

DOI: 10.7667/PSPC161327

基于 ERGA 和混合 H_2/H_∞ 方法的交直流并联系统分散控制

赵睿, 卢斯煜, 涂亮, 柳勇军

(南方电网科学研究院, 广东 广州 510000)

摘要: 提出一种基于有效相对增益阵列和混合 H_2/H_∞ 方法的交直流并联系统分散控制方法。该方法首先根据有效相对增益阵列(ERGA)指标和总体最小二乘-旋转不变技术确定附加阻尼控制器安装地点和反馈信号配对方案, 再基于混合 H_2/H_∞ 控制理论设计分散控制器, 抑制交直流并联输电系统中存在的区域间和区域内低频振荡。有效相对增益阵列指标考虑了传递函数矩阵的动态和静态过程, 混合 H_2/H_∞ 控制理论可计及控制代价和系统的不确定性。EMTDC/PSCAD 实例仿真证明了控制器的有效性。

关键词: 高压直流输电系统; 有效相对增益阵列; 分散控制; 混合 H_2/H_∞ 控制

Design of decentralized controllers for parallel AC-DC system based on effective relative gain array and mixed H_2/H_∞ control

ZHAO Rui, LU Siyu, TU Liang, LIU Yongjun

(Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510000, China)

Abstract: The HVDC and excitation decentralized controllers for parallel AC-DC system based on effective relative gain array and mixed H_2/H_∞ control are proposed. The results of effective relative gain array (ERGA) which combines the advantage of both relative gain array and dynamic relative gain array studies suggest the effect of control loop configurations. Based on the ERGA analysis and multi objective mixed H_2/H_∞ control synthesis, the designed controllers which simultaneously consider the output disturbance rejection, ensure the robustness against model uncertainties, and reduce the control cost could provide efficient damping against the inter-area and local modes of oscillations. The effectiveness of the new design is demonstrated with EMTDC/PSCAD simulation.

Key words: high voltage direct current power transmission system; effective relative gain array; decentralized control; mixed H_2/H_∞ control

0 引言

交直流并联系统的远距离送电需关注与交流侧控制设备的配合, 隔离控制器之间的不良相互作用(如“模式谐振”等激发新振荡模式的情况), 实现恰当的集中与分散控制, 提高系统运行效率^[1]。为此, 在控制器安装地点和反馈信号的配对方案上, 常依据相对增益阵列(Relative Gain Array, RGA)及动态相对增益阵列(Dynamic Relative Gain Array, DRGA)来确定。DRGA 是 RGA 的发展, 但计算过程非常复杂。在控制理论选择上, 由于大系统存在的复杂拓扑和多变工况, 以及大系统等值的困难,

使得控制器设计应降低其控制效果对网络拓扑的依赖, 考虑系统的非线性特性和参数/结构不确定性。有必要选择对精确数学模型要求相对较弱的控制理论, 使控制装置具备较强的鲁棒性。

本文首先采用总体最小二乘-旋转不变技术参数估计(TLS-ESPRIT)对系统进行振型分析, 按照振型划分来确定直流附加阻尼控制器和发电机附加阻尼控制器的功能。然后根据考虑传递函数矩阵的动态和静态过程的有效相对增益阵列(ERGA)指标来确定控制器安装地点和反馈信号的合理配对方案, 并装设带通滤波器于网侧控制器, 进一步降低控制器间的相互作用, 实现机、网分散控制。同时, 控制器设计基于混合 H_2/H_∞ 控制理论, 计及了系统的不确定性和控制代价。

1 基于 ERGA 闭环配对原则的分散控制器反馈信号与控制地点选择

定位附加阻尼控制器功能以后, 为使控制回路间的相互作用降至最低, 避免其相互作用对附加控制器的效果产生负作用, 必须通过定量分析来为各控制器选择合适的反馈信号和控制地点。

1.1 ERGA 理论

对图 1 所示的多输入多输出系统设计分散控制器, 其交互影响的评估和控制回路中反馈信号和控制地点的配对需要考虑所关心频段的动态和静态相互作用, 以及配对方法的易行性。

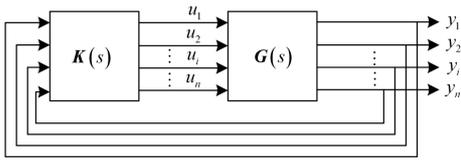


图 1 多输入多输出控制系统

Fig. 1 Multiple-input and multiple-output control system

开环传递函数的两个因素将影响反馈信号和控制地点的配对的结果。

① 稳态增益

传递函数的稳态增益 $g_{ij}(0)$ 反映了控制量 u_j 对被控制量 y_i 的影响。

② 响应速度

响应速度反映了被控量 y_i 对控制量 u_j 的敏感性, 即抵抗其余回路影响的能力。

(1) 相对增益阵列(Relative Gain Array, RGA)

对于图 1 所示多输入多输出系统, 输入 u_j 和 y_i 输出间的相对增益可定义为

$$\lambda_{ij} = \frac{\partial y_i / \partial u_j \Big|_{\Delta u_k=0, k \neq j}}{\partial y_i / \partial u_j \Big|_{\Delta u_k=0, k \neq i}} \quad (1)$$

