

利用模态分解法设计的PSS以及TCSC联合抑制系统低频振荡

利用特高压进行远距离输电或者大区电网的互联都可能产生低频振荡现象而影响系统的稳定运行。运用PSS以及FACTS装置均能很好地抑制系统低频振荡,但是如何消除各PSS之间以及PSS与FACTS装置之间的交互影响一直备受关注。提出利用PSS以及TCSC联合抑制特高压大电源系统接入电网时产生的低频振荡问题,通过模态分解的方法对控制器进行逐一设计,利用PSS抑制系统区间振荡模式,TCSC阻尼控制器抑制区间振荡模式,同时在PSASP仿真软件上搭建的锡盟特高压大电源外送系统上对所设计的控制器进行仿真验证,仿真结果表明该方法相比于传统的留数方法设计的控制器更加有效,各控制器之间几乎没有交互作用,很好地解决了控制器间的交互影响,最后在系统三种不同运行方式上仿真分析表明所设计的控制器具有较好的鲁棒性。利用此方法设计的控制器克服了传统方法不足,但相比于各智能算法对控制器参数进行最优协调而言,该方法简单实用,且更具实际应用价值。

覃波 李兴源/四川大学电气信息学院 王大刚/国网四川省电力公司达州分公司 刘林/广西防城港核电有限公司



覃波/硕士研究生

我国能源消费与能源资源呈逆向分布,特别是西南、三北风电和太阳能的大规模开发,决定了我国电力西电东送的格局^[1-4]。因此,发展具有大容量、长距离、低损耗和有效利用输电走廊的特高压输电是我国电网发展的必然选择^[5-6]。我国也在2009年初建成投运了代表世界最高水平的1 000 kV晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程^[7]。

在引入特高压输电系统提高电网运行经济性的同时,系统中也形成了多组耦合紧密的发电机群弱联系的结构,为

国家863高技术基金项目(2011AA05A119),国家电网公司大电网重大专项资助项目课题(SGCC-MPLG001(003-027)-2012)。

了改善系统的暂态稳定性必将大量采用快速励磁系统^[8],而这会导致互联系统阻尼不足,也大大增加了出现低频振荡的风险。

电力系统稳定器PSS是最常见的抑制低频振荡的有效手段^[9],但是对区域间低频振荡的阻尼效果不佳。随着电力电子技术的发展,柔性交流输电系统(FACTS)的出现弥补了PSS对区域间振荡阻尼效果不佳的缺点,为抑制区域间振荡提供了新的手段^[10-12]。

当系统同时装有PSS和FACTS控制器时,如何协调控制器间存在着交互作用是关注的重点。文献[13]采用改进的遗传算法对PSS和TCSC控制器进行协调控制;文献[14]采用轨迹灵敏度技术计算转速及电压变化量对PSS参数和SVC控制器参数的梯度,并采用共轭梯度法优化各参数。

但是这些方法理论复杂,尤其是各种先进优化算法,并不易于工程实际中的应用。利用传统的留数方法很难协调好PSS以及FACTS参数。本文采用了PSS和TCSC阻尼控制器联合控制特高压外送系统接入电网时产生的低频振荡问题,利用模态分解的方法对PSS和TCSC阻尼控制器逐一进行设计,使单一PSS抑制某特定的区域内振荡模式,而TCSC阻尼控制器抑制区域间的振荡模式,各控制器之间并不产生交互作用。同时在PSASP上搭建的特高压大电源外送系统上对本文提出的方法与传统留数法进行仿真比较分析,仿真结果论证了该方法能更好

关键词/Keywords

特高压·
低频振荡·
模态分解·

地抑制系统低频振荡，并具有一定的鲁棒性。本文的方法不仅弥补了传统方法不足，相比于利用智能算法对控制器参数进行优化也更简单实用，尤其是针对实际工程，更具实际应用价值。

特征值分析法及其在PSS以及TCSC中的运用

1. PSS和TCSC阻尼控制器抑制低频振荡原理分析

PSS的基本工作原理是通过附加稳定信号对励磁进行控制，从而实现对励磁电流的实时调节，同时向发电机转子的振荡提供阻尼，实现发电机机端电压的改变，最终达到控制系统有功功率的目标。

