, are summarized. Furthermore, the contribution of those methods and technologies to CSG is evaluated. On this basis, a preliminary on-line monitoring idea of low-frequency oscillations in CSG is proposed, and the core issues needed to be solved at present are put forward too.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50337010).

Key words: low frequency oscillation; smart grid; UHV; stability; survey

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)24-0242-06

0 引言

近年来, 随着全球能源局势日益紧张, 欧美各国陆续启动了以建设智能电网为核心的能源技术革命。我国电力行业结合自身特点, 也提出了建设以特高压电网为骨干网架, 最终形成全国联网的统一坚强智能电网的构想。全国联网一方面是能源战略转移的需要, 另一方面能提高电网运行的可靠性和资源利用的经济性, 但同时也会带来新的安全隐患, 大电网低频振荡问题便是其中之一。低频振荡具有突发性和瞬时性, 电网规模越大, 振荡往往越剧烈越复杂, 波及面越广, 振荡控制代价和电网事故风险也越高。

自特高压工程立项以来, 国内学者曾就特高压全国联网的安全性展开论证^[1-3]。已有的事故案例也

证明, 跨区长链型同步电网极易出现低频振荡。由此工程目标确定为建设“三华”特高压同步大电网, 最终形成全国四大区域电网直流异步互联的格局。区域电网互联, 特别是“三华”电网形成后, 各区域电网原本协调的控制策略将不再协调, 控制效果将大打折扣甚至出现反作用。与此同时, 某些设备故障或技术缺陷难以预料, 一旦系统振荡出现将波及更大范围, 甚至导致系统解列直至全网崩溃。因此, 解决好低频振荡问题是我国构建统一坚强智能电网进程中不可避免的重要一环。

在我国智能电网背景下, 特高压、交直流混合、跨区输电等将进一步提高低频振荡控制的难度。但与此同时, 随着智能电网信息化、数字化、自动化、互动化的不断进展, 也将涌现出一些有利于解决大电网低频振荡问题的新方法和手段。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (50337010)

1 分析方法的研究进展

1.1 特征值分析法

全部特征值法一般采用 QR 算法,该算法受制于系统规模,计算量大、计算速度慢、占内存多,容易产生“维数灾”,无法用于大电网计算。对该算法的改进,一种做法是,在原来 QR 算法基础上,利用分解算法或稀疏技术对全部特征值进行并行计算,降低计算阶数,提高计算速度。文献[4]介绍了一种稀疏存储技术,结合符号因子化和稀疏向量技术提出一种 LDL^T 分解算法,显著提高了计算效率。采用基于稀疏技术的 QR 算法,文献[5]提出系统振荡模式与状态变量之间参与度的计算理论,用于识别互联电网振荡模式和最优的控制安装点。

另一种做法是,寻找 QR 算法的替代算法。文献[6]针对 QR 算法对高阶大系统难以保证求解精度或收敛性,容易形成维数灾的缺陷,提出一种 BR 算法,可减少 30%~70% 的计算时间及近 50% 的存储量。文献[7]联合 QR 算法与 Prony 算法,利用各自优点分别进行计算和分析环节,适用于分析大电网低频振荡。

部分特征值法主要有选择模式法(SMA法)、自激法、分数变化法、S 矩阵法、Arnoldi 法等。这些方法通常能保证较高的计算精度和速度,可适用于大规模电力系统,缺点是计算结果受搜索初值和范围的影响,存在漏根的可能性。文献[8]在选择特征根算法中引入 Prony 分析,能保证特征值计算的可靠收敛,同时对系统规模无限制,但须以计算时间为代价阻止漏根。文献[9]利用复模态分析和复转矩系数法,能快速估算出机电模式特征根。文献[10]提出以轨迹特征根反映系统非线性对低频振荡特性的影响,以轨迹特征根对各机组机械阻尼系数的灵敏度来反映各机组的参与因子,发现减小联络线功率具有负阻尼效应,从而指导机组出力以抑制低频振荡。

1.2 时域仿真法

时域仿真法计及系统的非线性特性,且不受系统规模限制,但缺点明显,首先其扰动人为设定,不能保证激发所有的关键模式,其次仿真时间长,计算量大,观察量不易分析,难以揭示振荡的起因,故一般将此方法与其他方法综合使用。目前专门针对低频振荡时域分析法的研究比较少,而对时域仿真的改进主要集中在算法和变量处理的层面。文献[11]首次将 Ibrahim 时域法(惯称 IFD 法)用于低频振荡分析,并加以改进。它根据扰动后电力系统指定观测量的自由响应数据识别系统机电模式特征

