

低频振荡分析及抑制策略概述

郭磊¹ 张英敏² 李兴源²

(1. 广东电网有限责任公司惠州供电局, 广东 惠州 516001;

2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 在分析了低频振荡产生原因的基础上, 概括出低频振荡的分析方法具有基于系统实测信号和基于系统数学模型两大类, 并对具体分析方法细化; 总结交直流互联系统中低频振荡的抑制策略; 重点对低频振荡的抑制及其关键技术问题研究现状进行介绍; 最后对于低频振荡的后续热门研究问题做了展望。

关键词: 低频振荡; 系统实测信号; 系统数学模型; 分析方法; 抑制策略; 研究现状

中图分类号: TM712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2018)01-0001-09

DOI: 10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.01.001

Overview of Analysis Methods and Suppression strategies for Low Frequency Oscillation

Guo Lei¹, Zhang Yingmin², Li Xingyuan²

(1. Huizhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Huizhou 516001,

Guangzhou, China; 2. College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: Based on the cause analysis for the occurring of low frequency oscillation, the analysis methods of low frequency oscillation is concluded, which has two kinds, that is, based on the system measured signal and based on the system mathematical model separately, and the concrete analysis methods is refined. The strategies used in suppressing the low frequency oscillation in AC-DC interconnected system are summarized, and then the current states of the key problems about suppressing the low frequency oscillation are introduced in detail. Finally, the prospects are carried out on the follow-up hot researches of low frequency oscillation.

Key words: low frequency oscillation; system measured signal; system mathematical model; analysis method; suppression strategy; current states

0 引言

随着电力系统电压等级的提高和电网建设规模的扩大, 中国已经形成了东北电网、华北电网、华中电网、华东电网、西北电网和南方电网 6 个跨省的大型区域电网和电网间的互联, 交直流并存已经成为电网发展的必然趋势。电网互联使得电网动态稳定问题日益复杂, 区间弱阻尼是大规模电网面临的主要挑战之一, 低频振荡问题越来越成为限制电网安全稳定运行的主要因素。

南方电网项目: 机电暂态仿真程序中高压直流输电控制系统的简化和优化研究与软件模块开发

下面首先分析低频振荡产生的原因, 归纳出低频振荡的分析方法, 总结出交直流互联系统中低频振荡的抑制策略; 然后重点对低频振荡的抑制及其关键技术问题研究现状进行介绍; 最后对于低频振荡的热门研究方向做了展望。

1 低频振荡的产生原因

低频振荡是指当电力系统受到了干扰后, 并列运行的同步发电机转子间由于相对摇摆导致系统出现 0.2~2.5 Hz 不同程度的振荡现象。低频振荡可分为区域间振荡和区域内振荡。区域间振荡模式是

指两个区域机群之间发生 0.2 ~ 0.7 Hz 的振荡,振荡频率相对较低^[1-2];区域内振荡是指个别发电机组与系统内其他机组之间的摇摆,其振荡频率比较高,在 0.7 ~ 2.5 Hz 之间。电力系统低频振荡是电力系统发生小干扰稳定性的问题,主要有以下因素^[3]:

- 1) 由于阻尼过低互联电力系统机电模式引起的低频振荡;
- 2) 发电机励磁系统较大的电磁惯性引起的低频振荡;
- 3) 较大励磁增益的励磁调节器作用引起的低频振荡;
- 4) 因不恰当的控制方式导致的低频振荡;
- 5) 由互联系统的弱联系、区域间功率的不平衡、直流控制系统、控制方式及交流与直流系统间的相互作用等。

2 低频振荡的分析方法

电力系统低频振荡主要有两大类分析方法:基于系统实测信号和基于系统数学模型的分析方法。基于系统的数学模型分析方法需要建立系统的全阶模型,但其有一些缺陷。随着电力系统 WAMS(wide area measure system) 技术的发展,应用 WAMS 对实测信号振荡特性分析已经成为研究的焦点^[4]。

2.1 基于系统数学模型的分析方法

2.1.1 复频域法

复频域法通过对电力系统状态方程的特征根求解以获得其振荡模式信息,通过对特征向量和特征值灵敏度等的分析计算,得到相关振荡的更多信息。QR 算法是最基本的电力系统复频域分析方法,具有鲁棒性好、收敛速度快等优点,但是不能处理高阶系统^[5]。随着电力系统的日益复杂,很多学者提出了多种替代方法,主要包括电力系统基本自发振荡分析方法(analysis of essentially spontaneous oscillation in power system, AESOPS)、选择模态法、Arnoldi 算法等。文献[6]介绍了用于电力系统静态稳定分析的 QR 算法和 AESOPS 算法。文献[7]通过采用轨迹特征根法,得到按减小联络线功率来调整机组出力可能引起的负阻尼效应;可以通过减小小映象功角调整机组出力进而抑制低频振荡。文献[8]运用 Chebyshev 多项式加速的重启 Arnoldi 算法,计算出

电力系统按实部递减的特征子集。使用单向量重启并用 Chebyshev 多项式加速,增加所需特征值在基向量方向的分量,同时减小不需要特征值在基向量方向的分量。

2.1.2 时域仿真法

时域仿真法是根据元件间的拓扑关系把系统各元件模型构成一个全系统模型,通过稳态值得系统的状态量及其随时间变化代数值的曲线,得到小扰动下系统是否能保持同步稳定运行的结论^[9-10]。文献[11]基于 RTDS 建立一个单机无穷大电力系统模型,验证了 PSS4B 在高、中、低频段对低频振荡抑制的效果,得到中心频率的变化会对反调效果产生影响。但时域仿真法有仿真时间长、计算量大、提供的系统模式信息量小、不能激发所有关键振荡模式等缺点。

