

DOI: 10.7667/PSPC162133

# 基于 $H_\infty$ 回路成形法的 VSC-HVDC 附加鲁棒阻尼 控制器设计

李志晗, 张英敏, 李兴源

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 针对包含柔性直流(VSC-HVDC)的交直流输电系统中存在的低频振荡问题, 提出一种基于  $H_\infty$  回路成形法的方法设计附加鲁棒阻尼控制器。首先采用最小二乘-旋转不变方法(TLS-ESPRIT)辨识出系统的降阶模型和振荡模态, 然后针对该模型应用  $H_\infty$  回路成形法及规范互质分解技术进行了鲁棒阻尼控制器设计。最后在 PSCAD/EMTDC 中搭建包含柔性直流的交直流四机两区域输电系统。仿真结果表明, 基于  $H_\infty$  回路成形法的 VSC-HVDC 鲁棒阻尼控制器在不同扰动下对系统低频振荡具有良好的抑制效果, 鲁棒性较强, 且控制器采用输出反馈, 便于工程实践。  
**关键词:** 柔性直流; 最小二乘-旋转不变技术; 鲁棒阻尼控制;  $H_\infty$  回路成形; 低频振荡

## Design of additional robust damping controller for VSC-HVDC based on $H_\infty$ loop shaping

LI Zhihan, ZHANG Yingmin, LI Xingyuan

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** For the phenomenon of low frequency oscillation in the AC-DC interconnected system which contains VSC-HVDC, a method based on  $H_\infty$  loop shaping is proposed to design the additional robust damping controller. The reduced order model of the system and the related oscillation frequency are identified by total least squares-estimation on signal parameters via rotational invariance techniques. The robust damping controller is designed for the reduced order model of the system based on  $H_\infty$  loop shaping and normalized coprime factorization. Finally, a simulation created in PSCAD/EMTDC which is a four-machine two-area system with a VSC-HVDC link. The results show that the robust damping controller designed for VSC-HVDC can well suppress the low frequency oscillation of the system in different disturbances. The controller shows good control performance and strong robustness; furthermore, output feedback control is utilized in the design of the controller, being convenient for practical application.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGQHJY00GHJS1400044).

**Key words:** VSC-HVDC; TLS-ESPRIT; robust damping control;  $H_\infty$  loop shaping; low frequency oscillation

## 0 引言

相对于传统高压直流输电, 柔性直流(VSC-HVDC)输电具有动态响应迅速、不存在换相失败的问题和能独立控制有功无功的优势, 使其被广泛应用于海上风电场集中送出、海上平台孤立负荷供电、分布式电源接入和新城市电网构建等<sup>[1]</sup>。这些优势使得柔性直流输电具有非常广阔的发展应用前景, 也成为众多学者的研究热点<sup>[2-4]</sup>。已有很多学者对

传统高压直流的附加阻尼控制器设计进行了研究<sup>[5-7]</sup>。文献[5]采用留数法设计了阻尼控制器, 并基于留数法选择了控制器安装地点和控制器输入信号。文献[6]提出一种基于振荡能量消耗的方法设计附加阻尼控制器来抑制系统低频振荡。文献[7]采用李雅普诺夫函数法设计了 HVDC 附加阻尼控制器来提高系统阻尼, 能有效抑制系统低频振荡。但是还鲜有对 VSC-HVDC 的附加阻尼控制器设计的研究<sup>[8-10]</sup>。文献[8]用传统极点配置法设计了阻尼控制器来提高系统稳定性。文献[9]采用经典超前滞后的方法设计了渝鄂背靠背柔性直流有功和无功附加阻尼控制

基金项目: 国家电网公司科技项目(SGQHJY00GHJS1400044)

器, 并比较了控制器的控制效果。文献[10]用改进射影控制理论设计阻尼控制器。但是这些方法在设计控制器时都是基于辨识出的系统精确线性模型, 而没有考虑所设计控制器的鲁棒性, 在系统发生严重故障导致系统模型发生较大变化的情况下难以取得理想控制效果。而在实际电力系统中通常存在各种不确定性, 使得基于精确模型设计的控制器难以取得较好的控制效果, 因此在实际运用中设计鲁棒性较强的控制器是很有必要的。文献[11]采用多级线性最优控制方法设计阻尼控制器抑制系统低频和次同步振荡, 所设计控制器具有较好的鲁棒性, 但采用该方法时需重复多次选取矩阵  $Q$  和  $R$ , 设计过程较为复杂。文献[12]采用滑模变结构理论设计阻尼控制器, 所设计控制器具有较好的鲁棒性, 但是采用该方法设计的控制器一般存在抖振的问题。