值,所能识别的振荡频率和阻尼比准确度很高,识别速度快,也不存在遗漏模式的现象,应用前景广阔。文献[12]引入区间数描述模型参数的不确定性,只需一次仿真计算,就可以严格分析单个或多个模型参数的不确定性对仿真结果的影响,最大的优点是节省机时。文献[13]根据计算奇异扰动(CSP)理论,提出将系统状态变量运行模式分为快动态和慢动态,在数值积分的过程中逐步忽略耗尽的快动态,将系统刚性方程变为非刚性方程,并增大仿真步长,从而极大提高了求解效率。

1.3 频域分析法

频域分析法往往与在线监测系统结合使用,将实测型号视为某些频率固定、幅值按指数规律变化的正弦信号的线性组合,通常使用 Prony 算法、傅里叶算法、快速傅里叶算法、Z 变换法、小波分析法等^[14]。目前 Prony 算法应用较多,主要缺点是不能反映动态过程的非平稳性,且辨识结果对噪声敏感;傅里叶算法具有良好的信噪鲁棒性,但不能反映系统阻尼特性和频率变化特性;快速傅里叶算法可以处理非平衡信号,但不能自动调整时频窗口;小波分析法也适用于分析非平稳信号,并能自适应调节时频窗口和消除噪声,是目前极具潜力的研究算法。近几年国内对频域分析法的研究相对薄弱,主要的理论、技术突破大多与 Prony 算法相关。文献[7-8,15]将特征值法与 Prony 算法结合使用,即代表了一种发展趋势。文献[14]将数字滤波器法、离散傅里叶变换和 Prony 分析法综合,用于低频振荡监测。文献[16]描述了实时 PMU 数据平台下对系统振荡进行 Prony 在线辨识和分析的实例,表明 Prony 法对实现低频振荡预警和在线控制的意义。

1.4 模态级数法

模态级数法是非线性动态理论中的另一种分析方法,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,以及精确描述高阶非线性的大型互联电网。该分析方法在电力系统中的应用时间不长,但具有良好的发展前景。文献[17]通过对比验证了 2 阶模态级数法的有效性及其应对系统共振的鲁棒性;在此基础上文献[18]推导出了相关指标和二阶非线性相关因子公式,并给出了识别系统关键励磁控制器及关键控制器参数的思路。文献[19]则提出一种 3 阶模态级数法,采用数值微分求解 3 阶偏导数阵,解决了求解 3 阶解析解的关键难题,从而可以描述 2 阶解析解无法解释的由系统非线性引起的电力系统复杂的动态特性和稳定性,提高了结论的精确性。

此外,其他一些分析方法,如分岔理论分析法、

模糊辨识法、随机子空间辨识法等,大多未得到广泛应用,此处暂不赘叙。值得注意的是,某些具有启发性的新方法,从能量分布、负荷特性等角度分析低频振荡,这对分析我国智能大电网低频振荡问题有借鉴意义。文献[20-22]分别提出发电机功率振荡增量分布,共振机理下的电网能量分布,以及系统负荷特性对电网振荡的影响,并得出若干极具价值的理论成果。文献[23]提出一种基于典型交直流并行系统的动态建模方法,并引入框图表示方案,可用于我国大型交直流互联电网背景下的低频振荡分析。

2 低频振荡的抑制措施

面向未来我国智能电网对系统安全性的高要求,应对大电网低频振荡,有必要加快建设在线监测和预警,以及自适应、分布式控制系统,实现准确、快速、协调、经济的控制目标。当前电网中的控制设备和系统已形成规模,在此基础上结合新技术新设备进行调整和升级,是建设我国智能大电网的必经之路。

2.1 电力系统稳定控制器(PSS)控制

PSS广泛采用PID控制,是目前使用最广泛、经济性优良且技术成熟的抑制措施,对单机系统控制性能突出,在多机系统中,需确定PSS的安装地点和控制参数,也能起到较好的控制效果。缺点是不能自适应系统参数和运行条件的变化,因为PSS参数一旦整定,只能对特定模式的低频振荡起到最优控制;在多机系统中,由于各机组PSS相互影响,参数整定也比较复杂,对区间联络线振荡的阻尼效果不佳,这是制约PSS用于跨区大电网控制的瓶颈。