2.1.3 基于正规形理论的分析方法

正规形理论方法通过将非线性系统进行坐标变换,可以使原系统和一个线性二阶或更高阶系统等价。在用正规形理论进行电力系统稳定分析时,其对小信号法的优点进行了保留,又对不同振荡模式间的非线性作用进行了考虑,可以对大扰动下电力系统中存在的低频振荡进行分析^[12]。文献[13]运用正规形理论对一双馈入互联输电系统中存在的非线性作用做了研究。文献[14]介绍了如何将正规形方法用于电力系统振荡的稳定分析和如何将小干扰法中的参与因子分析法用于非线性系统中。文献[15]运用正规形分析法分析系统中的低频振荡,得出正规形变量初值和变换系数的乘积可以反映超低频或倍频振荡模式状态量响应作用程度的结论。

但是,正规形理论分析方法也存在一定的缺点。计算比较复杂,需要依赖于研究新的算法和软件水平的提高;由于其基于系统的微分方程组的泰勒展开,会存在一定的截断误差,将影响系统的分析。

2.1.4 基于分岔理论的分析方法

系统中低频振荡的稳定极限与微分方程发生 Hopf 分岔的情况有关,可以用局部分岔理论中的 Hopf 分岔理论对系统的低频振荡进行分析^[16]。文献[17]运用 Hopf 分岔理论和中心流形理论对电力系统中低频振荡存在的非线性奇异现象进行研究。分析一电力系统中 Hopf 分歧线性发生的条件,揭示与线性化分析方法不同的小干扰稳定域的新现象。文献[18]采用分岔理论方法分析含双馈风机电力

系统的电压稳定性。文献[19]构造可以同时实现Hopf分岔和阻尼控制的多目标优化模型,由于采用直接法会对初值要求比较高,提出采用准Hopf分岔指标来实现Hopf的分岔控制,然后运用Pareto排序和进化方法求解最优问题,通过一具体系统模型仿真验证所提出模型和方法的正确性。

2.2 基于系统实测信号的分析方法

基于系统实测信号的分析方法实际上是通过系统受扰动后的响应轨迹进行分析,主要有滤波器类、回归分析类、傅里叶类、经验模式分解类、prony类、高阶统计量类、TLS-ESPRIT算法类等。

2.2.1 滤波器类方法

电力系统低频振荡的分析和监测是根据所测得数据的计算频率和阻尼系数辨识出系统的振荡模式。文献[20]使用基于窗口法设计的FIR数字滤波器,它具有较好的频选性能,能在保证信号不失真的同时滤除噪声信号,进而提高监测算法的灵敏度。文献[21]根据低频振荡的频率特性,运用带阻滤波器的性能,在监测到电力系统发生低频振荡且振荡是由系统的调速系统所引起时,投入串联连接的滤波器和调速系统的PID控制器,实现低频振荡扰动信号的滤除和平息振荡的作用,时域仿真结果表明所使用的滤波器类方法的有效性。

2.2.2 回归分析类的方法

常用的参数谱估计法^[22]有滑动平均自回归(auto-regressive moving average, ARMA)模型以及自回归(autoregressive, AR)模型。文献[23]运用非线性回归分析方法,可以实现在低频振荡发生后的1/4周期内准确地估算出振荡频率。在Matlab中进行仿真,结果表明所采用的非线性回归法具有较高的精度,对于具有较大衰减幅度的振荡波形也能准确地测出其振荡频率。文献[24]采用了一种基于奇异值分解的ARMA定阶分析方法,首先辨识出ARMA模型参数,然后运用ARMA谱估计出系统的低频振荡主导模式。通过对测试系统进行仿真和对南方电网实测的类噪声数据进行分析,表明所采用ARMA方法可以准确地辨识系统的低频振荡的振荡模式,同时其对于弱阻尼模式下系统的参数辨识也具有较高精度。

2.2.3 傅里叶类方法

傅里叶变换可以对电力系统中的平稳信号进行频谱分析^[25]。文献[26]根据低频振荡具有带宽较

窄、主导振荡模式较少的特点,提出了一种用于主导模式辨识的分段傅里叶神经网络的分析方法。根据分段傅里叶系数辨识出系统主导振荡模式的频率和衰减因子,再据其与衰减时间窗的关系求得幅值。该方法既保留了傅里叶算法的抗噪性能,又可以利用神经网络训练进一步提高了系统的可靠性。文献[27]提出用窗口傅里叶脊(windowed Fourier ridges, WFR)对非平稳振荡信号进行分析。WFR利用窗口傅里叶变换来反映振荡信号所具有的频域特性,以极大值点来反映信号的振幅,通过窗口滑动反映振荡信号的时域特性,进而对非平稳振荡信号频率和阻尼的时变性进行反映。

2.2.4 经验模式分解类方法

经验模式分解法(empirical mode decomposition, EMD)的本质为从时间尺度上实现对信号的平稳化、线性化的处理,然后按频率由高到低依次分离出本征模态函数分量^[28]。文献[29]对所研究电力系统输电线路上的有功振荡信号做经验模式分解,然后对分解得到的本征模态函数分量做希尔伯特谱分析,最后通过与其他方法比较,证明了经验模式分解方法的有效性。经验模式分解法虽有较好的适应性,但也有过冲现象、端点效应等问题。现有研究多集中在对EMD方法进行改进并与其他方法相结合来对系统振荡进行分析。文献[30]利用EEMD对非平稳信号进行处理,通过EEMD滤波器、信号能量权重和互相关系数筛选出系统的主导模式分量;然后运用自然激励技术(natural excitation technique, NExT)求解互相关函数,将信号能量分析法的辨识阻尼比应用于预警系统。