图1为PSS阻尼系统低频振荡的传递函数框图，并考虑了励磁系统的作用。励磁系统的输入包含了发电机的机端电压 U_T 、PSS的输出信号 U_S 以及参考电压 U_R 。 K_A 和 T_A 分别为励磁系统的放大增益以及时间常数。

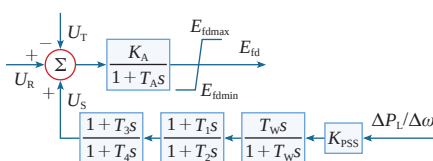


图1 含有励磁系统的PSS传递函数结构框图

PSS的输入信号可以选择为交流联络线的功率变化 ΔP_L 或者发电机的转速差 $\Delta\omega$ ； K_{PSS} 为PSS的放大增益；而隔直环节可以隔开恒定的直流分量，以使PSS在输入发生变化时才起作用， T_w 为相应的隔值时间常数；相位补偿环节可以提供适当的相位超前特性以补偿励磁机输入和发电机电气转矩之间的相位滞后^[13]， T_1 和 T_3 为超前校正时间常数， T_2 和 T_4 为滞后校正时间常数。

图2为TCSC加装于电网的简单示意图，两台机组通过一条交流线路连接，根据图2中的数据可得到线路传输的有功功率的相应表达式为

$$P = \frac{U_1 U_2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)}{X_L - X_C} \quad (1)$$

式中， U_1 、 U_2 分别为对应母线的电压幅值； φ_1 、 φ_2 分别为对应母线的电压相角； X_L 为线路联络线的等

效阻抗； X_C 为串联的TCSC的等效阻抗； P 为联络线传输的有功功率。

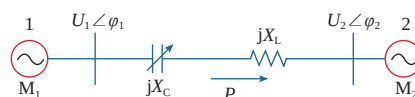


图2 带有TCSC的两机互联系统

TCSC的主要功能分为潮流控制以及附加稳定控制，其输出为一个可变的阻抗。正常运行时，TCSC的等效阻抗接近设定的目标阻抗值，当系统发生故障时，TCSC能够迅速地调节其等效阻抗的大小，改变联络线的等效阻抗，实现线路潮流的改变，并改变系统的输送能力。同时针对系统发生的低频振荡，TCSC能够增加系统的阻尼使系统振荡更快地衰减阻尼系统的振荡。

本文设计的TCSC阻尼控制器的传递函数如图3所示。图3中， ΔP_L 为联络线的功率改变量， ΔP_L 通过增益放大、隔值环节、两个移相环节以及限幅环节后，TCSC阻尼控制器的输出为线路可变阻抗 ΔZ 。

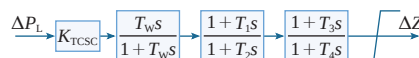


图3 TCSC阻尼控制器的传递函数

2. 特征值分析法

对一个 n 阶单输入单输出系统进行线性化处理后的状态系统空间方程模型为

$$\dot{x} = Ax + B_i u_i \quad (2)$$

$$y_i = C_i x \quad (3)$$

式中， x 为状态变量， $x \in R^n$ ； A 为状态矩阵的系数矩阵； u_i 和 y_i 分别为第 i 台发电机的输入和输出矩阵； B_i 和 C_i 分别为输入输出矩阵的系数矩阵。因此可得到如下包含 A 的方程为

$$AM = MA \quad (4)$$

$$MN^T = I \quad (5)$$

式中， N 和 M 分别为系统的左右特征相量，有如下的定义

$$N = [n_1, n_2, \dots, n_n] \quad (6)$$

$$M = [m_1, m_2, \dots, m_n] \quad (7)$$

对角矩阵 Λ 如下定义

$$\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) \quad (8)$$

式中, $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 为与 A 对应的特征值, 并假定第 i 台发电机为开环回路。

3. 根据留数法设计的PSS以及TCSC阻尼控制器

文中的PSS以及TCSC阻尼控制器具有类似的结构, 以PSS的设计为例进行说明, TCSC的设计与PSS设计类似。

系统的传递函数可以表示为

$$G_i(s) = \frac{y_i}{u_i} = \sum_{j=1}^n \frac{R_{ji}}{(s - \lambda_j)} \quad (9)$$