本文以 VSC-HVDC 系统有功整定端为输入, 两区域发电机转速差为输出, 采用 TLS-ESPRIT 算法辨识出开环系统的降阶模型, 基于  $H_\infty$  回路成形法及规范互质分解技术设计了鲁棒阻尼控制器。通过选择合适的权函数对系统模型进行回路成形后, 运用规范互质分解技术进行鲁棒镇定控制器设计, 得到最终的鲁棒阻尼控制器。在 PSCAD/EMTDC 中搭建包含 VSC-HVDC 的四机两区域模型进行仿真验证, 仿真结果表明: 所设计的控制器能有效地抑制系统低频振荡, 鲁棒性和控制性较强, 适合实际工程推广应用。

## 1 TLS-ESPRIT 辨识的基本原理

TLS-ESPRIT 算法是一种具有高分辨率的信号参数估计方法, 相比于 Prony 算法, 它具有更高的计算效率以及更强的抗干扰能力。ESPRIT 算法主要是通过采样数据构成自相关和互相关矩阵, 然后计算出信号的旋转算子, 并求出信号的频率和衰减因子, 再结合最小二乘法求出信号的幅值和相位。适用于系统小扰动下的振荡特性分析和模型辨识<sup>[13-15]</sup>。设采样振荡信号  $x(n)$  可以表示为  $m$  个复正弦分量和白噪声之和, 即

$$x(n) = \sum_{k=1}^m c_k e^{(-\sigma_k + j\omega_k)nT_s} + \omega(n) \quad (1)$$

式中:  $c_k = a_k e^{j\theta_k}$ ;  $a_k$ 、 $\theta_k$ 、 $\sigma_k$ 、 $\omega_k$  分别为第  $k$  个振荡模式的幅值、相位、角频率和衰减因子;  $T_s$  为采样周期;  $\omega(n)$  为白噪声;  $m$  为信号中实正弦分量个数的两倍。

首先由采样数据构成 Hankle 数据矩阵  $X$ 。

$$X_{L \times M} = \begin{bmatrix} x(0) & \cdots & x(M-1) \\ \vdots & & \vdots \\ x(L-1) & \cdots & x(N-1) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $L > m$ ,  $M > m$ ,  $L+M-1=N$ 。

计算协方差矩阵  $R=XX^T$ , 求矩阵  $R$  的特征值和特征向量, 将特征值降序排列后得到特征向量  $V$ , 将特征向量  $V$  表示为  $V=[V_s|V_n]$ , 其中,  $V_s$  为信号子空间,  $V_n$  为噪声子空间。

令  $V_1$  为  $V_s$  去掉最后一行得到的矩阵、 $V_2$  为  $V_s$  去掉第一行得到的矩阵, 将  $V_1$ 、 $V_2$  构成的矩阵进行特征值分解,  $[V_1|V_2]=Y\Lambda Z^T$ 。

将  $Z$  分解为 4 个  $m \times m$  矩阵, 并计算  $Z_{11}Z_{21}^{-1}$  的特征值  $\lambda_k$ , 则可依据式(3)估计信号中各分量的频率、衰减因子以及阻尼比。

$$\begin{cases} \omega_k = \frac{\arg \lambda_k}{T_s} \\ \sigma_k = -\frac{\ln |\lambda_k|}{T_s} \\ \xi_k = \frac{\sigma_k}{\sqrt{\sigma_k^2 + \omega_k^2}} \end{cases} \quad (3)$$

## 2 $H_\infty$ 回路成形法

$H_\infty$  回路成形法设计控制器的目的是使系统具有良好的稳定性和较强的鲁棒性。用该方法设计控制器主要包含三个步骤。

1) 回路成形。利用前置补偿器  $W_1(s)$  和后置补偿器  $W_2(s)$  对开环系统  $G(s)$  进行回路成形, 使系统频率响应奇异值增益曲线为所期望的形状, 成形后的系统为  $G_p(s) = W_2(s)G(s)W_1(s)$ 。

2) 鲁棒镇定。计算  $\varepsilon_{\max}^{[16-17]}$ 。

$$\varepsilon_{\max} = \left( \inf_{K \text{ 镇定}} \left\| \begin{bmatrix} I \\ K \end{bmatrix} (I + G_p K)^{-1} M^{-1} \right\|_\infty \right)^{-1} = \sqrt{1 - \|N \quad M\|_H^2} < 1 \quad (4)$$