2.2.5 Prony类方法

Prony算法利用指数函数的线性组合来拟合实测的振荡信号,从而得到振荡信号的幅频、相位、阻尼等信息^[31]。文献[32]提出一种基于Prony算法和形态滤波相结合的低频振荡辨识方法,能够准确地辨识出混合噪声干扰下低频振荡的模式。对去噪声后的信号运用Prony算法进行辨识,能够准确地获得系统中低频振荡的各种振荡模式及参数。

文献[33]采用一种改进多信号Prony算法对低频振荡进行在线辨识。运用小波变换去除噪声,利用SVD-TLS方法对信号进行定阶,然后根据最小二乘算法辨识出系统的振荡模式。但Prony类方法对所测信号的不平稳性没有进行考虑,故在分析非

平稳的振荡信号时,采用强制拟合将使分析的结果中含有一定的虚假量。

2.2.6 TLS - ESPRIT 方法

TLS - ESPRIT 算法是对谐波恢复、振荡衰减正弦信号参数估计的重要工具,被广泛应用于电力系统的暂态信号分解、谐波和间谐波高精度检测、分布式电源解列控制等场合。在线辨识系统低频振荡的主要难题是系统噪声对辨识和定阶带来的影响。TLS - ESPRIT 算法具有更强的抗噪、抗干扰能力,并且具有较高的计算效率^[34]。文献[35]运用 TLS - ESPRIT 算法辨识出系统的低频振荡和次同步振荡模态,基于线性矩阵不等式的鲁棒控制设计方法,设计出针对不同振荡模式的多通道附加高压直流控制器,实现了对系统中存在的低频振荡和次同步振荡同时抑制,由此可见 TLS - ESPRIT 算法是对互联系统辨识的一种有效方法。

2.2.7 高阶统计量类方法

高阶统计量类方法被用来分析被测信号偏离高斯信号的程度,能提供所测信号的幅值和相位信息,可以有效检测和分析信号的非线性特点。其被广泛应用于雷达目标特征信息的提取、声波干扰的分析、谐波信号的处理、语音处理以及故障诊断等方面^[36]。但目前对高阶谱理论应用于低频振荡分析的研究还比较少。文献[37]采用互高阶谱奇异值分解方法对电力系统低频振荡的模式进行分析,该方法具有良好的谱估计分辨率和谱估计稳定性,但因其采用仿真信号进行测试,实测信号下该方法的实用性需要验证。

3 互联系统中低频振荡的抑制策略

低频振荡产生的主要原因是由于系统的弱阻尼和负阻尼引起的,对互联系统的低频振荡抑制可以从电力系统一次系统和二次系统进行附加控制。现有研究多集中在利用二次系统附加控制器改善系统的低频振荡情况:对于发电部分可以通过对励磁系统附加阻尼控制;对于输电部分则可通过对高压直流输电系统或柔性交流输电系统的功率调整等方式进行控制。

3.1 一次系统的控制方法

3.1.1 增强系统的网架结构

交直流系统间的弱互联存在产生低频振荡的风

险,可以对系统的互联网架结构做出改变,比如避免大负荷、远距离的输电,或在输电线路上增加系统间的联络线条数等。文献[38]通过对强互联与弱互联系统中的阻尼转矩进行对比,分析了弱互联系统中的区域联络线阻抗会较大幅度地减少系统阻尼;通过增加东北—华北互联系统间联络线的个数,改善了互联系统的阻尼,实现对系统中低频振荡的抑制。

3.1.2 储能类装置

储能类装置由于具有可以快速吸收和发出功率的特点被用于提高电能质量、进行电力系统调峰和改善运行稳定性等方面,对于抑制互联系统间的低频振荡也有一定的效果^[39]。

目前主要的储能类装置分为化学类储能和物理类储能。物理类储能中的超导储能装置具有能量转换效率高但一般容量较小的特点;化学类储能中的电池储能装置能量转换效率没有超导储能的高,但因其应用模块化结构,具有容量大、体积小的特点。文献[40]提出采用储能装置用来抑制电力系统的低频振荡,应用 PSS/E 软件在一四机两区域模型和华东电网模型进行了仿真,比较了不同控制方式及不同容量下电池储能装置对于系统中低频振荡的抑制效果,结果表明储能装置的控制方式及容量对抑制低频振荡的效果有较大影响。飞轮储能系统具有对有功功率和无功功率独立调节的能力,通过一定的控制策略可以补偿系统的振荡功率、快速平息振荡进而抑制系统的低频振荡。

3.2 二次系统控制方法

3.2.1 电力系统稳定器

在互联电力系统中安装电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS) 是抑制系统低频振荡的一种重要手段。PSS 可以通过调节发电机的励磁产生阻尼转矩进而增加发电机的阻尼,补偿互联系统运行下的负阻尼转矩,实现对电力系统低频振荡的抑制。文献[41]分析了湖北电网发生低频振荡的原因,采用小干扰频域分析法对系统的振荡模式进行计算,针对不同振荡模式计算出强相关机组并设计出该系统 PSS 的参数,提出抑制低频振荡的具体措施,通过时域仿真验证所投入的 PSS 具有较好的控制效果。

PSS 在不同的参数控制下具有不同的控制效果。恰当的控制参数能使 PSS 增加系统的阻尼,具有较小的无功反调;不恰当参数下的 PSS 会降低系

统的稳定性,降低系统的阻尼并有较明显的无功反调。文献[42]采用小扰动频域分析和暂态时域分析相结合的方法能够较准确计算 PSS 的参数,能够实现低频振荡的较好抑制。

