

基于多工况综合留数及 H_2/H_∞ 的多回直流系统阻尼控制鲁棒设计方法

翁 华¹, 徐 政¹, 刘 昇¹, 赵 兵², 董桓锋¹, 许 烽¹

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 直流附加阻尼控制是提高电力系统区域间低频振荡阻尼的有效措施, 但阻尼控制器的安装地点和调制信号的选取是影响阻尼控制器性能的重要因素。综合考虑了控制器安装地点和调制信号组合方案对主导模式的可观可控性、对其他模式的耦合作用和对多种运行工况的鲁棒性3个因素, 提出了多工况综合留数指标来确定最优方案, 所设计控制器的 H_2/H_∞ 综合性能验证了多工况综合留数指标的有效性。最后, 对一个大规模交直流混联系统在多种运行工况、多种故障情况下进行了仿真, 仿真结果验证了基于多工况综合留数和 H_2/H_∞ 的多回直流系统阻尼控制鲁棒设计方法能有效提高系统区间振荡模式的阻尼。

关键词: 电力系统; 综合留数; 阻尼; 低频振荡; 鲁棒控制; 多直流系统

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.07.012

0 引言

跨大区交直流混联系统区域间低频振荡问题是限制交流通道输电能力和威胁系统安全稳定运行的重要因素^[1]。设计合理的直流附加阻尼控制器可以有效提高交直流混联电力系统的区间振荡模式的阻尼^[2-4]。对于含有多回直流输电系统的交直流混联系统, 阻尼控制器的安装地点(安装在哪条直流输电系统的附加控制输入端)和调制信号选取直接关系到阻尼控制器的效果^[5]。

对于阻尼控制器的安装地点和调制信号选取方法的研究, 文献[6-7]从留数幅值的大小来选取 HVDC 和 FACTS 阻尼控制器的调制信号; 文献[8]从提高阻尼控制器单位控制输出量的阻尼效果的角度提出了主模比指标; 文献[9-10]将相对增益矩阵方法应用到 HVDC 及 PSS 调制信号的选取中; 文献[11]利用相对留数比和 RGA 相结合的方法选取 HVDC 和 FACTS 阻尼控制器的调制信号; 文献[12]利用汉克尔奇异值和 RGA 结合的方法为多个 FACTS 选取调制信号。以往研究的一个共同不足就是均通过离线计算单个运行工况下的性能指标来确定最终方案, 而未考虑电力系统不同运行工况给方案的选择带来的影响。

另一方面, 阻尼控制器参数的整定需要获得系统的小干扰模型, 但是由于电力系统运行工况的变动、外界的干扰以及建模误差的原因^[13], 实际电力系统真实的小干扰模型不可能精确得到, 通过辨识方法得到的低阶模型与实际电力系统的小干扰模型存在不确定性。如何设计一个固定控制器, 使得在模型不确定性存在时仍能满足控制品质要求是鲁棒控制所关注的问题^[14-17]。

本文提出了多工况综合留数指标, 用来选取阻尼控制器的安装地点及调制信号组合方案。它综合反映了控制器安装地点和调制信号组合对目标模式的可观可控性、对其他模式的耦合作用和对多种运行工况的鲁棒性3个因素。然后运用具有极点配置约束的 H_2/H_∞ 混合控制设计方法, 设计出抗干扰能力优良、对模型不确定性具有鲁棒性的控制器。

1 多工况综合留数指标理论基础

1.1 可观可控性指标

对于含多直流系统的交直流混联系统, 现采用直流附加控制提升系统主导区间模式的阻尼。对于大规模交直流系统而言, 弱阻尼主导模式主要表现为一个大区中的机群与另一个大区中的机群之间的振荡, 而这个弱阻尼振荡会表现在大区之间的主要交流断面上。因此, 阻尼控制器调制信号可选为主要断面的交流线路的功率信号。系统状态方程表示为^[18]:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}_k u_k \\ \mathbf{y}_j = \mathbf{C}_j \mathbf{x} \end{cases} \quad (1)$$