式中,  $N(s)$  和  $M(s)$  是  $G_p(s)$  的规范化左互质分解。即  $G_p(s) = M^{-1}(s)N(s)$ , 且满足  $N(s)N^T(-s) + M(s)M^T(-s) = I$ ; 其中,  $\|\cdot\|_H$  表示 Hankle 范数,  $\varepsilon_{\max}$  表示鲁棒稳定裕度。  $\varepsilon_{\max}$  的取值范围为 0.2 到 1, 认为满足鲁棒稳定性要求, 满足时, 选取  $\varepsilon \leq \varepsilon_{\max}$ , 通过

$$\left\| \begin{bmatrix} I \\ K_\infty \end{bmatrix} (I - G_p K_\infty)^{-1} M^{-1} \right\|_\infty \leq \varepsilon^{-1} \quad (5)$$

可求得镇定控制器  $K_\infty(s)$ , 它可镇定被控对象的不确

定扰动模型集  $G_A(s) = [M(s) + \Delta_M(s)]^{-1} [N(s) + \Delta_N(s)]$ ,  $\Delta_M(s)$ 、 $\Delta_N(s)$  表示被控模型  $G(s)$  的不确定性, 其中  $\|\Delta_M(s), \Delta_N(s)\|_\infty \leq \varepsilon$ ,  $[\Delta_M(s), \Delta_N(s)] \in RH_\infty$ , 如图 1 所示为正规互质因子不确定扰动模型。

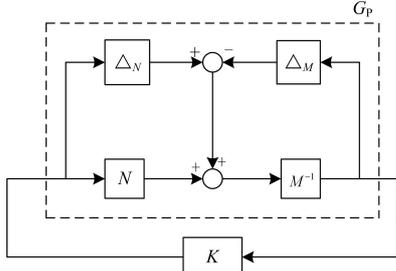


图 1 正规互质因子不确定分解

Fig. 1 Uncertain decomposition of normalized coprime factorization

但是如果  $\varepsilon_{\max} \ll 1$ , 则认为成形后的系统不满足鲁棒稳定性要求, 则应重新选择权函数  $W_1(s)$  和  $W_2(s)$  来计算式(4)。

3) 控制器的成形。由得到的  $H_\infty$  鲁棒镇定控制器  $K_\infty(s)$  以及选取的权函数  $W_1(s)$ 、 $W_2(s)$ , 可得最终的输出反馈控制器  $K(s)$ 。

$$K(s) = W_2(s)K_\infty(s)W_1(s) \quad (6)$$

回路成形过程如图 2 所示。

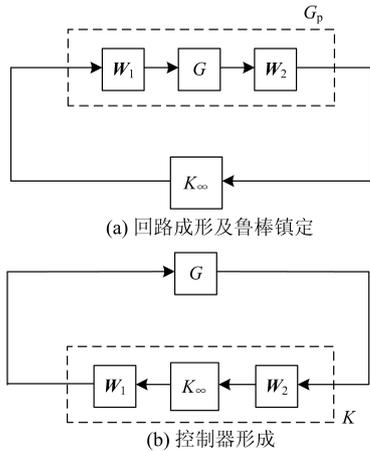


图 2 回路成形过程

Fig. 2 Process of loop shaping

### 3 算例分析

#### 3.1 控制器设计

为了阐明本文所提的基于  $H_\infty$  回路成形法设计的鲁棒控制器的有效性, 采用嵌入 VSC-HVDC 的四机系统模型进行仿真验证。系统模型如图 3 所示。

图 3 为包含 VSC-HVDC 的交直流四机两区域

系统, 系统中的 4 台发电机都只包含励磁系统和调速系统, 均未安装电力系统稳定器(PSS)。交流系统主要参数见文献[18]。VSC1 的控制方式为定有功功率控制( $P_{1ref}=200$  MW)和定无功功率控制( $Q_{1ref}=120$  Mvar); VSC2 采用定直流电压控制( $V_{dc}=320$  kV)和定无功功率控制( $Q_{2ref}=-120$  Mvar)。