鉴于上述缺陷,近年来对PSS技术的改进主要集中在参数优化算法和参数协调交互方面,基于自适应、变结构、模糊逻辑控制、人工神经网络等技术的PSS是近年来的研究热点^[24]。文献[25-26]分别使用人工鱼群算法、粒子群算法优化PSS参数,虽然优化的目标各异,但都能不同程度地增强控制鲁棒性,减少振荡周波。对于多机系统,文献[27]研究了改进遗传算法和免疫算法用于PSS参数寻优,并提出一种基于混合遗传算法的PSS一体化优化配置方法,对选址和参数优化同时考虑;文献[7-8,28-29]分别将Prony分析法与特征值法、改进PSO法结合,分开进行选址和多机参数优化,对主导振荡模式抑制效果良好,能用于在线控制。

文献[30]介绍了广域测量系统(WAMS)用于监测和控制跨区低频振荡的现状。互联电网跨区低频振荡的阻尼比受多种因素影响,必须依靠众多分

散设计的PSS协同控制才能恢复稳定。WAMS克服了EMS系统的诸多固有缺陷,能采集和分析全系统实时的同步功角信息,提供全局协调的阻尼控制方案,且信号时滞稳定。国内外基于该系统的相关研究成果众多,该系统也被认为是实现低频振荡实时在线控制的重要平台。

2.2 LOEC、NLOEC控制

线性最优励磁控制(LOEC)是仅次于PSS的常用励磁控制规律,对提高远距离输电系统的静稳极限和抑制大电网超低频振荡效果显著。LOEC的设计是求出在给定权矩阵 Q 、 R 下最优的反馈增益矩阵 K 。一般 R 值固定,当权矩阵 Q 变化时, K 值也发生变化。目前 Q 值的确定常用试凑法,或凭经验选取。

对LOEC法的改进,一方面在于优化算法,另一方面在于协调控制。文献[31]借鉴PSS复频率设计思路,提出一种基于极点配置的LOEC设计方法,通过选择合适的阻尼比确定系统极点,进而直接确定 K 矩阵。该设计应用于单机无穷大系统,能有效地扩大控制带宽。文献[32]根据实际系统对暂态稳定和静态稳定的要求,结合鲁棒励磁控制和LOEC各自的优点,设计了HSMEC+LOEC综合励磁控制器,不仅能用于多机系统分散控制,而且控制性能优良。

LOEC只适用于小扰动系统,对非线性的大扰动系统控制性能不佳。非线性最优励磁控制(NLOEC)技术正是基于此缺陷进行改进的,它利用微分几何作为数学工具,对原非线性系统进行坐标变换,使其在新坐标系下精确映射成为线性系统,然后利用线性最优技术进行控制设计。对该类技术的改进,主要是应用现代优化算法,寻求多机系统分散协调最优励磁控制方案;或采用预测算法获取参数,进行超前控制^[33]。

2.3 柔性交流输电装置附加控制

柔性交流输电(FACTS)技术是保障电网安全稳定、事故后自愈的有效方法,是提高大电网性能的重要手段。FACTS装置在互联系统中分布广,容量大,响应快速,能够从系统结构、负载特性及运行方式等方面改善系统阻尼特性,对抑制区间振荡有独特效果。对这类控制,以往的改进措施主要是:优化控制参数,强化对某种振荡模式的控制效果^[34]。近年来,考虑PSS与FACTS装置协调控制的技术得到大力发展。文献[35-36]分别研究了PSS与TCSC、以及与VSC-HVDC附加阻尼控制器之间的协调控制问题。文献[37]专门针对2012年我国即将建成的特高压局部电网,提出采用Prony分析检测

联络线主导振荡模式,对区内振荡采用 PSS 控制,对区间振荡采用 SVC 控制的方案。此外,提升 FACTS 装置的控制带宽和控制精度也是一大发展趋势,如 UPFC、IPFC 等控制技术的兴起^[38-41]。可以预料,FACTS 技术将是实现智能电网低频、超低频振荡在线精确控制的重要突破口。

2.4 其他控制

通过调整发电机原有励磁,系统对发电机发电进行再调度,可以改变系统运行点,提高联络线传输功率,减少系统负阻尼,从而提高稳定性^[42]。但是,与调整 PSS 附加励磁不同,调整发电机原有励磁受限于诸多因素,且对低频振荡的抑制效果有限,专门针对低频振荡的励磁调节研究并不多。

增加联络线能提高弱互联电网的阻尼效应,但是成本高。此外,文献^[39]认为采用储能技术可以抑制低频振荡,即通过向系统提供不平衡有功和无功功率的补偿来平息功率振荡,不失为一个新的研究方向。