其中, \mathbf{x} 是状态向量; \mathbf{A} 是系统矩阵; \mathbf{B}_k 是输入矩阵; \mathbf{y}_j 是交流断面线路 j 的功率信号; \mathbf{C}_j 是信号 \mathbf{y}_j 的输出矩阵; u_k 是第 k 条直流的附加控制输入。从 u_k 到 \mathbf{y}_j 之间的传递函数可以用留数和特征值的形式来表示:

收稿日期: 2013-08-05; 修回日期: 2014-05-08

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011-AA05A119); 国家电网公司大电网重大专项资助项目课题(SGCC-MPLG001-031-2012); 2012年教育部博士研究生学术新人奖

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2011AA05-A119), State Grid Corporation of China, Major Projects on Planning and Operation Control of Large Scale Grid (SGCC-MPLG001-031-2012) and Scholarship Award for Excellent Doctoral Student Granted by the Ministry of Education in 2012

$$G_{jk}(s) = \sum_{i=1}^n \frac{R_{ijk}}{s - \lambda_i} \quad (2)$$

$$R_{ijk} = C_j t_i v_i B_k \quad (3)$$

其中, λ_i 是第 i 个特征值; t_i 、 v_i 分别是 λ_i 对应的右特征向量和左特征向量; R_{ijk} 是从 u_k 到 y_j 关于 λ_i 对应的留数,它反映了从 u_k 到 y_j 对于第 i 个模式的可观和可控的性能。

1.2 多模式主模比指标

在实际电力系统中,直流附加控制器以及调制信号的选择不仅需考虑对某个主导模式的可观和可控性,还需考虑所设计的控制器对其他模式阻尼的影响。对于大规模交直流系统,需采用多回直流系统来提升多个振荡模式的阻尼,一般简单的思路采用单输入单输出的设计方法,即采用一回直流系统提高一个主导模式的阻尼,其他直流线路针对其他模式,各直流之间分工明确。为此在设计阻尼控制器时,不仅要求对目标模式有明显提升阻尼的作用,而且要对其他模式的耦合影响小。耦合作用的大小可近似用主模比指标来衡量,主模比指标定义如下^[8,19]:

$$\eta_{jk} = \frac{R_{djk}}{\sum_{i=1}^n R_{ijk}} \quad (4)$$

其中, R_{djk} 为从指定控制输入 u_k 到调制信号 y_j 对应的目标模式的留数幅值。主模比的意义在于: η_{jk} 越接近于 1,说明通过控制输入 u_k (即将阻尼控制器安装在第 k 条直流的附加控制输入) 和调制信号 y_j 来设计控制器时,在有效地提高目标模式的阻尼时,对其他模式的阻尼影响小;反之, η_{jk} 越接近于 0,说明通过控制输入 u_k 和调制信号 y_j 来设计控制器时,对其他模式的阻尼影响大。

1.3 多运行工况留数比指标

可观可控性指标和多个模式主模比指标均是某个特定工况下衡量直流附加阻尼控制器安装地点及调制信号组合性能的指标。对于特定的运行工况,阻尼控制器的性能很大程度上取决于开环传递函数中主导模式对应的留数幅值。但由于电力系统运行工况会因不同季节机组出力不同、故障等发生变化,主导模式的留数也会随着变化。若从 u_k 到 y_j 的传递函数对应主导模式的留数在多种运行工况下均保持较大数值且变化不大,则选择 u_k 作为控制输入、 y_j 作为调制信号设计控制器时除了可控、可观性均较好外,对运行工况也具有较好的鲁棒性^[20]。对运行工况的鲁棒性用多工况留数比指标来衡量,定义如下:

$$\xi_{jk} = \frac{R_{djk, \min}}{R_{djk, \max}} \quad (5)$$

其中, $R_{djk, \min}$ 、 $R_{djk, \max}$ 分别对应多种运行工况下 R_{djk} 的最小值和最大值。 ξ_{jk} 越接近于 1,说明 R_{djk} 受运行工

况的影响越小,选择 u_k 作为控制输入且选择 y_j 作为调制信号设计控制器时具有较好的鲁棒性。

1.4 多运行工况综合留数指标

为此,综合考虑上面 3 个因素,定义多工况综合留数指标来选择直流附加控制器安装地点和调制信号。多工况综合留数指标定义为主导模式留数的幅值与主模比、多工况留数比指标的乘积:

$$A_{jk} = R_{djk} \eta_{jk} \xi_{jk} = \frac{R_{djk}^2 R_{djk, \min}}{\sum_{i=1}^n R_{ijk} R_{djk, \max}} \quad (6)$$