其中, 分子增益表示在控制回路均开环的情况下, 除 $u_j \rightarrow y_i$ 信道外, 其余信道全断开时所得的静态通道增益; 分母增益表示当其他输出量 s 均不变时, $G(s)$ 之间的静态通道增益。

并且, 所有的相对增益 λ_{ij} 可构成相对增益矩阵 A_{RGA} 。其矩阵运算公式为

$$A_{\text{RGA}} = \mathbf{G}(0) \otimes (\mathbf{G}(0)^{-1})^T \quad (2)$$

式中, \otimes 表示矩阵的 Hadamard 乘积。

相对增益 λ_{ij} 越接近 1, 表示不同控制回路之间的耦合越小。通过此原理, 可选择相应的控制回路

以构成调节系统。

(2) ERGA

尽管 RGA 由于只计算静态增益而降低了运算的复杂程度, 但是, 未能计及回路的动态信息^[2]。

由于响应速度正比于带宽, 因此, 可利用带宽以反映在响应速度上, 来自有限带宽控制及控制回路选择的相互作用。

令

$$g_{ij}^0(j\omega) = \frac{g_{ij}(j\omega)}{g_{ij}(0)} \quad (3)$$

式中, $g_{ij}(0)$ 为稳态增益, $g_{ij}^0(j\omega)$ 为 $g_{ij}(j\omega)$ 的归一化传递函数。

为了在控制回路相互作用评估中同时考虑稳态增益和响应速度, 可定义有效相对增益为

$$e_{ij} = g_{ij}(0) \int_0^{\omega_{B,ij}} |g_{ij}^0(j\omega)| d\omega \quad (4)$$

式中, $\omega_{B,ij} (i, j = 1, 2, \dots, n)$ 是传递函数 $g_{ij}^0(j\omega)$ 的带宽; $|g_{ij}^0(j\omega)|$ 为传递函数 $g_{ij}^0(j\omega)$ 的绝对值。

e_{ij} 是 $g_{ij}(j\omega)$ 的有效能量输出, ERGA 表示为

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & \cdots & e_{1n} \\ e_{21} & e_{22} & \cdots & e_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e_{n1} & e_{n2} & \cdots & e_{nn} \end{pmatrix} \quad (5)$$

为简化计算, 可将积分面积近似地化为矩形, 即

$$e_{ij} \approx g_{ij}(0) \omega_{B,ij} \quad (6)$$

$$\mathbf{E} = \mathbf{G}(0) \otimes \boldsymbol{\Omega} \quad (7)$$

$$\text{式中, } \mathbf{G}(0) = \begin{pmatrix} g_{11}(0) & g_{12}(0) & \cdots & g_{1n}(0) \\ g_{21}(0) & g_{22}(0) & \cdots & g_{2n}(0) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{n1}(0) & g_{n2}(0) & \cdots & g_{nn}(0) \end{pmatrix},$$

$$\boldsymbol{\Omega} = \begin{pmatrix} \omega_{B,11}(0) & \omega_{B,12}(0) & \cdots & \omega_{B,1n}(0) \\ \omega_{B,21}(0) & \omega_{B,22}(0) & \cdots & \omega_{B,2n}(0) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \omega_{B,n1}(0) & \omega_{B,n2}(0) & \cdots & \omega_{B,nn}(0) \end{pmatrix}.$$

由于相对其他通道, e_{ij} 表征 $u_j \rightarrow y_i$ 通道闭环时的能量, 因此 e_{ij} 的值越大, 该回路的主导作用越明显。

用有效增益阵列 \mathbf{E} 代替式(2)中的静态增益阵列 $\mathbf{G}(0)$, 则定义有效相对增益 $\Phi_{ij} = \frac{e_{ij}}{\hat{e}_{ij}}$ 来表示控制

量 u_j 与被控制量 y_i 间的增益。其中, \hat{e}_{ij} 是其他回路都闭环时输入变量 u_j 与输出变量 y_i 之间的增益。通过计算各种组合的有效增益值, 可定义有效相对增益阵列为

$$\Phi = E \otimes E^{-T} = \begin{pmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \cdots & \phi_{1n} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \cdots & \phi_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \phi_{n1} & \phi_{n2} & \cdots & \phi_{nn} \end{pmatrix} \quad (8)$$

ERGA 具有与 RGA 类似性质如下:

① ϕ_{ij} 可评估控制量 u_j 与被控制量 y_i 组成的回路的有效相互影响。

② ERGA 的任意一行元素之和及任意一列元素之和均为 1, 即 $\sum_{i=1}^n \phi_{ij} = \sum_{j=1}^n \phi_{ij} = 1$ 。其中, \hat{e}_{ij} 是其他回路都闭环时输入变量 u_j 与输出变量 y_i 之间的增益。

③ 若 ϕ_{ij} 为负数, 那么在其余回路均开环的情况下因 u_i 的改变而产生的 y_i 变化将与在其余回路均闭环的情况下因 u_i 的改变而造成的 y_i 变化反向。