但是单独运用 PSS 控制具有以下缺点^[43]: 1) 不能直接应用相对角速度和相对功角构成闭环控制。相对功角和相对角速度是较有效地实现阻尼控制的信号选择,但缺少必要的测量方法被局限于只能采用本地信息。2) PSS 采用本地测量信号构成反馈控制,不能较好地反映区域间的振荡信息,导致其只能对区域内振荡进行阻尼,难以有效抑制区域间低频振荡。3) 分散设计出的 PSS 缺少控制器间的协调会使低频振荡加剧甚至产生新的振荡频率。

3.2.2 基于柔性交流输电系统的附加阻尼控制

随着电力系统互联规模的不断扩大,区域间低频振荡成为限制大规模互联电力系统传输能力的重要因素。通过对发电机组安装 PSS 抑制区域间低频振荡效果不太理想。FACTS 具有安装地点灵活且有较好的动态效果,为抑制区域间低频振荡提供一种新的控制方法。常见的 FACTS 装置有静止无功补偿器(static var compensator, SVC)、静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)、静止同步串联补偿器(static synchronous series compensator, SSSC)、晶闸管控制串联电容补偿器(thyristor controller series compensation, TCSC)、统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)等^[44-45]。

文献[46]分析并联储能型 FACTS 装置对低频振荡进行抑制的方法,根据相位补偿方法设计出并联储能型 FACTS 装置的附加阻尼控制器,在 PSASP 软件下进行仿真验证。结果表明并联储能型 FACTS 装置能够有效地抑制交流线路的功率振荡,增强互联系统的阻尼比,提高了华中和华北电网联网的稳定性。文献[47]设计出计及信号传输时滞的 FACTS 阻尼控制器用于对互联电力系统的低频振荡进行抑制。该控制器既能有效对区域间低频振荡进行抑制,又能一定程度地承受信号的传输时滞,具有较好的控制效果。

3.2.3 HVDC 直流调制的附加阻尼控制

自美国太平洋交直流输电系统联络线采用安装功率调制器来阻尼交流输电线上的振荡以来,直流调制在电力系统的安全稳定和联网技术中的作用备受关注。相关研究^[48-49]表明,高压直流输电中的直

流调制对于阻尼互联系统区域间的低频振荡具有较好的控制效果。

为提高交直流互联电力系统的整体动态稳定性,文献[50]提出采用一种基于混沌优化的自适应粒子群优化算法,对多馈入高压直流输电系统进行直流调制以及优化协调。在一交直流系统中进行仿真,结果表明该算法能够较好地实现各直流系统直流调制间的优化协调,增强了系统对低频振荡的抑制能力。

3.2.4 最优励磁控制策略

最优励磁控制(optimal excitation control, OEC)方法由线性最优励磁控制(linear optimal excitation control, LOEC)和非线性最优励磁控制(nonlinear optimal excitation control, NLOEC)构成。

LOEC 是采用线性二次型理论设计的一种现代控制理论中的新型励磁控制方法。和经典励磁控制方法相比,它有动态响应性能好、稳定范围大等优点。文献[51]将 PSS 复数频率设计方法引入到 LOEC 当中来,提出了一种基于极点配置的 LOEC 设计方法。极点配置的 LOEC 方法可以适应系统在较大范围内变化,且在不同扰动下均能具有较好的控制性能。NLOEC 理论是根据微分几何的理论,在准确线性化了的电力系统模型基础上,能够较好地适应电力系统受到大干扰后偏离起始平衡点的状态。文献[52]利用 PSASP 程序中的自定义功能设计用于华中电网模型的非线性最优励磁控制器,并进行仿真分析,结果表明安装非线性励磁控制器能够提高系统的阻尼,使得系统受到故障或扰动影响后引起的低频振荡能够快速衰减。

4 低频振荡抑制及关键问题研究现状

4.1 广域时滞问题研究现状

对于抑制交直流互联系统中的区域间低频振荡,广域附加阻尼控制具有较好的控制效果。但信号采集和传递过程中会存在时滞问题,时滞将影响所设计控制器的控制效果,因此对于广域信号时滞的补偿显得很有必要。文献[53]运用 Pade 方程对广域信号产生的时间延迟进行建模,并用线性分式变换方法把时间延迟看做是不确定因素,利用线性矩阵不等式(linear matrix inequality, LMI)方法设计系统的广域自适应监控器。文献[54]提出一种考

考虑时间延迟影响设计 PSS 的方法,采用 Pade 逼近法近似时间延迟,并写成状态空间形式,与 PSS 共同构成了时间延迟控制器,使系统变为不含时间延迟的控制系统,再应用进化方法整定 PSS 的参数。

文献[55]分析了时间延迟对互联电力系统低频振荡阻尼的影响,为使系统在较大时间延迟时仍有较好的性能引入统一 Smith 预估器。通过对一四机两区域模型说明了时间延迟对模态阻尼的影响和延迟补偿的意义。仿真结果表明该控制器可以使发电机转速以及交流输电线路的传输功率在较大时间延迟下仍有较好的阻尼效果。文献[56]针对交直流互联系统区域间存在的低频振荡问题以及广域信号传输和测量过程中引入的时滞问题,通过计算采用交流联络线上的功率信号进行附加阻尼控制的滞后相位以及变化时滞引起的低频振荡信号中的滞后相位,将时域信号转换为旋转坐标下的向量信号,经过参考坐标角度的旋转进行阻尼和滞后相角的补偿;根据增益的放大,经过时域反变换后得到补偿后系统的直流附加控制量。仿真结果表明所提出的方法可以消除变化时滞的影响,能有效阻尼系统的振荡。