式中, R_{ji} 为与第 j 个模态 (λ_j) 相关的留数, 可用如下方程进行计算, 即

$$R_{ji} = C_i m_j n_j^T B_i \quad (10)$$

当在第 i 台发电机上安装PSS时, 第 j 个特征值的改变量如下计算

$$\Delta \lambda_j = R_{ji} K_{PSSi} A_{PSSi}(\lambda_j) \quad (11)$$

式中, K_{PSSi} 和 $A_{PSSi}(\lambda_j)$ 分别为PSS的放大倍数以及相位超前滞后环节, 为了将第 j 个模态移至复平面的左半平面, 同时不改变模态的频率, 所需补偿的相位大小可利用如下方程求得

$$\arg[A_{PSSi}(\lambda_j)] = 180^\circ - \arg[R_{ji}] \quad (12)$$

从而可以得到第 j 个模态的实部的变化量

$$\Delta \sigma_j = K_{PSSi} |R_{ji} A_{PSSi}(\lambda_j)| \quad (13)$$

对于单输入单输出控制器, 可以通过留数分析法得到本地振荡模态或者区域间的振荡模态所需补偿的相位。因此用留数分析法可以很好地设计PSS以及TCSC阻尼控制器。但是即使通过很好优化调节, 通过留数法设计的PSS和TCSC阻尼控制器仍然会对控制回路中所有可观测以及可控制的模态产生影响。同时对于多输入多输出的控制器, 由于各控制器之间的相互影响作用, 仅通过留数分析法不能够很好地确定各个单一的控制器的补偿相位。

模态分解方法对PSS以及TCSC阻尼控制器的设计

上文中提到的方法虽然可以通过留数信息较简单地对控制器进行设计, 但是一个利用传统留数方法针对某单一模态设计的阻尼控制器同时也

会对其他的模态产生影响, 甚至出现几个阻尼控制器之间的交互影响而对控制器的阻尼效果产生削弱的情况。为了防止这种情况的出现, 可以依次对每个控制器进行单独的设计。文中提出了一种利用模态分解的思想来消除阻尼控制器间的交互影响。

1. 模态分解以及控制方法

定义简单的变换如下

$$x = Mz \quad (14)$$

式中, z 为新的坐标下的状态变量。

则通过式 (2) 可以得到相应的导数形式

$$\dot{z} = M^{-1} A M z + M^{-1} B u_i = \Lambda z + N^T B_i u_i \quad (15)$$

根据式 (3)、式 (5) 以及 (14) 可以推导出反馈信号为

$$y_i = C_i M z = \sum_{j=1}^n C_i m_j z_j \quad (16)$$

如果 y_i 为只包含某单一的模态信息的信号, 即 $y_i = C_i m_j z_j$, 其中 z_j 为矩阵 z 的第 j 个元素。反馈控制规律可定义为

$$u_i = K_i A_i(s) y_i = K_i A_i(s) C_i m_j z_j \quad (17)$$

式中, K_i 和 A_i 可分别为第 i 台发电机上安装的PSS放大增益环节以及相位补偿环节。如果该模态为区域间阻尼振荡模态, 则 K_i 和 A_i 分别为TCSC阻尼控制器的放大环节以及相位补偿环节。

根据式 (17), 状态空间方程式 (15) 能够进行如下的转换

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \Lambda z + N^T B_i K_i A_i(s) C_i m_j z_j \\ &= \Lambda z + N^T B_i [0 \ 0 \ \dots \ K_i A_i(s) C_i m_j \ \dots \ 0] z \\ &= \Lambda z + [0 \ 0 \ \dots \ N^T B_i K_i A_i(s) C_i m_j \ \dots \ 0] z \\ &= A^* z \end{aligned} \quad (18)$$

转换后的系统矩阵 A^* 有如下的定义

$$A^* = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & n_1^T B_i K_i A_i(s) C_i m_j & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & n_2^T B_i K_i A_i(s) C_i m_j & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_j + n_j^T B_i K_i A_i(s) C_i m_j & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & n_n^T B_i K_i A_i(s) C_i m_j & \dots & \lambda_n \end{pmatrix} \quad (19)$$

通过如下的方程可以得到闭环系统的特征值

$$\det(sI - A^*) = 0 \quad (20)$$

观察开环系统的特征值 $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ 可知除了第 j 个特征值外, 系统其余的特征值都与闭环系统的一样, 剩余的闭环系统特征值可通过如下方程求得

$$s - \lambda_j + n_j^T B_i K_i A_i(s) C_i m_j = 0 \quad (21)$$

通过如上的推导可知, 如果某控制信号只与第 j 个模态相关, 则反馈控制规律将只对该模态产生影响, 并不会影响开环系统的其他模态。如果某控制器的输入为只与某单一模态相关的信号, 可以通过特征值灵敏技术求得该控制器的增益放大倍数以及补偿相位, 具体如下。