基于 ERGA 和 NI 的控制器反馈信号和控制地点的配对准则要求如下所述。

① 若 ϕ_{ij} 越接近于 1, 则不同回路间的相互影响越小;

② 应避免较大的 ϕ_{ij} ;

③ $\phi_{ij} > 0$;

④ $NI > 0$ 。

其中, $NI = \frac{|G(0)|}{\prod_{i=1}^n g_{ii}(0)} > 0$ 是控制回路闭环稳定必要条件 ($|G(0)|$ 为矩阵 $G(0)$ 的行列式)。

ERGA 同时计及关键频率的动态和静态相互作用, 相较 RGA 和 DRGA 具有以下优势。

① 相较 DRGA, ERGA 仅需计算传递函数的带宽和稳态增益。因此, 该计算方法更简便。

② ERGA 结合了传递函数的带宽和稳态增益来评估回路的相互影响, 所以不仅比 RGA 更精确, 而且与 DRGA 有可比性。

③ ERGA 只利用开环传递函数的信息, 所以它广泛适用于各种类型的控制器。

1.2 基于 ERGA 闭环配对原则的控制器反馈信号与控制地点配对方案

根据图 2 所示系统的拓扑结构, 可选择任意发电机作为激励点, 施加不破坏系统可线性化条件的

小扰动激励, 取全部发电机的转子角速度作为输出, 并通过 TLS-ESPRIT 辨识相应的传递函数, 以获得系统的振荡频率、阻尼比和振型^[3]。

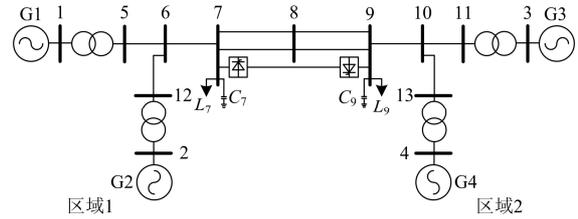


图 2 交直流并联系统拓扑图

Fig. 2 Multiple-input and multiple-output control system

表 1 取发电机 G1 为激励点时的振荡模式

Table 1 Mode shape when generator G1

excitation point is taken

频率/Hz	1.44	0.71	
阻尼比(%)	39.71	3.83	
振型	G1	$0.05 \times 10^{-3} \angle -108.99^\circ$	$0.01 \times 10^{-3} \angle -133.81^\circ$
	G2	$0.04 \times 10^{-3} \angle 54.12^\circ$	$0.03 \times 10^{-3} \angle -82.16^\circ$
	G3	0	$0.03 \times 10^{-3} \angle 76.69^\circ$
	G4	0	$0.02 \times 10^{-3} \angle 81.39^\circ$

表 2 取发电机 G3 为激励点时的振荡模式

Table 2 Mode shape when generator G3 excitation point is

taken

频率/Hz	1.17	0.71	
阻尼比(%)	8.73	3.79	
振型	G1	0	$0.02 \times 10^{-3} \angle 42.02^\circ$
	G2	0	$0.04 \times 10^{-3} \angle 95.10^\circ$
	G3	$0.03 \times 10^{-3} \angle -118.01^\circ$	$0.03 \times 10^{-3} \angle -106.68^\circ$
	G4	$0.03 \times 10^{-3} \angle 74.01^\circ$	$0.02 \times 10^{-3} \angle -105.05^\circ$

由表 1 和 2 可知, 系统存在 0.71 Hz 的弱阻尼区域间振荡模式, 发电机 G1 和 G2 逆反于发电机 G3 和 G4 摇摆; 1.44 Hz 为区域 1 的区域间振荡模式, 发电机 G1 逆反于发电机 G2 摇摆; 1.17 Hz 为区域 2 的区域间振荡模式, 发电机 G3 逆反于发电机 G4 摇摆。根据系统的振荡的振型分析, 可通过附加控制器的合理功能划分(即 HVDC 附加阻尼控制器的主要目的在于抑制 0.71 Hz 的区域间振荡, 发电机的附加阻尼控制器抑制区域 2 内 1.17 Hz 的振荡)以进行有效的机网协调。

对图 2 所示系统, 其附加阻尼控制器的反馈信号与控制地点配对策略的步骤如下所述。

(1) 根据系统振荡特性的分析及控制器功能定位, 为抑制 0.71 Hz 弱阻尼振荡的直流附加阻尼控制器的反馈信号可从区域 1 和区域 2 之间机组的转

速差和交流联络线有功功率中初选。而且, 可基于主模比指标将区域间交流联络线有功功率与发电机转速差化为具有可比性的反馈信号进行预选^[4]。为降低控制器工程实现的难度, 抑制 1.17 Hz 振荡模式的发电机附加阻尼控制器选择本地控制(控制点—发电机转速偏差), 控制点为发电机 G3 或 G4。

表 3 区域间交流联络线有功功率及发电机转速差对区域间振荡模式的主模比

Table 3 Dominant mode ratio between the tie line active power and the generator rotor angular velocity

反馈信号	主模比
ΔP_{79}	0.26
$\Delta \omega_{31}$	0.70
$\Delta \omega_{32}$	0.59
$\Delta \omega_{41}$	0.73
$\Delta \omega_{42}$	0.51