4.2 高压直流附加阻尼控制研究现状

4.2.1 HVDC 系统中附加励磁阻尼控制研究现状

PSS 是根据本地信号而设计的,主要是用来抑制本地的区域内低频振荡,附加励磁阻尼控制器的作用是通过反馈广域信号来提高互联系统的阻尼,该信号通常是机组的功角差、转子角速度差或者是振荡区域间的传输功率的偏差,这些信号需要由广域测量系统获得。

现有研究对高压直流附加励磁阻尼控制的研究已有很多,其中有大部分集中在对互联系统中的次同步振荡进行研究,还有一部分是对系统中的低频振荡进行研究^[57]。文献[58]通过设计系统的附加励磁阻尼控制器实现对互联系统中次同步振荡的抑制。文献[59]应用 LMI 算法设计系统的附加励磁阻尼控制器用于对系统低频振荡的抑制。附加励磁阻尼控制器可以对区域间振荡和区域内振荡同时进行抑制,但是现有研究还比较少。

4.2.2 HVDC 系统中直流系统附加阻尼控制研究现状

HVDC 系统中的直流附加阻尼控制主要是运用现代控制理论中的控制方法进行研究,目前其主要

控制方法有线性控制法、鲁棒控制法、自适应控制法和人工智能控制法等。

极点配置法^[60]是设计线性系统附加阻尼控制器的方法之一,在现代控制工程中不仅可应用于单输入单输出的系统,也可应用于多输入多输出系统,在电力系统低频振荡抑制中被广泛应用。

线性最优控制^[61]是现代控制理论中的一个重要分支。线性最优控制器受振荡频率的影响阻尼效果变化不大,可以提高系统的小干扰稳定极限,并且易于设计和工程实现;但线性最优控制器是根据系统稳定工作点的局部线性化模型而设计的,并没有考虑电力系统中的强非线性,所以其对大干扰下系统的作用效果不明显。

H2/H ∞ 算法^[62]是一种用于高压直流输电系统进行阻尼控制的比较成熟的控制方法,它可以综合考虑控制器的鲁棒性和控制代价,设定多目标函数,实现提高系统阻尼和控制效果的作用。

随着交直流系统作用的日趋复杂,采用恒定参数的控制器对系统进行附加阻尼控制显得力不从心,国内外学者尝试将自适应控制理论^[63]应用于低频振荡的抑制中。文献[64]针对变化的时间延迟信号应用递归最小二乘法辨识,提取出振荡信号的主导振荡模态,将时域信号转化为旋转坐标下的向量信号,通过对参考坐标体系的角度进行变化,分别对阻尼和时滞相角做了自适应补偿,从而实现了对直流系统的自适应控制。文献[65]使用改进的 Prony 算法得到系统弱阻尼振荡模式下的阻尼比,并通过自寻优的方法调整控制器的参数,设计出一种基于广域动态信息的自寻优自适应附加阻尼控制器实现对系统的阻尼控制。但是该控制理论较为复杂,有一定的限制条件。

人工智能算法、模糊控制算法和神经网络算法^[66-69]也被用在高压直流的附加阻尼控制当中,但是由于需要迭代次数比较多,多用于控制器参数的寻优^[70]当中。

4.3 基于电压源换流器的高压直流附加阻尼控制研究现状

传统高压直流输电以其可以连接两个不同频率电网、长距离跨海输电、实现无功支撑、输电功率控制与提高电网稳定性等优势得到广泛应用^[71]。但它有换流站网侧谐波较大、无法向单纯负载点供电等缺点,使得传统直流系统在中小型容量和短距离

输电中缺乏竞争力。VSC-HVDC系统具有能低功率运行、孤岛运行、向无源网络供电等优势弥补了这一不足,而得到成功的推广和应用^[72]。

现有对低频振荡的研究多集中在高压直流输电系统中。随着柔性直流输电的不断运用和发展,对于柔性直流输电系统中存在的低频振荡问题进行研究显得尤为重要,目前已经有一些学者对该方面进行研究和分析。文献[73]根据扩展阻尼比法选择广域信号作为反馈输入,同时利用极点配置法整定附加阻尼控制器的参数,实现抑制柔性直流输电系统中低频振荡。文献[74]将基于线性矩阵不等式的 H_2/H_∞ 多目标控制方法应用到柔性直流附加控制中,实现对低频振荡的抑制。文献[75]利用降阶开环模型和极点配置方法,设计出用于VSC-HVDC的附加阻尼控制器,实现增加系统振荡阻尼的作用。文献[76]选用交流线路的有功功率作为变参数向量,应用线性变参数法,设计出应用于VSC-HVDC的变增益附加阻尼控制器。但是所使用的控制方法设计出的控制器阶数普遍偏高,且控制器的控制效果不太理想,寻求控制器阶数低、控制效果好的抑制VSC-HVDC系统的低频振荡方法显得很有必要。

5 结论与展望

随着中国电力系统互联规模的不断增大及其运行方式的日益复杂,交直流互联系统间的低频振荡时有发生,限制了电网的传输能力。前面根据现有直流输电系统的实际问题以及构建数字化、信息化、互动化、自动化坚强智能网架结构的工程需求对于高压直流输电系统中低频振荡的分析方法以及抑制措施进行研究分析。

对于低频振荡的抑制问题尚有以下方面需要进行进一步研究:

1) 对于互联系统的附加励磁控制器实现低频振荡的抑制,除运用经典电力系统稳定控制器、附加阻尼控制器外,还可以考虑运用STATCOM、SVC等FACTS装置与其进行协调优化,以取得更好的控制效果。