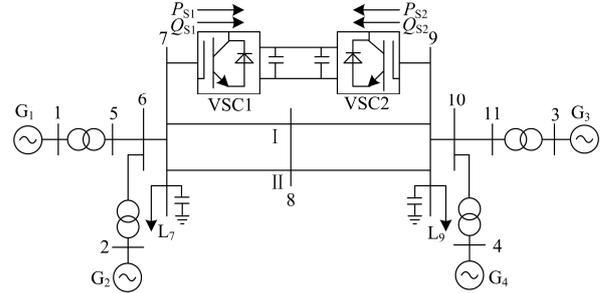


图 3 含 VSC-HVDC 的四机两区域测试系统

Fig. 3 Four-machine two-area system with a VSC-HVDC link

采用 TLS-ESPRIT 技术辨识图 3 含 VSC-HVDC 的四机两区域输电系统振荡模态, 在 VSC1 定功率控制处施加 0.02 p.u. 的阶跃扰动作为输入, 以发电机 G1、G3 之间的转速差作为输出, 得到系统的振荡模态如表 1 所示。

表 1 系统主振荡模态

Table 1 Main oscillation mode

模态	频率/Hz	特征值	阻尼比/%
1	0.4508	-0.0854±2.8323i	3.01
2	0.7068	-0.4520±4.4411i	10.12

由表 1 可知, 系统存在频率为 0.4508 Hz、阻尼比为 3.01% 的弱阻尼低频振荡模式。

考虑到设计控制器时所选发电机 G1、G3 之间的转速差信号是广域信号, 存在一定的延时。故在辨识系统传递函数时考虑延时环节  $e^{-sr}$ , 采用二阶 Pade 逼近<sup>[19]</sup>可表示为

$$e^{-sr} \approx \frac{\tau^2 s^2 - 6\tau s + 12}{\tau^2 s^2 + 6\tau s + 12} \quad (7)$$

根据文献[20]的分析, 国内采用的广域测量系统信号传输延时大多数都低于 100 ms, 除极少数测量数据外延时不会超过 100 ms, 考虑到信号检测环节或信号处理环节均存在延迟, 本文对控制器输入信号选取  $\tau=100$  ms 的总时间延迟, 则延迟环节的传递函数可表示为

$$G_{del}(s) = \frac{s^2 - 60s + 1200}{s^2 + 60s + 1200} \quad (8)$$

利用 TLS-ESPRIT 方法辨识得到含时间延迟的被控对象的开环传递函数为

$$G(s) = \frac{9.922 \times 10^{-8} s^6 - 3.529 \times 10^{-5} s^5 + 0.001841 s^4 - 0.03347 s^3 - 0.01134 s^2 - 0.7038 s}{s^6 + 61.07 s^5 + 1293 s^4 + 2987 s^3 + 3.453 \times 10^4 s^2 + 2.239 \times 10^4 s + 1.92 \times 10^5} \rightarrow$$

得到被控对象的传递函数后, 采用  $H_\infty$  回路成形法设计附加鲁棒阻尼控制器, 加设在 VSC1 定有功功率控制处。控制器输入信号为发电机 G1 与 G3 间的转速差, 输出信号为有功功率, 控制器结构图如图 4 所示。



图 4 控制器结构图

Fig. 4 Structure of controller

根据回路成形原则选择加权函数:

$$W_1 = 1, \quad W_2 = 10^4 \times \left( \frac{3s + 10}{s + 1.5} \right)$$

结合 Matlab 鲁棒控制工具箱进行控制器设计, 由式(4)可得:  $\varepsilon_{\max} = 0.6560$ , 再由式(5)可得  $H_\infty$  鲁棒镇定控制器  $K_\infty(s)$ , 最后由式(6)可得最终的控制器式(10)。所得的控制器为 9 阶, 应用 Hankel 平衡截断降阶法使控制器降到 6 阶, 如式(11)。控制器降阶前后的频率响应如图 5 所示。在所关心的低频段内, 降阶前后的图形无太大差别, 满足要求。