由表 3 可知, $\Delta \omega_{31}$ 和 $\Delta \omega_{41}$ 作为直流附加阻尼控制器的反馈信号能够使该控制器的单位控制输出量获得最大的系统阻尼。

(2) 系统的阻尼控制器将构成图 3 所示的两输入-两输出系统。根据步骤(1)初选的各种附加阻尼控制反馈信号配对方案, 利用 TLS-ESPRIT 算法辨识

表 4 发电机励磁控制器与直流附加阻尼控制器间的 ERGA

Table 4 ERGA between HVDC and excitation controllers

系统的传递函数矩阵	NI	Ω	RGA	ERGA
$\begin{bmatrix} \Delta y_{\Delta \omega_3} \\ \Delta y_{\Delta P_{79}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{G3} \\ \Delta u_{HVDC} \end{bmatrix}$	0.99	$\begin{bmatrix} 0.3947 & 0.3134 \\ 12.4052 & 5.5503 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.0136 & -0.0136 \\ -0.0136 & 1.0136 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.0244 & -0.0244 \\ -0.0244 & 1.0244 \end{bmatrix}$
$\begin{bmatrix} \Delta y_{\Delta \omega_4} \\ \Delta y_{\Delta P_{79}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{G4} \\ \Delta u_{HVDC} \end{bmatrix}$	0.99	$\begin{bmatrix} 0.4323 & 0.4768 \\ 0.5838 & 5.5503 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.0139 & -0.0139 \\ -0.0139 & 1.0139 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.0016 & -0.0016 \\ -0.0016 & 1.0016 \end{bmatrix}$

根据 RGA、ERGA 和 NI 的控制器反馈信号和控制地点的配对准则, 由表 4 可知, RGA 指标计算得到的结果数值非常接近, 几乎无法比较两组配对方案的优劣, 但是, ERGA 指标则较明确地反映出通道 $\Delta \omega_4 \rightarrow \Delta u_{G4}$ 与 $\Delta P_{79} \rightarrow \Delta u_{HVDC}$ 间的相互作用较通道 $\Delta \omega_3 \rightarrow \Delta u_{G3}$ 与 $\Delta P_{79} \rightarrow \Delta u_{HVDC}$ 间的相互作用更弱。因此, 选择第 2 种控制地点与反馈信号的配对方案。

而且, 从上述分析可知, 在考虑控制器回路间相互作用的情况下, 主模比较高的反馈信号并不一定是控制器的最佳反馈信号。ERGA 相较 RGA 更能有效决定控制器反馈信号与控制地点的配对方案。

2 分散协调控制器设计

2.1 直流附加阻尼鲁棒控制器设计

(1) $\Delta P'_{79} \rightarrow \Delta u_{HVDC}$ 的传递函数辨识

$u_1 \rightarrow y_1$, $u_1 \rightarrow y_2$, $u_2 \rightarrow y_1$, $u_2 \rightarrow y_2$ 通道的传递函数, 并计算 ERGA 矩阵, 以筛选出最佳的反馈信号与控制点的配对^[5-6]。

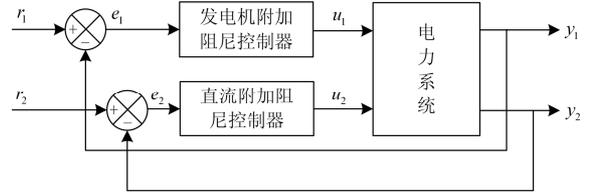


图 3 两输入/两输出闭环控制系统

Fig. 3 Dual-input dual-output closed-loop control system

由于 $\Delta \omega_{31} \rightarrow \Delta u_{HVDC}$ 、 $\Delta \omega_{32} \rightarrow \Delta u_{HVDC}$ 、 $\Delta \omega_{41} \rightarrow \Delta u_{HVDC}$ 和 $\Delta \omega_{42} \rightarrow \Delta u_{HVDC}$ 的传递函数的稳态增益均为 0, 矩阵 $E = G(0) \otimes \Omega$ 必定存在为 0 的对角元素, 在 E 非奇异的情况下, ERGA 矩阵的对角元素必为 0, 即以上四种信号作为 HVDC 附加阻尼控制器的反馈信号构成的控制回路与任意上述发电机本地附加阻尼控制器控制回路间存在强相互作用。以交流联络线有功功率作为直流附加阻尼控制器反馈信号时, 其控制回路与发电机励磁控制器回路间的 ERGA 如表 4 所示。

在直流功率整定值处施加阶跃扰动 Δu_{HVDC} , 检测交流联络线上的有功功率变化量 ΔP_{79} , 然后基于 TLS-ESPRIT 算法辨识 $\Delta P'_{79} \rightarrow \Delta u_{HVDC}$ 的传递函数。