它综合反映了控制输入 u_k 和调制信号 y_j 组合对主导模式的可观可控性、对其他模式的耦合作用和对多种运行工况的鲁棒性。对于相同量纲的调制信号,如果 A_{jk} 越大,则选择 u_k 作为控制输入和调制信号 y_j 组合来提升目标模式的阻尼的效果越好,对其他模式的耦合作用也小,对多种工况的鲁棒性也较好。

2 多工况下 H_2/H_∞ 鲁棒控制设计方案

2.1 多目标 H_2/H_∞ 混合控制方法

为了使得设计出来的阻尼控制器具有良好的鲁棒性能,这里采用 H_2/H_∞ 混合控制设计方法。对于图 1 所示的被控对象,希望设计鲁棒控制器 $K(s)$,使得闭环系统渐近稳定,并且具有以下优良性能:从 w 到 z_∞ 的传递函数 T_∞ 的 H_∞ 范数尽可能小,以保证闭环系统对跟踪误差、外界干扰抑制能力、模型不确定性的鲁棒性等品质要求;从 w 到 z_2 的传递函数 T_2 的 H_2 范数尽可能小,以保证闭环系统对 H_2 最优性能的品质要求^[21]。因此,综合考虑上面 2 个因素,用 H_2/H_∞ 混合控制设计方法设计鲁棒控制器的目标为使性能指标 $\sqrt{\alpha \|T_\infty\|_\infty^2 + \beta \|T_2\|_2^2}$ 达到最小。其中 α 和 β 为加权系数。上述问题可以描述为,设计一个控制器 $K(s)$ 使得闭环系数极点在矩阵不等式 LMI (Linear Matrix Inequality) 极点配置区域约束条件下使下面的指标达到最优:

$$J = \min_{K \text{ stabilising}} \{ \sqrt{\alpha \|T_\infty\|_\infty^2 + \beta \|T_2\|_2^2} \} \quad (7)$$

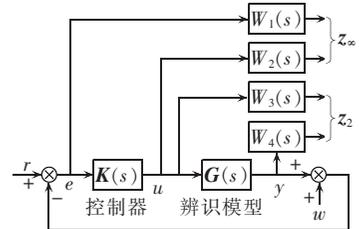


图 1 H_2/H_∞ 混合控制的结构图

Fig.1 Configuration of mixed H_2/H_∞ control

值得注意的是,性能指标 J 不仅能反映设计出来的控制器的综合性能,还可用于比较不同选取方案的优劣。对于不同阻尼控制器安装地点和调制信号选取方案,在相同边界条件下设计出来的指标 J 越小,

意味着对应的选取方案越好。

2.2 多工况下系统稳定的小增益定理

随着电力系统运行工况的变动,实际电力系统的小干扰模型也会发生改变;另一方面,用辨识方法得到的小干扰模型与真实模型之间本身就存在截断误差。假设 $G_d(s)$ 和 $G(s)$ 分别表示电力系统运行中的小干扰真实模型和通过离线数据辨识得到的 N 阶截断模型的传递矩阵,如图 2 所示。

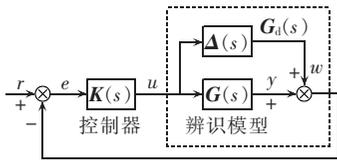


图 2 鲁棒控制器的加法摄动模型结构图
Fig.2 Additive perturbation configuration of robust controller

建模误差为:

$$\Delta(s) = G_d(s) - G(s) \quad (8)$$

其中, $\Delta(s)$ 表示随着运行工况的改变,真实模型与离线辨识模型之间的差距。对于单输入单输出系统,根据小增益定理^[14],图 2 所示的系统在工况改变的摄动下仍保持稳定的充要条件为:

$$\|R(s)\|_{\infty} = \|K(I + GK)^{-1}\|_{\infty} < \frac{1}{\|\Delta\|_{\infty}} \quad (9)$$