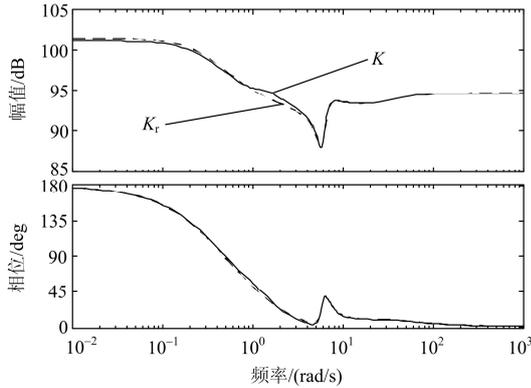


图 5 控制器降阶前后频率响应

Fig. 5 Frequency response of the controller before and after reducing its order

$$K(s) = \frac{5.408 \times 10^4 s^9 + 3.616 \times 10^6 s^8 + 8.991 \times 10^7 s^7 + 6.224 \times 10^8 s^6 + 4.027 \times 10^9 s^5 + 1.447 \times 10^{10} s^4 + 1.646 \times 10^4 s^6 + 1.165 \times 10^5 s^5 + 4.529 \times 10^5 s^4 + 2.163 \times 10^{10} s^3 + 1.039 \times 10^{10} s^2 - 9.621 \times 10^9 s - 1.705 \times 10^{10}}{s^9 + 73.72 s^8 + 2057 s^7 + 9.123 \times 10^5 s^5 + 1.097 \times 10^6 s^2 + 7.331 \times 10^5 s + 1.482 \times 10^5} \rightarrow$$

(10)

$$K_r(s) = \frac{5.408 \times 10^4 s^6 + 3.452 \times 10^6 s^5 + 7.924 \times 10^7 s^4 + 3.684 \times 10^8 s^3 + 2.58 \times 10^9 s^2 + 5.234 \times 10^9 s - 6.016 \times 10^9}{s^6 + 70.86 s^5 + 1850 s^4 + 1.088 \times 10^4 s^3 + 7.777 \times 10^4 s^2 + 1.814 \times 10^5 s + 5.067 \times 10^4} \rightarrow$$

(11)

### 3.2 仿真分析

为验证本文设计的鲁棒控制器的阻尼效果和鲁棒性能, 在不同的扰动下, 与极点配置控制器进行对比仿真分析。本文采用文献[21]的设计方法来设计极点配置控制器。

设被控系统原开环传递函数为  $G(s)$ , 控制器传递函数为  $G_c(s)$ , 控制系统的方框图如图 6 所示。

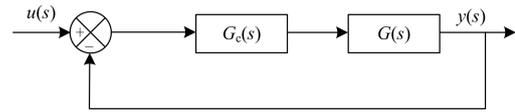


图 6 控制系统

Fig. 6 Control system

$$\text{系统的闭环传递函数为 } \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{G_c(s)G(s)}{1 + G_c(s)G(s)}$$

由设计目的可确定闭环系统主导极点期望位置。由原系统根轨迹图, 在只调整增益不能得到期望的闭环极点时, 可由系统闭环特征方程  $1 + G_c(s)G(s) = 0$ , 计算系统主导极点于期望位置时的幅角缺额来进行相位补偿, 并选择合适的增益。

在 Matlab 中得到系统开环传递函数根轨迹图, 如图 7 所示。

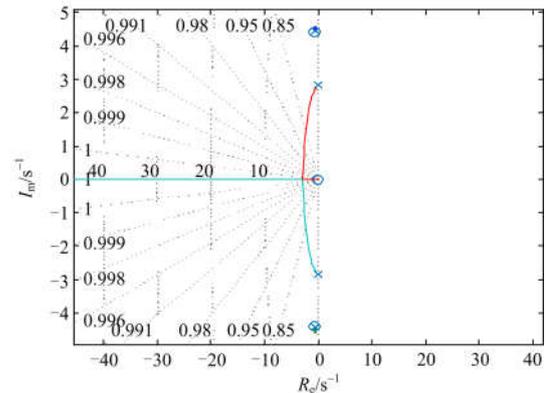


图 7 开环系统根轨迹图

Fig. 7 Root locus diagram of the open-loop system

由根轨迹图可知, 当系统的开环增益  $0 < K < 195\,000$  时, 系统是稳定的<sup>[18]</sup>, 取  $K = 30\,000$ , 以  $K$  作为校正环节引入负反馈, 即通过调整增益来产生期望的闭环极点, 使系统受扰时尽快稳定。则此时闭环系统的期望极点为  $s_{1,2} = -0.509 \pm 2.74i$ 、 $s_{3,4} =$

$-0.471 \pm 4.52i$ ，对应的阻尼比为  $\xi_{1,2}=0.183$ 、 $\xi_{3,4}=0.104$ ；由于采用纯增益反馈，相当于 PID 控制器，而 PID 控制器对系统运行方式较为敏感，即鲁棒性较差<sup>[22]</sup>。