实际运行中, 直流附加阻尼控制器可串联相应频段的带通滤波器, 以避免输入信号的稳态值的改变而影响直流传输功率, 并进一步隔离该控制器与其它控制器间的相互作用。 P_{79} 经巴特沃兹滤波器后变为 $\Delta P'_{79}$ 。

$$\frac{\Delta P'_{79}}{\Delta u_{HVDC}} = \frac{\begin{pmatrix} -4.56s^6 + 1663.67s^5 - \\ 59253.81s^4 - 414074.36s^3 - \\ 2750185.16s^2 - 23587255.73s \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} s^6 + 26.56s^5 + 563.01s^4 + 4784.95s^3 + \\ 24177.30s^2 + 86070.49s + 240925.33 \end{pmatrix}} \quad (9)$$

直流附加阻尼控制器的相应滤波环节的传递函数为 $\frac{s}{0.01s^2 + 0.2s + 1}$ 。

(2) 控制器参数设计

根据式(9)所示系统降阶模型及混合 H_2/H_∞ 控制理论, 设计如图 4 所示控制器^[7-13]。

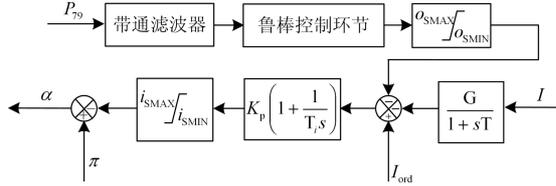


图 4 基于 H_2/H_∞ 的直流附加阻尼鲁棒控制器结构图
Fig. 4 HVDC controller based on mixed H_2/H_∞ control

经反复实验, 确定如下加权函数^[14-15]:

$$W_1(s) = \frac{1000s}{1000s + 5} \quad (10)$$

$$W_2(s) = \frac{s}{100s + 100} \quad (11)$$

$$W_3(s) = 10 \quad (12)$$

设置 $\alpha = \beta = 0.5$, 极点配置区域为如图 5 所示的阻尼比大于 20% 的区域。

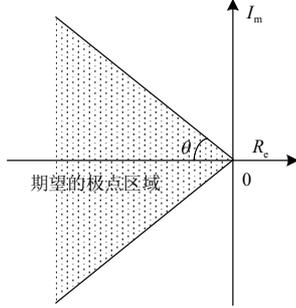


图 5 闭环极点配置的区域
Fig. 5 Closed-loop pole region

通过求解线性矩阵不等式, 即可得到输出反馈控制器。为满足工程实际, 降阶后的鲁棒控制环节为

$$K_{HVDC}(s) = \frac{\begin{pmatrix} -0.1085s^3 - 0.3103s^2 - \\ 23.1776s + 21.9179 \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} s^4 + 93.9947s^3 + 1749.1779s^2 + \\ 12627.3640s + 84719.4187 \end{pmatrix}} \quad (13)$$

2.2 发电机励磁附加鲁棒控制器设计

(1) $\Delta\omega'_4 \rightarrow \Delta u_{G4}$ 的传递函数辨识

系统安装 2.1 节设计的控制器以后, 在发电机 G4 的电压调节器输入电压相加点处施加阶跃扰动 Δu_{G4} , 检测该机组的角速度偏差 $\Delta\omega'_4$, 然后基于

TLS-ESPRIT 算法辨识 $\Delta\omega'_4 \rightarrow \Delta u_{G4}$ 的传递函数。

$$\frac{\Delta\omega'_4}{\Delta u_{G4}} = \frac{\begin{pmatrix} 0.000037432s^7 + 0.07263s^6 - \\ 2.919s^5 - 13.26s^4 - 101.9s^3 - \\ 123.7s^2 - 285.2s - 82.69 \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} s^7 + 14.3s^6 + 125.8s^5 + 977s^4 \\ + 3321s^3 + 9916s^2 + 5431s + 979.9 \end{pmatrix}} \quad (14)$$

(2) 控制器参数设计

根据式(14)所示系统降阶模型及混合 H_2/H_∞ 控制理论, 设计如图 6 所示控制器。

α 和 β 的值与直流附加阻尼控制器一致, 极点配置区域为图 5 所示的阻尼比大于 15% 的区域。

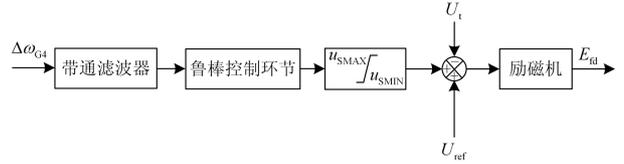


图 6 基于 H_2/H_∞ 的发电机附加阻尼鲁棒控制器结构图
Fig. 6 Excitation controller based on mixed H_2/H_∞ control

经反复实验, 确定如下加权函数:

$$W_1(s) = \frac{5s}{s + 100} \quad (15)$$

$$W_2(s) = \frac{100}{s + 100} \quad (16)$$

$$W_3(s) = 1 \quad (17)$$

通过求解线性矩阵不等式, 可得输出反馈控制器为

$$K_{G4}(s) = \frac{4.05s - 57.54}{s^2 + 3.875s + 58.6} \quad (18)$$

(3) $\Delta\omega'_3 \rightarrow \Delta u_{G3}$ 的传递函数辨识和控制器参数设计

发电机 G3 的附加励磁鲁棒控制器设计与发电机 G4 同理。

$$\frac{\Delta\omega'_3}{\Delta u_{G3}} = \frac{\begin{pmatrix} -0.000139368s^7 + 0.06474s^6 - \\ 2.42132s^5 - 4.77045s^4 - 118.53595s^3 - \\ 133.11176s^2 - 189.93472s - 72.63266 \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} s^7 + 11.48697s^6 + 124.81370s^5 + \\ 941.16645s^4 + 3659.18192s^3 + \\ 16723.85711s^2 + 9570.57862s + 2117.97490 \end{pmatrix}} \quad (19)$$