2) 对低频振荡研究的过程中,考虑到信号采集过程中存在时滞问题,且一般系统时滞有不确定性,上面对于系统时滞采用不变时滞进行分析,所以对

变化时滞下系统的附加阻尼控制器效果的验证需做进一步研究分析。由于设计出的抑制振荡的阻尼控制器受时滞影响较大,有必要研究一种对于振荡更有效的时滞补偿控制器。

3) 随着能源的不断消耗,采用风电、光电、太阳能等资源进行发电是大势所趋,对于小容量的能源的汇集研究很有必要。柔性直流输电系统恰恰满足这一优点,中国柔性直流输电系统正朝多端方向发展,对于多端VSC-HVDC系统中低频振荡附加阻尼控制研究分析显得尤为重要。

4) 在设计低频振荡附加阻尼控制器过程中,一般选取发电机机端的转子角速度差或交流系统的有功功率作为输入信号,对于选用频率、无功功率作为输入信号进行辨识设计控制器进行提高系统阻尼的研究还比较少。

5) 现有抑制低频振荡的附加阻尼控制器多集中在整流侧,通过对逆变侧的分析研究设计出逆变侧阻尼控制器,与整流侧控制器进行协调控制可以更好地改善系统的阻尼特性。

参考文献

- [1] Rogers G. Power System Oscillations [M]. Boston, USA: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [2] Demello F P, Corordia C. Concept of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control [J]. IEEE Transactions on PAS, 1969, 88(4): 316-329.
- [3] 杨东俊, 丁坚勇, 周宏, 等. 基于WAMS量测数据的低频振荡机理分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(23): 24-28.
- [4] Hauer J F, Trudnowski D J, Desteese J G. A Perspective on WAMS Analysis Tools for Tracking of Oscillatory Dynamics [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 12(4): 1-10.
- [5] 武志刚, 张尧, 郑风雷, 等. 电力系统特征值与状态变量对应关系分析[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(5): 23-26.
- [6] 张鹏, 王春燕, 刘玉田. 电力系统中全部特征值QR分析法的有效性[J]. 山东电力技术, 1997(1): 17-20.
- [7] 郝思鹏, 薛禹胜, 张晓明, 等. 基于EEAC理论分析低频振荡[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(4): 11-15.
- [8] 杜正春, 刘伟, 方万良, 等. 大规模电力系统关键特征值计算的Arnoldi-Chebyshev方法[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(10): 995-999.
- [9] 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.
- [10] 陈刚, 何潜, 段晓, 等. 电力系统低频振荡分析与抑制综述[J]. 南方电网技术, 2010, 4(3): 17-22.
- [11] 袁亚洲, 许其品, 徐蓉, 等. 基于RTDS的多频段电力系统稳定器效果验证[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(18): 126-131.
- [12] Liu Shu, Messina A R, Vittal V. Assessing Placement of Controllers and Nonlinear Behavior Using Normal Form Analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(3): 1486-1495.
- [13] 杨秀, 徐光虎. 基于正规形理论的多馈入交直流输电系统非线性模式分析[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(8): 6-10.
- [14] 夏成军, 周良松, 彭波, 等. 基于正规形理论的电力系统振荡稳定分析[J]. 继电器, 2001, 29(8): 13-16.
- [15] 苏小林, 周双喜, 阎晓霞. 电力系统超低频振荡和倍频振荡的正规形分析[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(1): 7-10.
- [16] Hassard B D, Kazarinoff N D, Wan Y H. Theory and Applications of Hopf Bifurcation [M]. Cambridge: U. K. Cambridge University Press, 1981.
- [17] 邓集祥, 刘广生, 边二曼. 低频振荡中的Hopf分岔研究[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(6): 391-394.
- [18] 宋墩文, 杨学涛, 丁巧林, 等. 大规模互电网低频振荡分析与控制方法综述[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 22-28.
- [19] 高磊, 蒋平, 顾伟. 基于多目标优化的电力系统阻尼控制及Hopf分岔控制[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(8): 65-68.
- [20] 王慧铮, 许勇. 基于广域测量系统的低频振荡监测分析方法研究与应用[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 56-61.
- [21] 徐衍会, 马骢, 蔡笋. 基于滤波器的调速系统侧低频振荡抑制措施[J]. 电网技术, 2014, 27(12): 47-50.
- [22] Wies R W, Pierre J W, Trudnowski D J. Use of Arma Block Processing for Estimating Stationary Low Frequency Electromechanical Modes of Power Systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(1): 167-173.
- [23] 石磊, 谈顺涛, 王光. 电力系统低频振荡频率的快速估计算法[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(12): 27-29.
- [24] 陈刚, 段晓, 张继红, 等. 基于ARMA模型的低频振荡模式在线辨识技术研究[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 48-54.
- [25] Hiyama T, Suzuki I N, Funakoshi T. On-line Identification of Power System Oscillation Modes by Using Real Time FFT [C]//IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, January 23-27 2000, Singapore: 1521-1526.
- [26] 竺炜, 马建伟, 曾喆昭, 等. 分段傅里叶神经网络的低频振荡模式识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 40-45.
- [27] 郝思鹏, 袁越, 陈小虎, 等. 用窗口傅里叶脊提取时变振荡信息[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(5): 58-62.
- [28] Huang N, Shen Z, Long S, et al. The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis [J]. Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454(1): 993-995.
- [29] 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.
- [30] 汪颂军, 刘涤尘, 廖清芬, 等. 基于EEMD-NexT的低频振荡主导模式工况在线辨识与预警[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(12): 111-116.
- [31] Hauer J F, Demeure C J, Scharf L L. Initial Results in Prony Analysis of Power System Response Signals [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(1): 80-89.
- [32] 李安娜, 吴熙, 蒋平, 等. 基于形态滤波和Prony算法的低频振荡模式辨识的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 137-142.
- [33] 马燕峰, 赵书强, 刘森, 等. 基于改进多信号Prony算法的低频振荡在线辨识[J]. 电网技术, 2007, 31(15): 44-49.
- [34] Koessler R J, Prabhakara F S, Al-Mubarak A H. Analysis of Oscillations with Eigenanalysis and Orny Techniques [C]. Power Engineering Society General Meeting, 2007.
- [35] 李保宏, 张英敏, 李兴源, 等. 多通道高压直流附加鲁棒控制器设计[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 858-864.
- [36] Ömer N G, Dogan G E. Power-quality Event Analysis Using Higher Order Cumulants and Quadratic Classifiers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 883-889.
- [37] 刘座铭, 王韵然, 高宇, 等. 基于互高阶谱SVD算法的电力系统低频振荡频率估计[J]. 东北电力大学学报(自然科学版), 2007, 27(4): 95-98.
- [38] 余贻鑫, 李鹏. 大区电网弱互联对互联系统阻尼和动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 6-11.