对式 (21) 两边关于 K_i 同时求积分, 可得到如下方程

$$\frac{\partial s}{\partial K_i} = n_j^T B_i A_i(s) C_i m_j + n_j^T B_i A_i(s) C_i m_j \frac{\partial A_i(s)}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial K_i} \quad (22)$$

通过式 (21) 和式 (22) 可知, 当 $K_i = 0$ 以及 $s = \lambda_j$ 时, 关于 K_i 的系统特征值灵敏度可以表示为

$$\frac{\partial s}{\partial K_i} = n_j^T B_i A_i(\lambda_j) C_i m_j \quad (23)$$

因此, 利用式 (23) 可以获得PSS或者TCSC阻尼控制器所应补偿的相位。并且可知该补偿相位与式 (12) 中的基本一样。最后可以通过逐步增大PSS以及TCSC的增益来阻尼系统的振荡模态。

该方法的关键就是与模态唯一相关信号的选取。本文的思路是将信号通过一个滤波器的作用, 从而只保留与某单一模态相关的信息并滤除与其他模态相关的信息。

经过滤波器过滤后的控制器信号必须要对所抑制的模态具有较强的可观及可控性。现在对于较大的系统一般都具有PMU, 所以也可以通过对几种信号结合并进行加权平均的处理以达到降低控制信号与其他模态相关的能量。

本文通过PSS和TCSC阻尼控制器联合特高压大电源外送系统的低频振荡问题。对于PSS和TCSC阻尼控制器的控制信号, 可以通过滤波的处理以及信号的合适选取, 选择与所关心模态最相关的信号作为输入。本文所提出的用于阻尼振荡的PSS以及TCSC阻尼控制的结构如图4所示, 本框

架与传统的PSS类似, 同时串联了一个滤波器。为了更好地优化PSS以及TCSC阻尼控制器的控制效果, PSS以及TCSC的安装地点应按照最大可控性的原则进行选取。

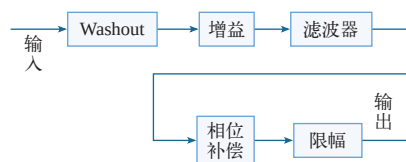


图4 PSS和TCSC阻尼控制器的结构

2. 单一模态滤波器的设计

已有大量的文献提出了各种不同的数字以及模拟滤波器的设计方法, 本文采用简单的Butterworth二阶带通滤波器有如下的形式

$$F(s) = \frac{K_A(\omega_0/Q)s}{s^2 + (\omega_0/Q)s + \omega_0^2} \quad (24)$$

式中, ω_0 为带通中心频率; Q 为滤波器的品质因素; K_A 为滤波器的增益。

3. PSS以及TCSC阻尼控制器的设计过程

PSS以及TCSC阻尼控制器的设计过程可按照如下的步骤。

1) 确定所要抑制振荡模态的振荡频率以及阻尼比。对于较大的系统可以通过系统辨识的方法求取系统的主要振荡模态。

2) 根据系统能观性以及能控性的原则, 为PSS以及TCSC阻尼控制器选择合适的输入信号以及控制器的安装地点。

3) 根据上文的内容, 对控制器进行设计以使控制器具有较好的性能以及通频带宽。

4) 分别计算PSS以及TCSC阻尼控制器所需补偿的相位。

仿真分析验证

1. 测试算例

根据内蒙古锡盟大电源特高压外送系统实际参数, 在PSASP仿真软件中进行仿真模型的搭建。锡盟特高压外送系统的电压等级为1 000 kV, 送端网络具有相对集中、送电功率大, 十台发电机组一共分为四个区域, 送端的功率在锡盟母线通过两条并联1 000 kV交流特高压线路向北京和济