其中, $\|R(s)\|_{\infty}$ 为图 1 中从 w 到 u 的闭环传递函数的 H_{∞} 范数。若所设计的控制器使 $\|R(s)\|_{\infty}$ 越小,则控制器对运行工况的变化有越大的鲁棒性。因此,要保证所设计的控制器对运行工况有较大的鲁棒性,加权函数 $W_2(s)$ 相对于其他加权函数应选择相对较大。

2.3 LMI 区域极点配置

闭环系统的动态响应特性与系统的主导极点的位置直接相关。对于电力系统低频振荡问题而言,一般要求闭环系统的阻尼比要达到一定要求,另一方面,系统故障后恢复到稳态运行的调节时间主要取决于最靠近虚轴的闭环极点的实部,因此,闭环系统的特征值离虚轴不能太近。本文将具有极点配置约束的 H_2/H_{∞} 混合控制设计方法用于抑制区间振荡的直流系统附加阻尼控制器设计,考虑到电力系统区间振荡的频率较低,将期望极点配置为图 3 所示的区域。

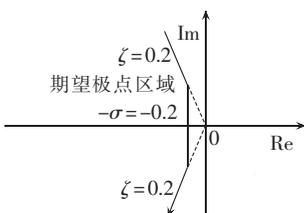


图 3 LMI 极点配置区域
Fig.3 LMI pole placement region

3 在三华联网中仿真算例

以 2015 年丰大方式三华联网规划数据作为研究对象,具体网架结构如图 4 所示。根据网架结构图可知,2015 年将有 4 回直流从四川电网送出,德宝直流输送功率为 1500 MW;锦苏直流输送功率为 7200 MW;向上直流输送功率为 6400 MW;浙西直流输送功率为 7500 MW。川渝断面交流通道输送容量为 11500 MW,包括乐山—重庆特高压、黄岩—万县 500 kV、洪沟—板桥 500 kV 交流线路;3 回交流线路从重庆电网送到华中电网,分别为万县—荆门特高压、奉节—龙泉 500 kV、张家坝—恩施 500 kV 交流线路。模态分析结果表明,系统存在频率为 0.25 Hz、阻尼比为 0.07 的区间主导模式,表现为四川电网与华中、华北电网之间的振荡,四川方面主要参与机组为二滩、官地、瀑布沟、锦屏、溪左等电厂。

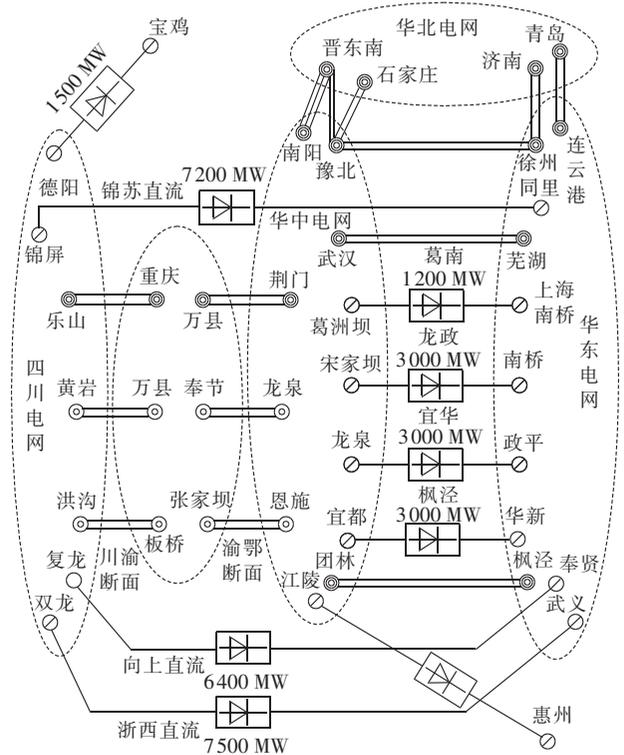


图 4 2015 年三华联网主网架
Fig.4 Backbone of East China, North China and Central China Power Grid in 2015