- [39] Pal B C ,Coomick A H ,Cory B J. Robust Damping of Inter - area Oscillations in Power Systems with Superconducting Magnetic Energy Storage Devices [J]. IEEE Proceedings - Generation ,Transmission and Distribution , 1999 ,146(6) : 633 - 639.
- [40] 赵静波 ,雷金勇 ,甘德强. 电池储能装置在抑制电力系统低频振荡中的应用 [J]. 电网技术 ,2008 ,32(6) : 93 - 99 ,108.
- [41] 余保东 ,孙建波 ,汤胜祥 ,等. 湖北电网低频振荡计算分析 [J]. 电力系统自动化 ,2001 ,22(8) : 39 - 42.
- [42] 沈昆仑. 电力系统稳定器 PSS 的参数选择和试验 [J]. 电力系统自动化 ,1998 ,22(2) : 55 - 57.
- [43] 谢小荣 ,肖晋宇 ,童陆园 ,等. 采用广域测量信号的互联电网区间阻尼控制 [J]. 电力系统自动化 ,2004 ,28(2) : 37 - 40.
- [44] Lerch E ,Povh D ,Xu L. Advanced SVC Control for Damping Power System Oscillations [J]. IEEE Transactions on Power System ,1991 ,6(2) : 524 - 535.
- [45] N Martins ,L Lima. Determination of Suitable Locations for Power System Stabilizers and Static Var Compensators for Damping Electromechanical Oscillations in Large Power Systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems ,1990 ,5(4) : 1455 - 1469.
- [46] 谢光龙 ,马智泉 ,张步涵 ,等. 利用并联储能型 FACTS 抑制特高压互联电网功率振荡 [J]. 高电压技术 ,2010 ,36(1) : 237 - 242.
- [47] 李婷 ,吴敏 ,何勇. 计及广域测量系统时滞影响的灵活交流输电系统阻尼控制器多目标设计 [J]. 电工技术学报 ,2014 ,29(8) : 227 - 234.
- [48] 徐梅梅 ,李兴源 ,王渝红 ,等. 德宝直流调制对四川电网阻尼特性的影响 [J]. 电力系统保护与控制 ,2010 ,38(23) : 141 - 146.
- [49] 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) : 91 - 93.
- [50] 周孝法 ,陈陈 ,杨帆 ,等. 基于自适应混沌粒子群优化算法的多馈入直流输电系统优化协调直流调制 [J]. 电工技术学报 ,2009 ,29(4) : 193 - 200.
- [51] 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 ,2007 ,31(1) : 58 - 63.
- [52] 王志芳 ,孙元章 ,张广恕 ,等. 非线性励磁控制器改善华中电网稳定性的仿真分析 [J]. 电网技术 ,1998 ,22(3) : 11 - 13.
- [53] Zabaoui T ,Okou F ,Dessaint L - A ,et al. Time - delay Compensation of a Wide - area Measurements Based Hierarchical Voltage and Speed Regulator [J]. Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering ,2008 (33) : 77 - 85.
- [54] 王成山 ,石颀. 考虑时间延迟影响的电力系统稳定器设计 [J]. 中国电机工程学报 ,2007 ,27(10) : 1 - 6.
- [55] 覃波 ,李兴源 ,胡楠 ,等. 基于信号时滞补偿的 HVDC 和同步发电机的广域协调控制 [J]. 现代电力 ,2014 ,31(3) : 22 - 28.
- [56] 胡楠 ,李兴源 ,杨毅强 ,等. 考虑时变时滞影响的直流广域阻尼自适应控制 [J]. 电网技术 ,2014 ,38(2) : 281 - 287.
- [57] Electric Power Research Institute. HVDC System Control for Damping Subsynchronous Oscillations [M]. New York(USA) : EPRI ,1982.
- [58] 张远取 ,谢小荣 ,姜齐荣. 应用附加励磁阻尼控制抑制 HVDC 引起的次同步振荡 [J]. 电力系统保护与控制 ,2010 ,38(4) : 1 - 5.
- [59] 袁金腾 ,王秀明 ,姜志国. 基于 LMI 的电力系统广域附加阻尼控制 [J]. 东北电力大学学报 ,2009 ,29(4) : 50 - 54.
- [60] 马燕峰 ,赵书强 ,顾雪平. 基于输出反馈和区域极点配置的电力系统阻尼控制器研究 [J]. 电工技术学报 ,2011 ,31(16) : 1 - 7.
- [61] 卢强 ,王仲鸿 ,韩英铎. 输电系统最优控制 [M]. 北京 : 科学出版社 ,1982.
- [62] Zhang Y ,Bose A. Design of Wide - area Damping Controllers for Inter - area Oscillations [J]. IEEE Transactions on Power Systems ,2008 ,23(3) : 1136 - 1143.
- [63] He Jingbo ,Lu Chao ,Wu Xiaochen ,et al. Design and Experiment of Heuristic Adaptive HVDC Supplementary Damping Controller Based on Online Prony Analysis [C]//IEEE PES General Meeting ,USA ,2007 : 1 - 8.
- [64] 杨培宏 ,魏毅立 ,刘文颖 ,等. 基于反演变结构方法的电力系统自适应阻尼控制器设计 [J]. 电力系统保护与控制 ,2011 ,39(24) : 96 - 100.
- [65] 吴小辰 ,陆超 ,贺静波 ,等. 直流广域自适应阻尼控制器设计与 RTDS 实验 [J]. 电力系统自动化 ,2007 ,31(15) : 11 - 16.
- [66] 孙琳 ,李天然 ,钱俊杰 ,等. 基于模糊控制的广域阻尼控制器设计 [J]. 中国电力 ,2015 ,48(6) : 58 - 62.
- [67] Mokhtari M ,Aminifar F ,Nazarpour D ,et al. Wide - area Power Oscillation Damping with A Fuzzy Controller Compensating the Continuous Communication Delay [J]. IEEE Transactions on Power Systems ,2013 ,28(5) : 1997 - 2005.