3 结语

总的来讲,近年来的理论研究一方面致力于提高传统算法的精度和效率,另一方面糅合不同算法的优点,并积极寻找替代算法;振荡抑制措施则朝着分散布置、优势互补、全局协调、在线监控的方向发展。这其中,一些优秀的分析控制策略已经能够适用于我国跨区互联、交直流并行的特高压智能电网环境。

一种设想是,在现有的电网分区格局下,逐层完善基于 WAMS 的在线监控系统。对电网动态建模,利用改进的特征值法、Prony 法、能量分析法等在线辨识振荡参数。分层分区设立振荡控制代理及通信信道,并协调区内各 PSS、FACTS 装置等形成振荡应对策略库。各层设立控制中心,向下层代理下达控制命令,由此形成安全高效、智能优化的低频振荡控制策略。对于跨区低频振荡,该控制系统能最大限度地挖掘设备控制潜力,保证电网安全。

与此同时,对大电网的动态建模,对区间振荡模式的在线准确辨识,对分析控制策略的协同应用,以及全国联网背景下各区电网控制参数调整与设备开发和重组,则是当前需解决的核心问题。

参考文献

[1] 周孝信,郭剑波,印永年. 特高压电网安全对策研究[N]. 北京: 国家电网报, 2006-11-25 (1/2).
ZHOU Xiao-xin, GUO Jian-bo, YIN Yong-nian. Special high-voltage power grid security countermeasures[N].

Beijing: State Grid News, 2006-11-25 (1/2).

[2] 张育英. 探讨全国电力系统安全、可靠运行的基础——评“特高压电网安全对策研究”[J]. 电力自动化设备, 2007, 27 (6): 122-124.
ZHANG Yu-ying. On foundation of safe and reliable operation of national power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27 (6): 122-124.

[3] 王仲鸿. 交流特高压在中国应用的经济和安全分析研究[J]. 电力自动化设备, 2007, 27 (10): 1-4.
WANG Zhong-hong. Economy and security analysis of AC UHV in China[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27 (10): 1-4.

[4] 徐得超, 李亚楼, 吴中习. 稀疏技术在电力系统状态估计中的应用[J]. 电网技术, 2007, 31 (8): 32-36, 57.
XU De-chao, LI Ya-lou, WU Zhong-xi. Application of sparse techniques in power system state estimation[J]. Power System Technology, 2007, 31 (8): 32-36, 57.

[5] LU Zhi-gang, LIU Jun-yong, HE Mai, et al. Analysis of modal participation for low frequency oscillation in interconnected power systems[C]. //APPEEC. 2009: 1-3.

[6] MA J, DONG Z Y, ZHANG P. Comparison of BR and QR eigenvalue algorithms for power system small signal stability analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21 (4): 1848-1855.

[7] HUANG Ying, XU Zheng, PAN Wu-lue. A practical analysis method of low frequency oscillation for large power systems[C]. //Power Engineering Society General Meeting. 2005: 1623-1629.

[8] Ye Hua, Liu Yu-tian, Niu Xin-sheng. Low frequency oscillation analysis and damping based on prony method and sparse eigenvalue technique[C]. //Proceedings of the 2006 IEEE International Conference. 2006: 1006-1010.

[9] 马燕峰, 赵书强, 顾雪平. 改进的机电模式特征根的快速估算法及其应用[J]. 高电压技术, 2008, 34 (3): 537-541.
MA Yan-feng, ZHAO Shu-qiang, GU Xue-ping. Improved fast calculation of eigenvalues for electro-mechanical mode and its application[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34 (3): 537-541.

[10] 郝思鹏, 薛禹胜, 张晓明. 基于 EEAC 理论分析低频振荡[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (4): 11-15, 30.
HAO Si-peng, XUE Yu-sheng, ZHANG Xiao-ming. Low-frequency oscillation analysis based on EEAC theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (4): 11-15, 30.