为了考虑系统多种运行工况下的留数相关指标,设计了 3 种运行工况,分别为:正常运行工况,川渝交流断面送电 11500 MW;轻载运行工况,川渝交流断面送电 6500 MW;特高压断线后的运行工况,川渝交流断面送电 11500 MW,万县—荆门特高压线路一回断开运行。考虑到四川电网与华中、华北电网之间的弱阻尼振荡会表现在交流断面的功率信号上,因此将川渝、渝鄂交流断面的功率信号作为阻尼控制器的备选调制信号。针对 0.25 Hz 的主导模式,

分别计算留数、主模比、多工况留数比以及多工况综合留数指标,计算结果见表 1—4。

表 1 主导模式的留数指标
Tab.1 Residues of dominant mode

直流	洪沟— 板桥	黄岩— 万县	乐山— 重庆	奉节— 龙泉	张家坝— 恩施	万县— 荆门
向上	0.076	0.081	0.136	0.064	0.054	0.224
锦苏	0.074	0.080	0.136	0.064	0.054	0.222
浙西	0.072	0.076	0.128	0.062	0.052	0.214
德宝	0.024	0.026	0.044	0.020	0.018	0.070

表 2 主导模式的主模比指标
Tab.2 Residue ratios of dominant mode

直流	洪沟— 板桥	黄岩— 万县	乐山— 重庆	奉节— 龙泉	张家坝— 恩施	万县— 荆门
向上	0.337	0.394	0.394	0.372	0.325	0.426
锦苏	0.354	0.407	0.395	0.384	0.339	0.437
浙西	0.306	0.362	0.362	0.339	0.290	0.397
德宝	0.480	0.486	0.496	0.493	0.452	0.544

表 3 主导模式的多工况留数比指标
Tab.3 Residue ratios of dominant mode
under multiple operating conditions

直流	洪沟— 板桥	黄岩— 万县	乐山— 重庆	奉节— 龙泉	张家坝— 恩施	万县— 荆门
向上	0.416	0.338	0.486	0.253	0.234	0.528
锦苏	0.393	0.345	0.484	0.261	0.243	0.551
浙西	0.351	0.296	0.430	0.216	0.195	0.462
德宝	0.578	0.460	0.674	0.362	0.334	0.747

表 4 主导模式的多工况综合留数指标
Tab.4 Synthetic residues of dominant mode
under multiple operating conditions

直流	洪沟— 板桥	黄岩— 万县	乐山— 重庆	奉节— 龙泉	张家坝— 恩施	万县— 荆门
向上	0.0107	0.0106	0.0260	0.0060	0.0041	0.0503
锦苏	0.0103	0.0112	0.0260	0.0064	0.0044	0.0535
浙西	0.0078	0.0081	0.0199	0.0045	0.0029	0.0393
德宝	0.0067	0.0058	0.0147	0.0036	0.0027	0.0285

由表 1—4 可以看出,若单纯考虑留数指标,则应选择万县—荆门特高压交流线路功率作为调制信号,阻尼控制器安装在向上直流;若单纯考虑主模比指标,则阻尼控制器应安装在德宝直流且选择万县—荆门特高压交流线路功率作为调制信号;若综合考虑留数、主模比及多工况留数比指标,则由表 4 可知,阻尼控制器应安装在锦苏直流且选择万县—荆门特高压交流线路功率作为调制信号。

控制器设计目标为将主导模式的阻尼比提升至 0.2 并使式(7)对应的性能指标最小,选用相同加权函数,通过 MATLAB 鲁棒控制工具箱具有极点配置约束的 H_2/H_∞ 混合控制设计方法设计出阻尼控制器。为了直观地比较阻尼控制器安装地点和调制信号不同时设计出来的阻尼控制器的综合性能,采用式(7)的指标来衡量不同选择方案的综合性能优劣。调制

信号统一采用万县—荆门特高压交流线路功率,然后将控制器安装地点分别选为向上、锦苏、浙西及德宝直流的附加控制接口作为 4 种比较方案,分别计算式(7)的性能指标,结果见表 5,指标越小,说明对应的方案越好。根据表 5 中的指标可知,3 种运行工况下,4 种方案的优劣程度均是锦苏>向上>浙西>德宝,这与表 4 最后一列多工况综合留数指标从大到小的排序一致。由于对所有阻尼控制器安装地点及调制信号都设计控制器并计算式(7)的性能指标过于复杂,故在实际选择合适的阻尼控制器安装地点及调制信号时,可直接参照表 4 中的结果,优先选择多工况综合留数指标最大的方案作为最优组合方案。