控制器设计中, 其权函数选取与式(15)~(16)一致, 且 α 和 β 的值与直流附加阻尼控制器设计时的取值一致, 极点配置区域为图 5 所示的阻尼比大于 15% 的区域。

$$K_{G3}(s) = \frac{4.452s - 77.31}{s^2 + 2.416s + 57.88} \quad (20)$$

3 时域仿真分析

根据所设计的鲁棒控制器, 利用 EMTDC/PSCAD 仿真软件对图 2 所示系统进行数字仿真。

控制地点与反馈信号选择 $\Delta\omega_4 \rightarrow \Delta u_{G4}$ 和 $\Delta P_{79} \rightarrow \Delta u_{HVDC}$ 的配对方案, 传统附加阻尼控制器根据 IEEE PSS1A 和美国太平洋联络线工程的附加直流阻尼控制器设计, 其结构和参数如图 7 和 8 所示。

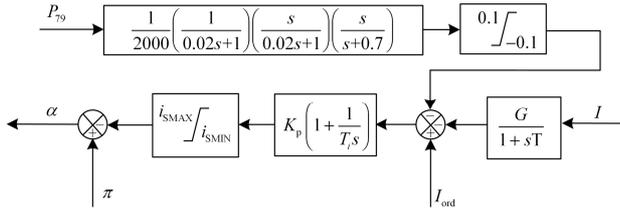


图 7 直流传统附加阻尼控制器

Fig. 7 Traditional supplementary damping controller of HVDC

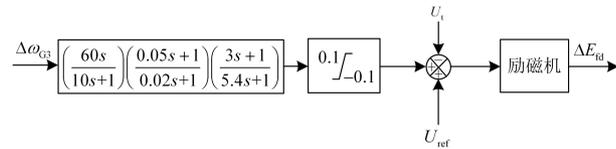


图 8 安装于发电机 G3 的 PSS

Fig. 8 PSS of generator G3

数字仿真的扰动方式如下:

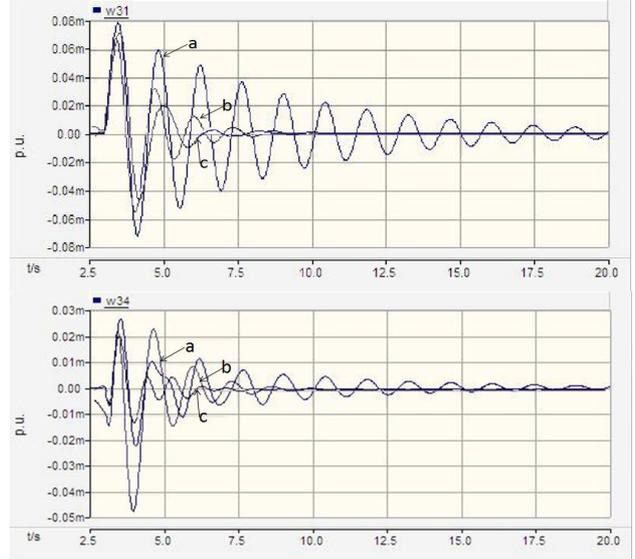
① 3 s 时刻, 系统受到一个扰动, 该扰动使得整流测定电流控制器的电流整定值由 1 p.u. 增加至 1.04 p.u.;

② 3 s 时刻, 区域 2 交流母线 13 发生三相短路接地故障, 3.1 s 时故障消失, 系统恢复至正常结构。

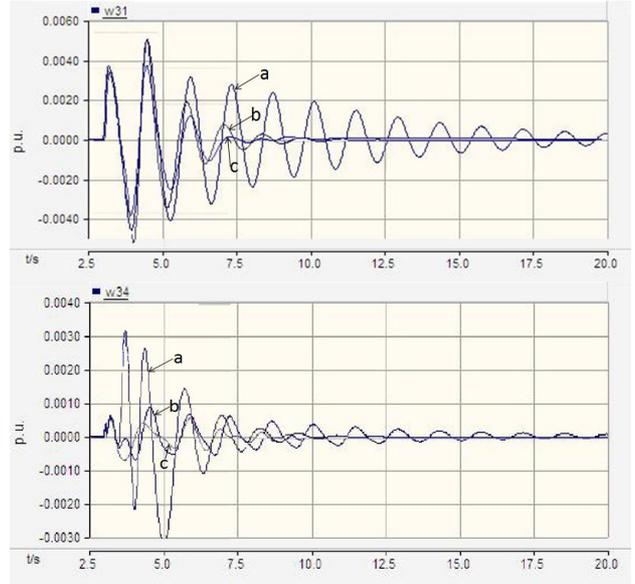
- (a) 不投阻尼控制器;
- (b) 投入传统附加阻尼控制器;
- (c) 投入附加阻尼鲁棒控制器。