本文设置以下 3 种扰动进行仿真验证。

1) 2 s 时刻母线 8 处发生单相接地短路故障，故障持续时间为 0.1 s，以发电机 G1、G3 之间的转速差和交流联络线潮流作为观察对象，分别投入所设计的鲁棒控制器和极点配置控制器时控制器对振荡的抑制效果如图 8 所示。

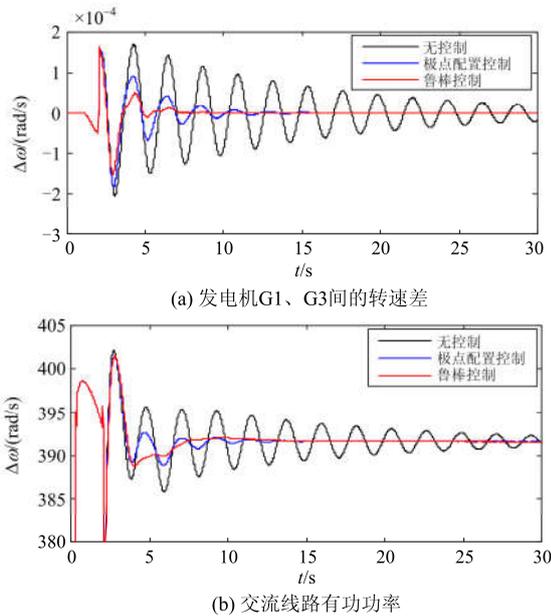


图 8 第 1 种故障下系统的动态响应

Fig. 8 System dynamic response for the first disturbance

由图 8 可知，在无附加控制下，故障 1 引起的发电机 G1、G3 间的转速差和交流线路有功功率振荡衰减较慢，极点配置控制器和鲁棒阻尼控制器都能有效抑制系统振荡、提高系统阻尼，但是鲁棒阻尼控制器抑制系统振荡的能力要优于极点配置控制器。

2) 2 s 时刻母线 8 处发生三相接地短路故障，故障持续时间为 0.1 s，以发电机 G1、G3 之间的转速差和交流联络线潮流作为观察对象，分别投入所设计的鲁棒控制器和极点配置控制器时控制器对振荡的抑制效果如图 9 所示。

由图 9 可知，在故障 2 情况下，相较于图 8，极点配置控制器对系统振荡的抑制效果变差，而鲁棒阻尼控制器仍能较有效地抑制系统振荡。这是因为不同故障会引起系统模型发生不同的变化，而控制器是基于辨识的模型传递函数而设计，所设计的极点配置控制器没有考虑控制器的鲁棒性能，而采

用本文的  $H_\infty$  回路成形法设计的鲁棒阻尼控制器鲁棒性能较强，所以对系统振荡仍具有较好的抑制效果。

3) 2 s 时刻，交流线路 I 靠近母线 8 处发生三相接地短路故障，持续 0.1 s 后切除该线路。以发电机 G1、G3 之间的转速差和交流联络线潮流作为观察对象，分别投入所设计的鲁棒控制器和极点配置控制器时控制器对振荡的抑制效果如图 10 所示。