表 5 不同工况下控制器安装在不同直流的
综合性能指标

Tab.5 Synthetic performance of damping controllers
located at different HVDC links under different
operating conditions

运行工况	向上	锦苏	浙西	德宝
正常	2.74	2.72	2.84	8.64
轻载	3.92	3.77	4.54	8.43
特高压单回运行	2.54	2.52	2.62	7.96

结合表 5 和表 1—4 可知,单纯根据留数、主模比指标来确定阻尼控制器的安装地点及调制信号均不能使式(7)对应的综合性能指标达到最优;而根据多工况综合留数信息,可以综合考虑控制器对主导模式的可观可控性、对其他模式的耦合作用和对多种运行工况的鲁棒性。

为了进一步检验多工况综合留数指标以及基于 H_2/H_∞ 的鲁棒控制器设计方法的有效性,在多种运行方式的大扰动下比较采用本文的控制设计方法设计出的阻尼控制器(调制信号选择万县—荆门特高压交流双回线路功率,阻尼控制器安装在锦苏直流)安装前后以及采用传统极点配置方法设计出的阻尼控制器安装后的系统动态响应。在正常运行方式下,通过辨识方法得到系统的开环传递函数为:

$$G(s) = \frac{-0.18s^3 - 1.71s^2 - 1.34s - 4.73}{s^4 + 1.27s^3 + 6.04s^2 + 3.27s + 8.17} \quad (10)$$

采用本文的设计方法设计出来的阻尼控制器的结构及参数如图 5 所示,调制功率限幅按直流系统额定容量的 $\pm 5\%$ 整定。传统极点配置方法设计阻尼控制器的流程见文献[22],为了便于比较不同方法设计的阻尼控制器在同一条件下的效果,将极点配置方法设计出的控制器在 0.1~2.0 Hz 频段内的最大增益

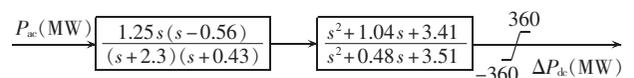
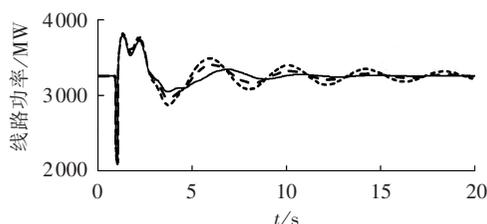


图 5 阻尼控制器结构及参数

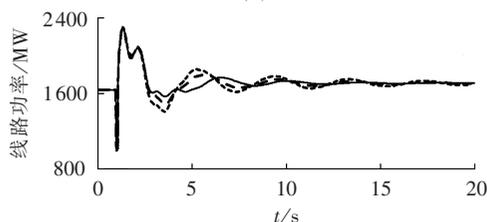
Fig.5 Configuration and parameters of damping controller

限定为与图 5 所示的阻尼控制器的最大增益一致。

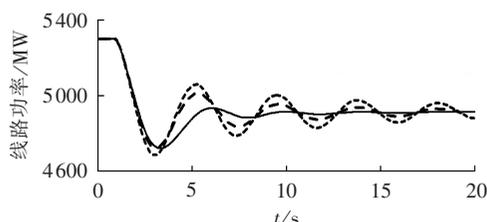
考虑 3 种运行工况下的不同故障:故障 1,即在正常运行工况下,在张家坝母线施加 0.1s 三相瞬时短路故障;故障 2,即在轻载运行工况下,在张家坝—恩施线路施加三相永久短路故障,0.1s 后切除单相故障;故障 3,即在特高压断线后的运行工况,溪左电厂掉一台机 770 MW。此时万县—荆门特高压交流线路的功率响应情况如图 6 所示。



(a) 故障 1



(b) 故障 2



(c) 故障 3

— 本文控制方法, - - - 无阻尼控制, - · - 传统控制方法

图 6 不同运行工况及不同故障下万县—荆门线路的功率响应曲线

Fig.6 Active power response curves of Wanxian-Jingmen AC line to different faults under different operating conditions