由图 9 可知, 扰动①下, 投入传统附加阻尼控制器相较未投入附加阻尼控制器时, ω_{31} 和 ω_{34} 的首摆幅降低, 后续摆的阻尼明显增强, 投入附加阻尼鲁棒控制器相较投入传统附加阻尼控制器时, ω_{31} 和 ω_{34} 的后续摆的阻尼提高更明显; 扰动②下, 投入传统附加阻尼控制器相较未投入附加阻尼控制器时, ω_{31} 的首摆变化不大, 后续摆的阻尼增强, ω_{34} 的首摆摆幅变大, 后续摆阻尼增强, 投入附加阻尼鲁棒控制器相较投入传统附加阻尼控制器时, ω_{31} 和 ω_{34} 的首摆摆幅明显降低, 后续摆阻尼增加。由图 10 可知, 投入附加阻尼鲁棒控制器相较投入传统附加阻尼控制器时, 区域间联络线有功功率振荡的

后续摆阻尼提升更明显。因此, 在不同故障下, 附加阻尼鲁棒控制器均有效抑制了 0.71 Hz 的区域间振荡模式和 1.17 Hz 的区域内振荡模式, 且总体性能较传统附加阻尼控制器更优。



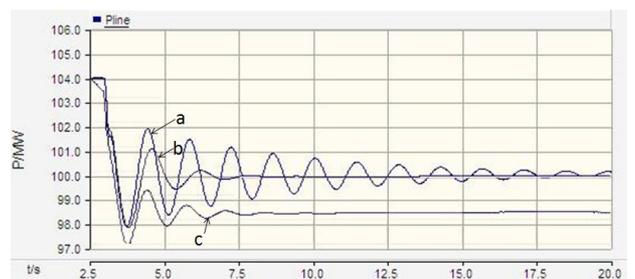
(a) 扰动①下系统的响应



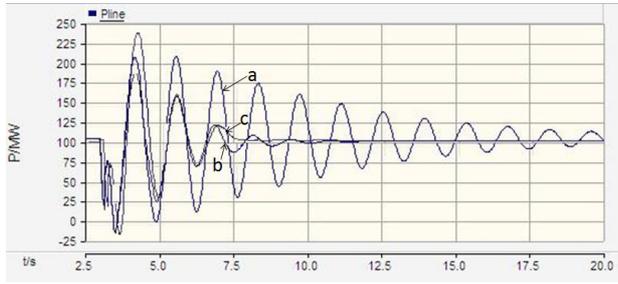
(b) 扰动②下系统的响应

图 9 不同扰动下投入附加阻尼控制器前后的转子角速度

Fig. 9 Response of generator rotor angular velocity



(a) 扰动①下系统的响应



(b) 扰动②下系统的响应

图 10 不同扰动下投入附加阻尼控制器前后的区域间联络线功率图

Fig. 10 Response of tie line active power

为进一步验证 ERGA 的有效性, 控制地点与反馈信号选择 $\Delta\omega_3 \rightarrow \Delta u_{G3}$ 和 $\Delta P_{79} \rightarrow \Delta u_{HVDC}$ 的配对方案, 直流附加阻尼鲁棒控制器如图 7 所示, 安装于发电机 G3 的励磁附加鲁棒控制器为式(20)中的参数。

从图 11 与图 9(a)的比较可知, $\Delta\omega_4 \rightarrow \Delta u_{G4}$ 与 $\Delta P_{79} \rightarrow \Delta u_{HVDC}$ 的闭环配对方案较通道 $\Delta\omega_3 \rightarrow \Delta u_{G3}$ 与 $\Delta P_{79} \rightarrow \Delta u_{HVDC}$ 的配对方案下的转速差 $\Delta\omega_{31}$ 第二摆幅更低, 并且, $\Delta\omega_{34}$ 的首摆幅更小, 后续摆幅阻尼比更大。图 12 与图 10(a)的比对可知, 两种配对方案下, 故障后联络线功率振荡的情况无显著差别。因此, 选择通道 $\Delta\omega_4 \rightarrow \Delta u_{G4}$ 与 $\Delta P_{79} \rightarrow \Delta u_{HVDC}$ 的闭环配对方案相较通道 $\Delta\omega_3 \rightarrow \Delta u_{G3}$ 与 $\Delta P_{79} \rightarrow \Delta u_{HVDC}$ 的配对方案更优, 时域仿真结果与表 4 中 ERGA 指标的计算结果趋势一致。