(下转第 13 页)

特性,防止过电压损坏设备。

3 抑制高电压风险的技术措施

针对上节所分析的偏远地区孤网电压特性,综合考虑已有条件,针对该孤立电网,可行的过电压抑制方法如下:

1) 合理安排运行方式

选择充电无功少的路径为全网供电,减小孤网中长线路的充电无功,使得投入的低压电抗器也相应减小。此时,在 $N-1$ 损失低压电抗器后,系统富余的无功总量就会减小,从而降低系统的运行风险。

2) 低励限制退出运行

由前面理论分析和仿真分析可知,低励限制在某些孤网中不但不会降低发电机进相水平,反而还会加深进相水平,且带来系统的过电压问题。因此,退出低励限制可以使得发电机在孤网运行时获得更好的控制性能和安全性。

3) 紧急控制措施

条件允许情况下,考虑35 kV母线故障后的长线路解列措施,可以在发生 $N-1$ 后降低充电无功,将系统电压维持在安全的水平。

4 结 论

前面提出适用于偏远山区电网长期运行的 $N-1$

(上接第9页)

[68] 马艳峰,赵书强,魏清.基于遗传算法的交直流电力系统稳定器和附加控制器的协调[J].电力自动化设备,2004,24(5):75-79.

[69] Hsu X Y, Luor T S. Damping of Power System Oscillations Using Adaptive Thyristor-controlled Series Compensators Tuned by Artificial Neural Networks[J]. IEEE Proceeding - Generation, Transmission and Distribution, 1999, 146(2): 137-142.

[70] Houck C, Joines J, Kay M. A Genetic Algorithm for Function Optimization: A Matlab Implementation [M]. NCSU-IE TR 95-105, 1995.

[71] 汤广福.基于电压源换流器的高压直流输电技术[M].北京:中国电力出版社,2010.

[72] 李庚银,吕鹏飞,李广凯,等.轻型高压直流输电技术的发展与展望[J].电力系统自动化,2003,27(4):77-80.

[73] 常勇,李晶,张海燕.基于广域信号的柔性直流输电

准则,即发生 $N-1$ 故障后的设备安全准则。对于这类有功备用充足的系统,其长期孤网运行最大风险在于 $N-1$ 故障后的过电压问题。在稳态特性上,偏远山区电网的QV特性与大电网有明显区别,抬升机端电压会导致机组进相水平加深;在动态特性上,低励限制的投入对过电压和机组进相均起到恶化的作用。为了有效应对该电网的过电压风险,可以采取合理安排运行方式、退出低励限制以及紧急解列等措施。

参考文献

[1] 叶健忠,邹俊雄,龙霏,等.地区电网火电机组孤网运行频率控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2012,40(7):123-128.

[2] 张培高,李兴源,李政.孤网频率稳定与控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2012,40(15):143-149.

[3] 滕予非,张华,汤凡,等.偏远地区小电网与主网解列后高频高压风险及抑制策略[J].电力系统保护与控制,2015,43(1):129-136.

作者简介:

孙昕炜(1991),工程师,主要研究方向为电力系统稳定与控制;

史华勃(1987),工程师,主要研究方向为电力系统稳定与控制。

(收稿日期:2017-11-15)

附加阻尼控制[J].中国电力,2009,42(10):33-38.

[74] 张立奎,张英敏,李兴源,等.柔性直流附加鲁棒阻尼控制器设计[J].现代电力,2015,32(2):70-75.

[75] 郑超,周孝信.基于普罗尼辨识的VSC-HVDC附加阻尼控制器设计[J].电网技术,2006,30(17):25-30.

[76] 马锋,李国杰,阮思焯,等.基于线性变参数方法的VSC-HVDC变增益附加阻尼控制器设计[J].电网技术,2009,33(2):73-77.

作者简介:

郭磊(1990),硕士,研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制;

张英敏(1974),博士、副教授、硕士生导师,研究方向为电力系统稳定与控制;

李兴源(1945),博士、教授、博士研究生导师,中国电机工程学会电力系统专委会委员、IEEE高级会员,从事电力系统稳定与控制、高压直流输电研究。

(收稿日期:2017-09-17)