从图 6 中可看出,所选的阻尼控制器安装地点及调制信号方案在多种工况多种故障下都能有效抑制系统的区间振荡主导模式,并且本文采用的具有极点配置约束的 H_2/H_∞ 混合控制设计方法设计出的阻尼控制器的性能比通过传统极点配置方法设计出的阻尼控制器更优。

4 结论

对于含多回直流的交直流混联系统,直流附加阻尼控制器的安装地点、调制信号的选取和控制器的设计方法直接关系到阻尼控制器控制效果,本文结合三华电网实例分析,得出以下结论:

a. 本文综合考虑了控制器对主导模式的可观可控性、对其他模式的耦合作用和对多种运行工况的鲁

棒性,提出了用多工况综合留数指标来选择控制器安装地点及调制信号,通过比较综合性能指标验证了直流附加阻尼控制器的安装地点、调制信号的选取方案是有效、可行的;

b. 考虑到系统运行工况会发生改变,本文采用了具有极点配置约束的 H_2/H_∞ 混合控制设计方法设计出鲁棒阻尼控制器,并在多种工况多种故障下验证了设计出来的直流鲁棒阻尼控制器能有效提高大规模交直流系统的区间振荡模式的阻尼。

参考文献:

- [1] 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.
YU Yixin,LI Peng. The impact of weak interconnection of bulk power grids to damping and dynamic stability of power systems [J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(11):6-11.
- [2] 王洪涛,施鹏程,胡辉祥. 天广直流附加稳定控制策略研究[J]. 电力自动化设备,2011,31(8):90-93.
WANG Hongtao,SHI Pengcheng,HU Huixiang. Additional stability function for Tian-Guang HVDC project [J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(8):90-93.
- [3] 毛晓明,张尧,管霖,等. 南方交直流混合电网区域振荡的协调控制策略[J]. 电力系统自动化,2005,29(20):59-63.
MAO Xiaoming,ZHANG Yao,GUAN Lin,et al. Research on coordinated control strategy for inter-area oscillations in China [J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(20):59-63.
- [4] 黄莹,徐政. 基于同步相量测量单元的直流附加控制器研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(9):11-16.
HUANG Ying,XU Zheng. HVDC supplementary controller based on synchronized phasor [J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(9):11-16.
- [5] 李春艳,孙元章,彭晓涛. 大型电力系统中广域阻尼控制器的配置和反馈信号选择[J]. 电力自动化设备,2009,29(2):21-25.
LI Chunyan,SUN Yuanzhang,PENG Xiaotao. Allocation and feedback signal selection of wide-area damping controller in large scale power systems [J]. Electric Power Automation Equipment, 2009,29(2):21-25.
- [6] LI Y,REHTANZ C,RUBERG S,et al. Wide-area robust coordination approach of HVDC and FACTS controllers for damping multiple interarea oscillations [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012,27(3):1096-1105.
- [7] 孙元章,肖峰,袁野,等. 基于留数的广域阻尼控制协调优化设计 [J]. 电力自动化设备,2009,29(10):1-7.
SUN Yuanzhang,XIAO Feng,YUAN Ye,et al. Coordinated optimization design for wide area damping control based on residue [J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(10): 1-7.
- [8] 贺静波,李立涅,陈辉祥,等. 基于广域信息的电力系统阻尼控制器反馈信号选择[J]. 电力系统自动化,2007,31(9):6-10.
HE Jingbo,LI Licheng,CHEN Huixiang,et al. Selection of feedback signal for power system damping controller based on wide area measurements [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007,31(9):6-10.
- [9] 汪娟娟,张尧. 相对增益矩阵原理在多直流附加调制信号选取中的应用[J]. 中国电机工程学报,2009,29(1):74-79.