南两电网送电，两电网分别用等效系统1和等效系统2表示，两条特高压线路总的输送功率达到了

7 020 MW，锡盟大电源特高压外送系统的接线示意图如图5所示。

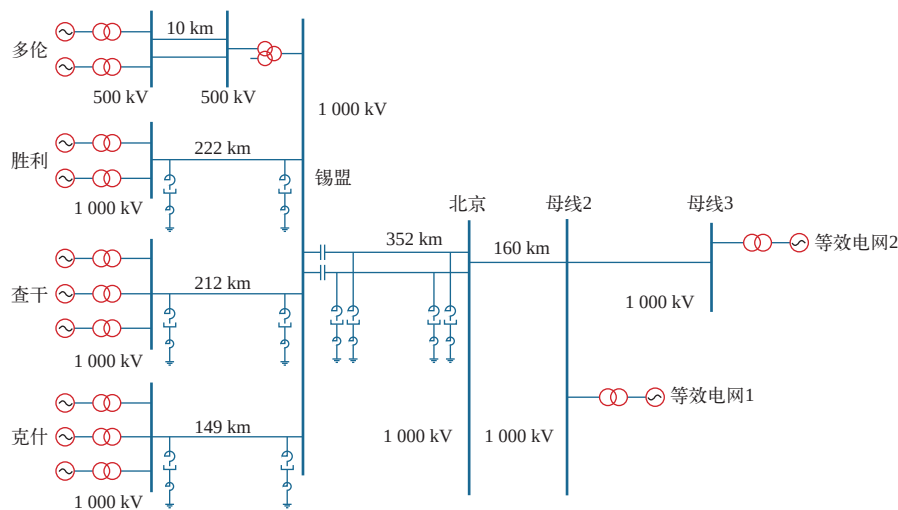


图5 锡盟系统接线示意图

2. 仿真验证

(1) 系统主要振荡模态分析

对仿真系统进行小扰动分析，在查干母线至锡盟母线传输线路的首端施加单相短路接地故障，故障起始时间为第5 s，0.1 s后故障切除。利用矩阵数辨识方法对系统进行辨识，取锡盟母线至北京母线上一条联络线的有功功率作为辨识的输入能够很好反映系统的暂态特性。表1为系统的主要振荡模态，其他的振荡模态幅值较小且阻尼特性较好，没有在表中一一列出。

表1 锡盟系统主要振荡模式

振荡模式	频率/Hz	阻尼比	说明
1	1.776 3	0.030 38	区域内振荡
2	1.266 1	0.059 24	区域内振荡
3	0.883 6	0.026 67	区间振荡

从表1中的分析可以，前两个为锡盟区域内的低频振荡模态，最后一个为锡盟送端区域相对于受端系统的区间低频振荡模态。

(2) 控制器的设计及效果验证

根据本文的分析方法，通过PSS对两个区域间的振荡模态进行控制，同时利用TCSC阻尼控制器对区域间的振荡模态进行控制，以达到增强系统阻尼特性的目的。

首先针对系统的区间振荡模态，对TCSC阻尼

控制器进行设计。将TCSC安装在锡盟至北京的两条交流联络线上，同时选取相应的交流联络线的功率改变值作为TCSC阻尼控制器的输入信号，根据留数分析方法可求得所需补偿的相位为38°，对于滤波器的设计， ω_0 的大小为5.368 rad/s。将限幅环节设定为±0.1(pu)。同时与传统留数分析法设计的TCSC阻尼控制器进行比较分析，观察两控制器效果的差别。

通过留数分析法设计的TCSC阻尼控制器的传递函数如下式所示，同时考虑控制器的增益为10，即

$$K_C = 10 \frac{10s}{1+10s} \left(\frac{1+1.288s}{1+0.0687s} \right)^2 \quad (25)$$

而根据本文方法设计的控制器的传递函数为

$$K_F = \frac{2.684s}{s^2 + 2.684s + 28.815} K_C \quad (26)$$

各种不同方法设计的TCSC对各模态的抑制效果如表2所示，从表2中的数据可以看出，不论是根据传统的方法还是本文方法设计的TCSC阻尼控制器都能够较好地抑制系统的区间低频振荡，但是前者还会对区域内的振荡模态产生影响，这是因为该控制器对较大的频率范围的振荡模态都具有相位补偿的作用。如图6所示，可以看出通过本文方法设计的控制器对区间低频振荡的抑制效果