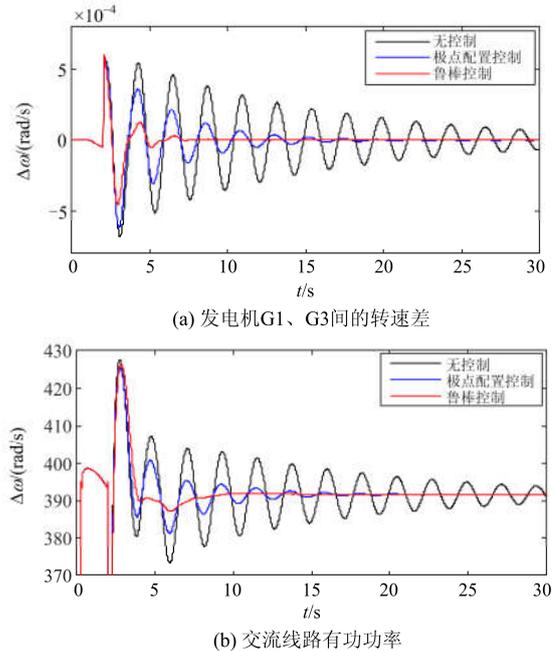


图 9 第 2 种故障下系统的动态响应

Fig. 9 System dynamic response for the second disturbance

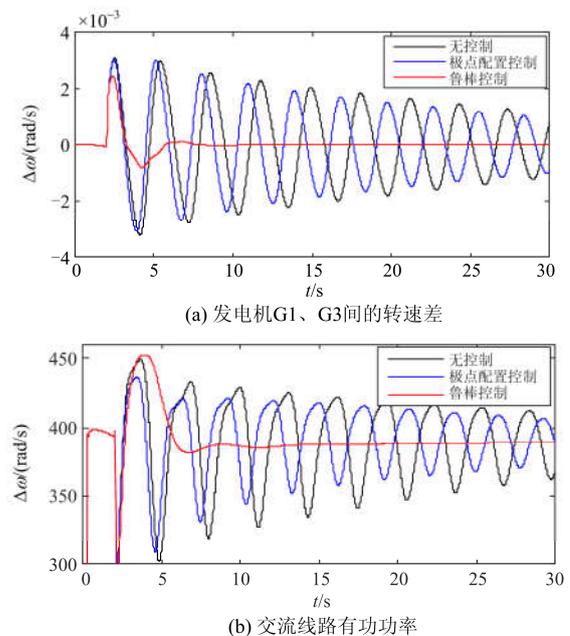


图 10 第 3 种故障下系统的动态响应

Fig. 10 System dynamic response for the third disturbance

由图 10 可知, 在故障 3 下, 切除故障线路后, 极点配置控制器失效, 但鲁棒阻尼控制器仍对系统振荡具有较好的抑制能力。这是因为切除故障线路后, 系统模型发生很大变化, 设计过程中没有考虑控制器鲁棒性能的极点配置控制器不再适用, 而采用本文的  $H_\infty$  回路成形法设计的鲁棒阻尼控制器鲁棒性能较强, 对系统模型变化不敏感, 因而仍具有较好的抑制系统振荡的能力。

#### 4 结论

为提高包含柔性直流输电系统故障时抑制系统低频振荡的能力, 采用 TLS-ESPRIT 算法辨识出考虑信号时滞影响的系统低阶线性化模型和系统振荡模态, 再基于  $H_\infty$  回路成形法及其规范互质分解技术设计柔性直流附加鲁棒阻尼控制器。在 PSCAD/EMTDC 中搭建包含柔性直流输电的交直流四机两区域输电模型进行仿真验证, 并与传统极点配置控制器进行对比分析, 结果表明, 相比于极点配置控制器, 基于  $H_\infty$  回路成形法设计的鲁棒阻尼控制器对系统低频振荡具有更好的抑制能力, 对系统的各种扰动体现出较强的鲁棒性。文中所提设计鲁棒阻尼控制器的  $H_\infty$  回路成形法, 其原理简单, 避免了复杂计算过程, 易于操作, 对实际工程运用具有一定的参考借鉴价值。

#### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 孔明, 汤广福, 贺之渊. 子模块混合型 MMC-HVDC 直流故障穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5343-5351.  
KONG Ming, TANG Guangfu, HE Zhiyuan. A DC fault ride-through strategy for cell-hybrid modular multilevel converter based HVDC transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5343-5351.
- [3] 王振浩, 李洋, 高凯, 等. 引入故障恢复信号的 VSC-HVDC 附加阻尼控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 34-40.  
WANG Zhenhao, LI Yang, GAO Kai, et al. Study of using fault recovery signal for additional damping controller of VSC-based HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 34-40.
- [4] 张武其, 吕洋. 向弱电网供电的 VSC-HVDC 系统的模拟惯量控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 104-110.  
ZHANG Wuqi, LÜ Yang. Emulation inertia control strategy for VSC-HVDC supplying weak network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 104-110.
- [5] 孙建波, 赵娴, 李大虎, 等. 利用储能抑制互联电力系统联络线功率振荡的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 10-17.  
SUN Jianbo, ZHAO Xian, LI Dahu, et al. Study on energy storage in damping tie line power oscillations in power system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 10-17.
- [6] 李建设, 陈磊, 陈亦平, 等. 基于振荡能量消耗的 HVDC 和 SVC 附加阻尼控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 9-15.  
LI Jianshe, CHEN Lei, CHEN Yiping, et al. Supplementary damping control of HVDC and SVC based on oscillation energy dissipation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 9-15.
- [7] 杨帆, 陈陈, 王西田, 等. 基于李雅普诺夫函数的直流附加控制器设计[J]. 电网技术, 2008, 32(18): 14-17.  
YANG Fan, CHEN Chen, WANG Xitian, et al. Design of HVDC supplementary controller based on Lyapunov theory[J]. Power System Technology, 2008, 32(18): 14-17.
- [8] 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.  
ZHENG Chao, ZHOU Xiaoxin. Design of additional damping controller for VSC based HVDC transmission system by use of Prony identification method[J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 25-30.
- [9] 徐友平, 张珂, 潘晓杰, 等. 渝鄂背靠背柔性直流附加阻尼控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 163-169.  
XU Youping, ZHANG Ke, PAN Xiaojie, et al. Damping control based on back to back VSC-HVDC connecting Chongqing and Hubei Power Grid[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 163-169.
- [10] 郭磊, 张英敏, 李兴源. 基于改进射影控制的柔性直流输电广域阻尼控制[J]. 电测与仪表, 2015, 52(22): 1-7.  
GUO Lei, ZHANG Yingmin, LI Xingyuan. VSC-HVDC wide-area damping controller design based on improved projective control[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(22): 1-7.
- [11] 丁媛媛, 刘天琪, 高峰, 等. 基于多级线性最优方法的多频段直流附加阻尼控制器设计[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 76-84.  
DING Yuanyuan, LIU Tianqi, GAO Feng, et al. Multi-channel HVDC supplementary damping controller