[11] 郝正航, 周杰娜, 李少波, 等. 基于改进 Ibrahim 时域

- 法的电力系统振荡特性分析[J]. 电机与控制学报, 2007, 11 (3): 248-252.
- HAO Zheng-hang, ZHOU Jie-na, LI Shao-bo, et al. Power system oscillation mode analysis based on improved ITD algorithm[J]. ELECTRIC Machines and Control, 2007, 11 (3): 248-252.
- [12] 王守相, 郑志杰, 王成山. 计及不确定性的电力系统时域仿真的区间算法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (7): 40-44.
- WANG Shou-xiang, ZHENG Zhi-jie, WANG Cheng-shan. Power system time domain simulation under uncertainty based on interval method[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27 (7): 40-44.
- [13] 刘新东, 江全员, 曹一家. 基于广域测量数据的快速暂态仿真技术[J]. 电力自动化设备, 2009, 29 (1): 46-53.
- LIU Xin-dong, JIANG Quan-yuan, CAO Yi-jia. Fast transient stability simulation based on PMU[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29 (1): 46-53.
- [14] 马超, 王慧铮, 蒙永苹, 等. 低频振荡综合监测算法研究[J]. 电网技术, 2008, 32 (2): 31-35.
- MA Chao, WANG Hui-zheng, MENG Yong-ping, et al. Research on integrated monitoring algorithm of low frequency oscillation[J]. Power System Technology, 2008, 32 (2): 31-35.
- [15] Koessler R J, Prabhakara F S, Al-Mubarak A H. Analysis of oscillations with eigenanalysis and prony techniques[C]. //Power Engineering Society General Meeting. 2007.
- [16] Sun S Y, Shu H C, Dong J, et al. Analysis of low frequency oscillation mode based on PMU and PRONY method[C]. //EPEC. 2008: 1-4.
- [17] 吴复霞, 吴浩, 韩祯祥, 等. 电力系统非线性模式分析方法的比较[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (34): 19-25.
- WU Fu-xia, WU Hao, HAN Zhen-xiang, et al. Comparison between methods for power system nonlinear modal analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27 (34): 19-25.
- [18] 李蓓, 李兴源, 胡忠. 影响电力系统主导振荡模式的关键励磁调节器[J]. 继电器, 2008, 36 (1): 15-21, 42.
- LI Bei, LI Xing-yuan, HU Zhong. Identification of the key exciters and its parameters effecting on the critical inertial modes of the power system[J]. Relay, 2008, 36 (1): 15-21, 42.
- [19] 邓集祥, 陈武晖, 涂进, 等. 电力系统 3 阶解析解的推导及验证[J]. 中国电机工程学报, 2007: 27 (28): 12-18.
- DENG Ji-xiang, CHEN Wu-hui, TU Jin, et al. Deducing and validating the third-order analytical solutions of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27 (28): 12-18.
- [20] 王青, 闵勇, 张毅威. 低频振荡的功率振荡增量分布计算新方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (6): 1-4, 40.
- WANG Qing, MIN Yong, ZHANG Yi-wei. A new algorithm of oscillatory active power increment distribution in low frequency oscillation study[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (6): 1-4, 40.
- [21] XIN Jian-bo, HAN Zhi-yong, WU Guo-ping, et al. Energy analysis of power system low frequency oscillation of resonance mechanism[J]. Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008, 1153-1157.
- [22] Sharma C, Singh P. The effect of load types on power system oscillations[C]. //Transmission and Distribution Conference and Exposition. 2008: 1-8.
- [23] Najafi H R, Robinson F, Shoulaie A. Low frequency oscillation analysis in parallel AC/DC system by a novel dynamic model[C]. //2004 International Conference. 2004: 294-299.
- [24] ZHAO Qiao-e, SU Xiao-lin, ZHOU Shuang-xi. Research of power system stabilizer based on prony on-line identification and neural network control[C]. //ICEMS 2008, International Conference. 2008:146-150.
- [25] 胡晓波, 杨利民, 陈中, 等. 基于人工鱼群算法的 PSS 参数优化[J]. 电力自动化设备, 2009, 29 (2): 47-50.
- HU Xiao-bo, YANG Li-min, CHEN Zhong, et al. PSS parameter optimization based on artificial fish-swarm algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29 (2): 47-50.
- [26] 吴峰, 陈维荣, 李奇, 等. 基于粒子群优化算法的 PSS 参数优化[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (10): 53-58.
- WU Feng, CHEN Wei-rong, LI Qi, et al. Parameter optimization of power system stabilizer on particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (10): 53-58.
- [27] 刘杨名. 电力系统稳定器 (PSS) 参数优化整定的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- LIU Yang-ming. Study on the optimal algorithm of parameter of power system stabilizer[D]. Shanghai:

- Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [28] 杨慧敏, 文劲宇. 基于模式综合分析法的联络线功率振荡抑制措施[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (9): 91-95.
YANG Hui-min, WEN Jin-yu. Damping power oscillation on transmission line based on mode-synthesis analysis method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (9): 91-95.
- [29] 郭成, 李群湛, 王德林. 基于 Prony 和改进 PSO 算法的多机 PSS 参数优化[J]. 电力自动化设备, 2009, 29 (3): 16-21.
GUO Cheng, LI Qun-zhan, WANG De-lin. Parameter optimization of multi-machine PSS using Prony and improved PSO algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29 (3): 16-21.
- [30] 吴海霞, 常勇. 低频振荡广域监控研究现状及新进展[J]. 高电压技术, 2008, 34 (8): 1737-1744.
WU Hai-xia, CHANG Yong. Advance of monitor and control of low frequency oscillation based on WAMS[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34 (8): 1737-1744.
- [31] 陆继明, 刘伯康, 毛承雄, 等. 基于极点配置的线性最优励磁控制设计方法[J]. 大电机技术, 2009, 1: 58-63.
LU Ji-ming, LIU Bo-kang, MAO Cheng-xiong, et al. A new design method of Loec based on pole placement[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2009, 1: 58-63.
- [32] 汤洪梅, 李春文. 多机电力系统 H_∞ 滑模分散鲁棒励磁控制器设计[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19 (4): 100-105.
TANG Hong-mei, LI Chun-wen. H_∞ sliding mode robust excitation controller for multi-machine power system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2007, 19 (4): 100-105.
- [33] 肖智宏, 周晖, 朱启晨. 基于灰色预测控制算法的发电机最优励磁控制[J]. 电网技术, 2006, 30 (5): 81-85.
XIAO Zhi-hong, ZHOU Hui, ZHU Qi-chen. Optimal generator excitation controller based on grey prediction control algorithm[J]. Power System Technology, 2006, 30 (5): 81-85.
- [34] Zhang L, Liu Y. Bulk power system low frequency oscillation suppression by FACTS/ESS[C]. //Power Systems Conference and Exposition. IEEE PES: 2004, 1 (1): 219-226.
- [35] 宁琳. PSS 和 TCSC 抑制低频振荡交互及协调研究[D]. 南宁: 广西大学, 2008.
NING Lin. The study of interaction and coordination between PSS and TCSC in damping oscillations[D]. Nanning: Guangxi University, 2008.
- [36] 李国杰, 马锋. PSS 与 VSC-HVDC 附加阻尼控制器参数协调优化设计[J]. 电网技术, 2009, 33 (11): 39-43.
LI Guo-jie, MA Feng. A coordinated tuning algorithm for power system stabilizer and supplementary damping controller of VSC-HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2009, 33 (11): 39-43.
- [37] 蒋平, 栗楠, 顾伟, 等. PSS 和 SVC 联合抑制特高压网络低频振荡[J]. 电力自动化设备, 2009, 29 (7): 13-17.
JIANG Ping, LI Nan, GU Wei, et al. Restraining low frequency oscillation of UHV power grid using PSS and SVC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29 (7): 13-17.
- [38] Jalilzadeh S, Shayeghi H, Safari A, et al. Output feedback UPFC controller design by using quantum particle swarm optimization[C]. //Computer, Telecommunications and Information Technology, 6th International Conference. 2009, 1: 28-31.
- [39] Dejamkhooy A M, Banejad M, Talebi N. Fuzzy logic based UPFC controller for damping low frequency oscillations of power systems[C]. //Power and Energy Conference, IEEE 2nd International. 2008: 85-88.
- [40] Parimi A M, Elamvazuthi I, Saad N. Interline power flow controller (IPFC) based damping controllers for damping low frequency oscillations in a power system[C]. //Sustainable Energy Technologies, ICSET. 2008: 334-339.
- [41] Banaei M R, Kami A. Interline power flow controller based damping controllers for damping low frequency oscillations[C]. //Telecommunications Energy Conference. 31st International. 2009: 1-6.
- [42] 戚军, 刘兆燕, 江全元. 考虑时滞影响的电力系统广域集中励磁控制[J]. 电网技术, 2009, 33 (7): 42-46.
QI Jun, LIU Zhao-yan, JIANG Quan-yuan. Wide-area centralized excitation control in power system considering influence of time-delay[J]. Power System Technology, 2009, 33 (7): 42-46.

收稿日期: 2010-01-04; 修回日期: 2010-03-04

作者简介:

石 辉 (1986-), 男, 硕士生, 主要从事电力系统运行分析与控制研究; E-mail: 357970809@qq.com

张勇军 (1973-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力系统无功优化和电压稳定、电力系统可靠性与规划等研究;

徐 涛 (1985-), 男, 硕士生, 主要从事电力系统优化运行与可靠性的研究。