更好,但是对应的振荡模态阻尼并不随增益的增加而成比例地增大,这与控制器的限幅环节有关。

表2 各种不同方法设计的TCSC对各模态的抑制效果

类型	增益	本地模态1		本地模态2		区间模态	
		频率 /Hz	阻尼 (%)	频率 /Hz	阻尼 (%)	频率 /Hz	阻尼 (%)
原始	0	1.776	3.038	1.266	5.924	0.883	2.667
传统 方法	5	1.785	4.882	1.266	7.415	0.884	4.772
	10	1.804	6.563	1.275	8.902	0.893	7.045
	20	1.823	8.015	1.308	9.821	0.903	8.663
模态 分解 法	5	1.785	3.139	1.265	5.952	0.885	5.185
	10	1.798	3.225	1.285	6.118	0.890	8.863
	20	1.816	3.294	1.323	6.355	0.898	12.033

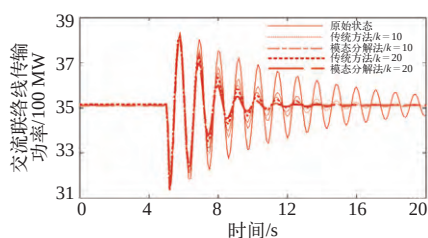


图6 安装不同控制器交流联络线的功率振荡情况

从图6可以看出,虽然传统方法设计的控制器对系统主要的模态都有一定的抑制作用,但由于传统方法设计的控制器对其他模态有交互作用,总的效果却不如通过本文方法设计的控制器的效果。

其次对PSS进行设计,与TCSC阻尼控制器的设计类似,但是在安装了TCSC阻尼控制器的基础上对PSS进行设计。首先分别确定两个区域内振荡模式的主振机组,分别在胜利G1以及克什G1上安装PSS,同时针对两PSS分别选择相应两振荡机组的转子角速度差作为PSS的输入信号。通过对系统进行辨识,并利用留数分析方法可以确定两PSS的补偿相位分别为 24° 以及 51° 。根据表1中两区域内模态的振荡频率可知相应滤波器的中心频率分别为 11.153 rad/s 和 7.955 rad/s ,并取滤波器的品质因数为2,并将限幅环节设定为 $\pm 0.1(\text{pu})$ 。则这两个PSS的传递函数可以分别表示为

$$K_{\text{PSS1}} = 10 \frac{10s}{1+10s} \left(\frac{1+0.111s}{1+0.0737s} \right) \frac{5.577s}{s^2 + 5.577s + 124.389} \quad (27)$$

$$K_{\text{PSS2}} = 10 \frac{10s}{1+10s} \left(\frac{1+0.209s}{1+0.0755s} \right) \frac{3.978s}{s^2 + 3.978s + 63.282} \quad (28)$$

安装两种不同控制器后系统振荡模态的阻尼特性如表3所示。从表3中数据可以看出,两种方法设计的PSS和TCSC阻尼控制器均能抑制系统的低频振荡,提高系统的阻尼作用。但是相比于表2中区间模态的阻尼特性,利用传统方法设计的PSS与TCSC阻尼控制器之间产生了交互作用,明显降低了控制器对区间振荡模态的阻尼作用。而通过模态分解方法逐个设计的PSS和TCSC阻尼控制器之间没有交互作用,能够更好地提高系统地阻尼特性。

表3 安装两种不同控制器后系统振荡模态的阻尼特性

方法	增益	本地模态1		本地模态2		区间模态	
		频率 /Hz	阻尼 (%)	频率 /Hz	阻尼 (%)	频率 /Hz	阻尼 (%)
传统 方法	5	1.752	6.972	1.285	8.437	0.887	4.223
	10	1.766	10.32	1.288	10.963	0.902	6.517
	20	1.785	13.23	1.296	13.44	0.930	8.329
模态 分解 法	5	1.783	10.071	1.283	9.023	0.889	5.319
	10	1.802	13.226	1.299	12.366	0.901	8.752
	20	1.839	15.756	1.340	15.255	0.911	12.176

如图7所示,在控制器具有相同的增益的情况下,利用模态分解法设计的控制器能够更好地抑制系统的振荡,系统更快地趋于稳定,且随着放大倍数的增大,阻尼效果也越好。但是由于滤波器效果的限制以及限幅环节的存在,当增益达到一定值时,阻尼效果同样也不再与增益成线性关系。