- design based on multi-stage linear quadratic regulator method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 76-84.
- [12] 龚鸿, 江伟, 王渝红, 等. 基于静止同步补偿器与直流调制协调控制的低频振荡抑制方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 67-75.  
GONG Hong, JIANG Wei, WANG Yuhong, et al. A survey on damping low frequency oscillation based on coordination strategy of static synchronized compensator modulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 67-75.
- [13] 于兴林, 李慧敏, 李天云. 基于 EEMD 和 TLS-ESPRIT 的谐波间谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 67-72.  
YU Xinglin, LI Huimin, LI Tianyun. A harmonic and inter-harmonic detection method based on EEMD and TLS-ESPRIT[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 67-72.
- [14] TRIPATHY P, SRIVASTAVA S C, SINGH S N. A modified TLS-ESPRIT based method for low-frequency mode identification in power systems utilizing synchrophasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 719-727.
- [15] 李宽, 王军, 赵斌超, 等. 风火捆绑经 HVDC 送电引起轴系扭振研究[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 115-122.  
LI Kuan, WANG Jun, ZHAO Binchao, et al. Shafting vibration research of wind power and thermal power bundle supply through HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 115-122.
- [16] 何朕, 孟范伟, 刘伟, 等.  $H^\infty$  回路成形设计的鲁棒性[J]. 自动化学报, 2010, 36(6): 890-893.  
HE Zhen, MENG Fanwei, LIU Wei, et al. Robustness of  $H^\infty$  loop shaping design[J]. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(6): 890-893.
- [17] 刘国华, 石红瑞. 基于  $H^\infty$  回路成形的鲁棒 PID 参数整定[J]. 微计算机信息, 2006, 8(1): 67-69.  
LIU Guohua, SHI Hongrui. Robust PID tuning based on  $H^\infty$  infinity loop-shaping[J]. Microcomputer Information, 2006, 8(1): 67-69.
- [18] KUNDUR P, BALU N J, LAUBY M G. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994: 813-816.
- [19] 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.  
WANG Chengshan, SHI Jie. PSS designing with consideration of time delay impact[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 1-6.
- [20] 张放, 程林, 黎雄, 等. 广域闭环控制系统时延的测量及建模(一): 通信时延及操作时延[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5768-5777.  
ZHANG Fang, CHENG Lin, LI Xiong, et al. Delay measurement and modeling in a wide-area closed-loop control system, part I: communication delay and operational delay[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5768-5777.
- [21] 赵睿, 李兴源, 刘天琪, 等. 抑制次同步振荡和低频振荡的多通道附加阻尼控制器设计[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 89-92.  
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): 89-92.
- [22] 汤华, 王渝红, 魏亮, 等. HVDC 孤岛运行附加频率鲁棒控制器设计[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1-7.  
TANG Hua, WANG Yuhong, WEI Liang, et al. An additional frequency robust controller for HVDC transmission system under islanding operation[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1-7.

收稿日期: 2016-12-31; 修回日期: 2017-01-26

作者简介:

李志晗(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电等; E-mail: scu\_lzh@163.com

张英敏(1974—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制;

李兴源(1945—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 中国电机工程学会电力系统专委会委员, IEEE 高级会员, 研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电、分布式发电等。

(编辑 魏小丽)