- WANG Juanjuan,ZHANG Yao. Application of relative gain array principle in selecting modulation signals of multiple HVDC supplementary controllers [J]. Proceedings of the CSEE, 2009,29(1):74-79.
- [10] MILANOVIC X J V,DUQUE A C S. Identification of electromechanical modes and placement of PSSs using relative gain array[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2004,19(1):410-417.
- [11] LI Y,REHTANZ C,RUBERG S,et al. Assessment and choice of input signals for multiple HVDC and FACTS wide-area damping controllers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012,27(4):1969-1977.
- [12] FARSANGI M M,SONG Y H,LEE K Y. Choice of FACTS device control inputs for damping interarea oscillations [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2004,19(2):1135-1143.
- [13] 翁华,徐政,许烽,等. 基于广域测量信息的 HVDC 鲁棒控制器设计[J]. 中国电机工程学报,2013,33(4):103-109.
WENG Hua,XU Zheng,XU Feng,et al. Robust design of HVDC supplementary controllers based on WAMS signals [J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(4):103-109.
- [14] GU D,PETKOV H P,KONSTANTINOV M M. Robust control design with MATLAB[M]. London,UK:Springer,2005:25-30.
- [15] 赵睿,李兴源,刘天琪,等. 抑制次同步和低频振荡的多通道直流附加阻尼控制器设计[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):89-93.
ZHAO Rui,LI Xingyuan,LIU Tianqi,et al. Design of multi-channel DC supplementary damping controller for subsynchronous and low-frequency oscillation suppression[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(3):89-93.
- [16] 付红军,潘励哲,林涛,等. 基于改进模拟植物生长算法的 PSS 与直流调制的协调优化[J]. 电力自动化设备,2013,33(11):75-80.
FU Hongjun,PAN Lizhe,LIN Tao,et al. Coordinative optimization of PSS and DC-modulation based on improved PGSA[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(11):75-80.
- [17] 陈中,胡吕龙. 基于阻尼转矩分析法的多广域阻尼控制器多模式交互影响分析[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):92-96.
CHEN Zhong,HU Lulong. Interaction of multiple wide-area damping controllers based on DTA method[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(11):92-96.
- [18] CHANG Y,XU Z. A novel SVC supplementary controller based on wide area signals [J]. Electric Power Systems Research, 2007,77(12):1569-1574.
- [19] 李红军,陆超. 抑制联络线振荡的广域阻尼控制[J]. 电力建设, 2011,32(4):1-6.
LI Hongjun,LU Chao. Wide-area damping control for inter-tie line low frequency oscillation [J]. Electric Power Construction, 2011,32(4):1-6.
- [20] 常勇. 基于广域测量系统的电力系统阻尼控制与监视研究[D]. 杭州:浙江大学,2007.
CHANG Yong. Study on damping control and monitoring methods for inter-connected power systems based WAMS [D]. Hangzhou:Zhejiang University,2007.
- [21] 王德进. H_2 和 H_∞ 优化控制理论 [M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2001:214-229.
- [22] KUNDUR P. Power system stability and control [M]. New York, USA:McGraw-Hill Inc,1994:1151-1160.

作者简介:



翁华

翁华(1986-),男,浙江龙游人,博士研究生,研究方向为交直流柔性协调控制、动态等值(E-mail:wenghua@zju.edu.cn);

徐政(1962-),男,浙江海宁人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为大规模交直流电力系统分析、直流输电与柔性交流输电、电力谐波与电能质量、风力发电技术与风电场并网技术。

Robust design of multi-HVDC system damping control based on synthetic residues of multiple operating conditions and H_2/H_∞

WENG Hua¹, XU Zheng¹, LIU Sheng¹, ZHAO Bing², DONG Huangfeng¹, XU Feng¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: HVDC supplementary damping control is an effective measure to improve the damping of inter-area low-frequency oscillation, but the installation location of damping controller and the selection of input signal are key influencing factors on the performance of damping controllers. A synthetic residues index of multiple operating conditions is proposed to determine the optimal combination of installation location and input signal, which comprehensively considers the controllability and observability of dominated mode, the coupling effect on other modes and the robustness under various operating conditions. Its effectiveness is verified by the comprehensive H_2/H_∞ performance of the designed damping controller. Simulations are carried out for a large-scale AC/DC hybrid power system with multiple faults under multiple operating conditions and results verify that, the robust design of multi-HVDC system damping control based on the synthetic residues of multiple operating conditions and the H_2/H_∞ improves effectively the damping in inter-area low-frequency oscillation mode.

Key words: electric power systems; synthetic residue; damping; low-frequency oscillation; robust control; multi-HVDC system