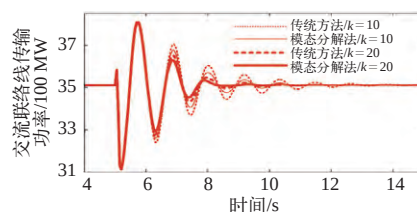


图7 安装不同控制方法设计的PSS和TCSC时交流联络线的振荡情况

(3) 鲁棒性的验证

为了验证设计的控制器的鲁棒性,对系统不同运行方式下控制器的性能进行仿真验证,并将控制器的增益保持在10。考虑如下的几种运行方式。

1) 提升特高压大电源外送系统的送电功率至7 720 MW。

2) 查干G1发电机退出运行的情况。

3) 系统断开一条交流联络线而 $N-1$ 运行的情况。

如表4所示, 对于前两种运行方式, 本文方法设计的控制器均能提供很好的阻尼效果。但是对于第三种运行方式, 由于断开了一条联络线, 相当于增大了系统电气距离, 系统的网架结构发生了较大的变化, 振荡频率改变量过大, 控制器对系统的阻尼效果不如前两种运行方式时好。但可以通过适当的调整滤波器品质因数以及带通中心频率的大小来达到提升系统阻尼的作用。

表4 不同运行方式下系统主振模态的阻尼情况

方 式	本地模态1		本地模态2		区间模态	
	频率/Hz	阻尼 (%)	频率/Hz	阻尼 (%)	频率/Hz	阻尼 (%)
1	1.658	9.760	1.331	8.973	0.841	6.786
2	1.822	15.56	1.283	12.593	0.905	9.819
3	1.573	6.359	1.196	6.723	0.7485	4.268

结束语

本文通过模态分解法进行控制器设计以抑制系统的低频振荡, 该方法的思路是用不同的控制器抑制不同的单一振荡模态, 各控制器之间不会产生交互影响。利用模态分解的方法分别对PSS以及TCSC阻尼控制器进行设计, 利用PSS对系统区域内的振荡模态进行抑制, 而TCSC阻尼控制器抑制区域间的振荡模态。同时对将本方法设计的控制器与传统的留数方法设计的控制器在PSASP上搭建的仿真模型上进行仿真分析, 验证了该方法的有效性和优越性, 最后对系统三种不同运行方式下控制器的仿真验证了该控制器的鲁棒性。

本文设计的控制器克服了传统方法设计的控制器之间会产生交互作用而影响控制器的性能的不足, 同时相比于利用各种智能算法对控制器参数进行最优化设计而言, 该方法更简单实用, 尤其是针对实际工程的应用, 本文的方法更具实际价值。

参考文献

[1] 赵良, 郭强, 覃琴, 等. 特高压同步电网稳定特性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (34):

47-51.

- [2] 李兴源. 高压直流输电系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 177-1874.
- [3] 刘振亚. 中国特高压交流输电技术创新 [J]. 电网技术, 2013, 37 (3).
- [4] 朱方, 赵红光, 刘增煌, 等. 大区电网互联对电力系统动态稳定性的影响 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (1): 1-7.
- [5] 孙玉娇, 周勤勇, 申洪. 未来中国输电网发展模式的分析与展望 [J]. 电网技术, 2013, 37 (7): 1929-1935.
- [6] 舒印彪, 张文亮, 周孝信, 等. 特高压同步电网安全性评估 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (34): 1-6.
- [7] 印永华, 赵红光, 郭强, 等. 1 000kV晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程系统调试总结报告 [R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2009.
- [8] 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): 237-243.
- [9] Kundur P. 电力系统稳定与控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 762-782.
- [10] 严伟佳, 蒋平. 抑制区域间低频振荡的FACTS阻尼控制 [J]. 高电压技术, 2007, 33 (1): 189-192.
- [11] 石辉, 张勇军, 徐涛. 我国智能电网背景下的低频振荡应对研究综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2010 (24): 242-247.
- [12] 戚军, 江全元, 曹一家. 采用时滞广域测量信号的区间低频振荡阻尼控制器设计 [J]. 电工技术学报, 2009, 24 (6): 154-159.
- [13] 杨培宏, 刘文颖, 张继红. PSS和TCSC联合抑制互联电网低频振荡 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (12).
- [14] 刘明波, 黄奕隆, 林舜江. 基于轨迹灵敏度技术的PSS和SVC协调优化设计 [J]. 华南理工大学学报, 2011, 39 (3): 52-57.

(收稿日期: 2014-09-17) EA