因此, 基于 ERGA 的闭环配对原则和混合 H_2/H_∞ 方法能够共同提高所设计控制器的控制性能。

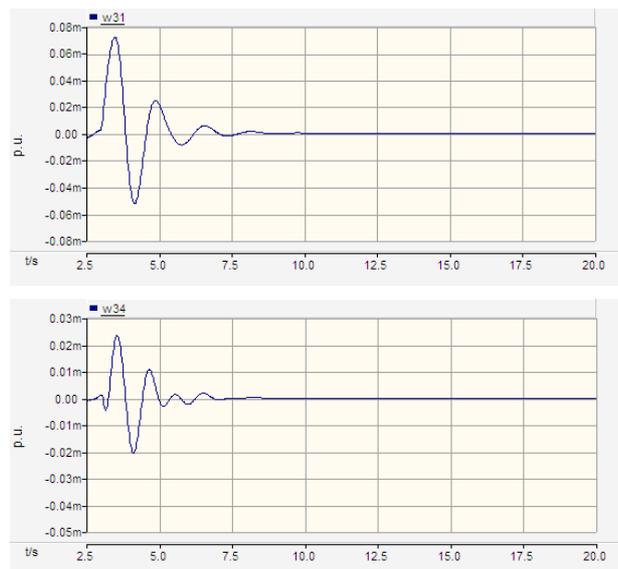


图 11 扰动①下投入附加阻尼鲁棒控制器后的转子角速度

Fig. 11 Response of generator rotor angular velocity



图 12 扰动①下投入附加阻尼鲁棒控制器后的区域间联络线功率

Fig. 12 Response of tie line active power

4 结论

本文研究了基于 ERGA 闭环配对原则和混合 H_2/H_∞ 方法的单馈入交直流并联输电系统机、网分散控制器设计, 主要结论如下:

(1) 分散控制相对地更能避免集中控制中遇到的复杂性和协调性难题, 单馈入直流输电系统的机侧和网侧控制器分散设计需要重点关注控制器间的相互作用。本文采用的 ERGA 方法集中了 RGA 和 DRGA 的优势, 充分考虑传递函数矩阵的动态和静态过程的基础上刻画控制回路间的相互作用, 通过合理选择控制器控制地点和反馈信号, 解耦控制器间的相互作用, 简便地利用单输入单输出系统的控制技术设计机侧和网侧控制器。

(2) 本文在设计直流侧和发电机侧的附加阻尼控制器时所采用的混合 H_2/H_∞ 方法考虑了系统的不确定性和控制代价, 而且, 由于 LMI 求解技术的应用, 控制规律的求解更容易, 具备工程应用价值。

参考文献

- [1] 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): 90-93.
LI Peng, WU Xiaochen, ZHANG Yao, et al. Interaction and coordination of modulation controllers of multi-feed HVDC in CSG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(21): 90-93.
- [2] XIONG Qiang, CAI Wenjian, HE Maojun. A practical loop pairing criterion for multivariable processes[J]. Journal of Process Control, 2005, 15(7): 741-747.
- [3] 李德葆, 陆秋海. 实验模态分析及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [4] 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.
- [5] 李海琛,董萍,刘明波,等. 基于相对增益矩阵和 Prony 技术的南方电网 FACTS 和 HVDC 之间交互影响分析[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 169-174.
LI Haichen, DONG Ping, LIU Mingbo, et al. Analysis on interaction between FACTS devices and HVDC power transmission system in china southern power grid based on relative gain array and Prony technology[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 167-174.
- [6] AVOY T M, ARKUN Y, CHEN R, et al. A new approach to defining a dynamic relative gain[J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(8): 907-914.
- [7] 俞立. 鲁棒控制——线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [8] SCHERER C, GAHINET P, CHILALI M. Multiobjective output-feedback control via LMI optimization[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1997, 42(7): 896-911.
- [9] 赵睿,张英敏,李兴源,等. 提高送端多直流落点系统暂态稳定性的非线性控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 7-12.
ZHAO Rui, ZHANG Yingmin, LI Xingyuan, et al. Nonlinear control strategy for improving the transient stability of sending ends multi-feed HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 7-12.
- [10] BO Z Q, LIN X N, WANG Q P, et al. Development of power protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8.
- [11] 姚其新,张侃君,韩情涛,等. 龙泉换流站直流控制保护系统运行分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 142-147.
YAO Qixin, ZHANG Kanjun, HAN Qingtao, et al. Operation analysis of Longquan converter station HVDC control and protection system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 142-147.
- [12] 顾威,李兴源,陈建国,等. 基于瞬时无功理论的 SVC 抑制次同步振荡的附加控制设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 107-111.
GU Wei, LI Xingyuan, CHEN Jianguo, et al. Additional control design of SVC for mitigating subsynchronous oscillation based on instantaneous reactive power theory[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 107-111.
- [13] 龙智,杨柳,姚文峰. 广东电网远景直流落点优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 145-150.
LONG Zhi, YANG Liu, YAO Wenfeng. Guangdong power grid DC placement optimization[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 145-150.
- [14] 梅生伟,申铁龙,刘康志. 现代鲁棒控制理论与应用[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [15] 魏韡,梅生伟,张雪敏. 先进控制理论在电力系统中的应用综述及展望[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 143-153.
WEI Wei, MEI Shengwei, ZHANG Xuemin. Review of advanced control theory and application in power system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 143-153.

收稿日期: 2016-07-17; 修回日期: 2016-10-25

作者简介:

赵睿(1986-),男,博士,研究方向为电网安全稳定与控制; E-mail: succzr1@163.com

卢斯煜(1986-),男,博士,研究方向为电网规划。

(编辑 姜新丽)