

基于 LMI 技术的交直流输电系统中 HVDC 阻尼控制器的设计

杨秀, 陈陈, 王西田

(上海交通大学电气工程系, 上海 200030)

摘要: 线性矩阵不等式(LMI)技术为多目标控制器的综合提供了新的途径。借鉴有极点区域配置约束的混合 H_2/H_∞ 问题的LMI解法,设计了HVDC阻尼控制器用于阻尼低频振荡。特征根计算与仿真分析表明,该控制器可在较大范围运行条件向系统提供足够的阻尼。

关键词: 阻尼控制器; 高压直流输电; 线性矩阵不等式

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)17-0020-03

0 引言

目前,随着我国电力建设的快速发展,HVDC(高压直流输电)由于其在经济上、技术上的巨大优势得到了广泛的应用。其中,HVDC对于输电系统稳定性的影响日益受到人们的重视。

当交流输电线因扰动引起输送功率变化时,由于HVDC控制系统所具有的快速反应特性,通过适当的附加阻尼控制策略,能够按照预定要求迅速调节直流输电功率,抵消交流输电系统因扰动引起的功率变化量,减小由于发电机输出的电功率与输入的机械功率之间的不平衡而引起的转子转速变化,从而提高了交流系统的稳定性。

鲁棒控制理论中的 H 控制理论已广泛应用于电力系统,如 PSS、HVDC 附加阻尼控制器等^[1,2]。这种 H 综合的问题只需求解两个黎卡提矩阵,复杂程度低。然而,单纯的 H 综合只能保证系统的闭环鲁棒稳定性,并不能直接对系统闭环极点进行配置,而这恰恰是电力系统暂态性能的关键指标,因此限制了它的使用。

近几年来,基于线性矩阵不等式(LMI)的控制系统设计方法引起了人们极大的兴趣,因为在控制系统的分析与设计中,许多控制问题都可以描述为包含LMI的凸可行解问题或最优化问题^[3]。如鲁棒控制理论中的 H 、 H_2 性能指标与极点配置约束等都可以表达成LMI形式^[4],对此内点法可以有效地进行求解。本文借鉴有极点区域配置约束的混合 H_2/H_∞ 问题的LMI解法设计了HVDC阻尼控制器,特征根计算与时域仿真表明该控制器具有较强的鲁棒性。

1 系统模型

考虑如图1所示单机无穷大系统, X_B 为无穷大交流系统等值电抗。其中发电机采用三阶模型,线性化的状态变量为 $X_g = [\dots E_q]^T$ 直流输电系统为三阶模型,线性化的状态向量为: $X_{dc} = [I_d]^T$ 。HVDC阻尼控制器如图2所示。

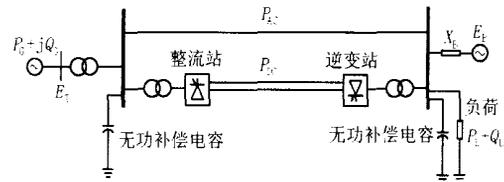


图1 交直流输电系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of AC/DC transmission system

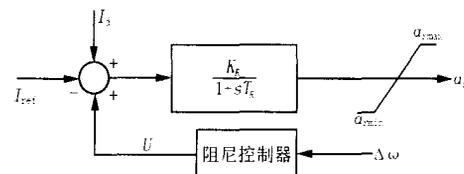


图2 整流站的附加阻尼控制器

Fig.2 Supplement damping controller in rectifier

因此,整个系统模型可以表示为6阶的状态方程:

$$\dot{X} = AX + BU \quad (1)$$

$$Y = CX$$

其中: $X = [X_g \ X_{dc}]^T$, 输出 Y 为发电机转速偏差, 输入 U 为 HVDC 整流站定电流控制的附加量。

系统运行条件的变化会引起系统的动态特性的相应变化,这主要反映在矩阵 A 的元素的变化,对于图1所示AC/DC系统,设无穷大母线电压 E_B 恒定,则系统稳态平衡点由发电机输出有功功率 P_G 、无功功率 Q_G 以及交流功率 P_{AC} 与直流功率 P_{DC} 之比 x 的影响,其中 x 由 HVDC 整流站触发角稳态值 α_0 决定。本文所取得系统运行条件如下: P_G 分别

取值 0.6、0.7、0.8、0.9、1.0 pu; Q_G 分别取值 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 pu; x 分别取值 0.2、0.4、0.6、0.8; 由此可以得到一组 (100 个) 6 阶线性化模型

$$\dot{X} = A_i X + BU, Y = CX, i = 1, \dots, 100 \quad (2)$$

系统矩阵 A_i 描述了系统模型的参数不确定性。

2 模型不确定性及其表述

2.1 模型不确定性

由于电力系统功率与负荷的变化, 电力系统运行工况总是在一定范围内变化, 这种变化可以表达为系统的参数不确定性。这种不确定性可以通过线性分式变换表述, 如图 3 所示:

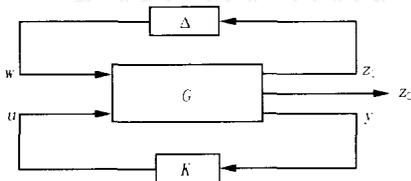


图 3 不确定系统的描述

Fig. 3 Uncertainty system representation

图 3 中, w 为外部输入, z_1 、 z_2 分别是与 H_1 、 H_2 指标有关的被控向量, 其中 w 与 z_1 用于表示模型的不确定性, 二者有如下的关系:

$$w = z_1 \quad (3)$$

其中 Δ 是实数矩阵, 并且满足 $\|\Delta\| < 1$ 。

增广系统 G 可以表达为如下的状态空间模型:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_1 w + Bu \\ x_1 &= C_1 x \\ z_2 &= C_2 x + D_2 u \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (4)$$

其中式 (4) 的动态特性可以表述为:

$$\dot{x} = (A_0 + B_1 \Delta C_1) x + Bu = A_i x + Bu \quad (5)$$

式 (5) 意味着选择适当的 B_1 、 C_1 , 总可以找到适当的 Δ , 满足 $\|\Delta\| < 1$, 使得式 (2) 所描述的所有系统模型均可以由式 (5) 包括。

极点配置约束下的混合 H_2/H_∞ 输出反馈综合的任务是, 对于对象 G , 预先给定闭环 H_∞ 性能 γ , 寻找一个输出反馈控制律

$$u = Ky$$

使得闭环系统: (1) 极点位于左半开平面的指定区域, (2) H_∞ 性能 $T_{wz_1} < \gamma$, (3) H_2 性能 T_{wz_2} 最小。这里, T_{wz_1} 、 T_{wz_2} 分别为闭环系统从 w 到 z_1 , 从 w 到 z_2 的传递函数。以上这些问题可以通过 Matlab 的 LMI 工具箱中的 `hinfmix()` 函数来解决^[5]。

2.2 B_1 、 C_1 的确定^[6]

式 (2) 的系统矩阵 A_i 可以写为:

$$A_i = A_0 + \Delta_i, \quad \Delta_i = B_1 \Delta_i C_1 \quad (6)$$

式 (6) 中 $A_0 = \sum A_i / N$ 表示系统标称模型, N 为模型的总数, B_1 、 C_1 的选择必须满足式 (6) 以及 $\|\Delta_i\| < 1$ 两个条件。

定义两个矩阵 $M_1, M_2 \in R^{n \times n}$ 其中 $n = 6$ 为模型的阶数。

$$\begin{aligned} M_1 &= [A_1 & A_2 & \dots & A_N] \\ M_2 &= [A_1^T & A_2^T & \dots & A_N^T] \end{aligned}$$

令 $r_B = \text{rank}(M_1)$, $r_C = \text{rank}(M_2)$ 。对 M_1 、 M_2 分别进行奇异值分解, 得

$$M_1 = U_B \begin{bmatrix} \Sigma_B & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} V_B^T, \quad M_2 = U_C \begin{bmatrix} \Sigma_C & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} V_C^T$$

其中:

$$\begin{aligned} \Sigma_B &= \text{diag}(b_1, b_2, \dots, b_{r_B}) \\ \Sigma_C &= \text{diag}(c_1, c_2, \dots, c_{r_C}) \end{aligned}$$

为 M_1 、 M_2 的奇异值矩阵, 且 $b_1, b_2, \dots, b_{r_B} > 0$, $c_1, c_2, \dots, c_{r_C} > 0$ 。极小的奇异值表示矩阵的秩 (r_B 或 r_C) 可以减小。

令 $\tilde{B}_1 = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_{r_B}]$, $\tilde{C}_1 = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_{r_C}]^T$ 其中: u_i 、 v_i 分别是 U_B 、 U_C 的列向量。如果选择 $B_1 = \tilde{B}_1$, $C_1 = \tilde{C}_1$, 则存在 Δ_i 满足式 (6)。

为满足 $\|\Delta_i\| < 1, i = 1, \dots, N$, 可采取如下方法:

令 $\tilde{B}_1 = \tilde{B}_1 \Sigma_B$, $\tilde{C}_1 = \Sigma_C \tilde{C}_1$ 。将 B_1 、 C_1 代替式 (5) 的 B_1 、 C_1 , 解得不同运行条件下的 Δ_i , 设 $k = \max_i \|\Delta_i\|$, 选择 B_1 、 C_1 如式 (7), 则满足 $\|\Delta_i\| < 1, i = 1, \dots, N$ 。

$$B_1 = \sqrt{k} B_1, \quad C_1 = \sqrt{k} C_1 \quad (7)$$

3 HVDC 阻尼控制器设计

HVDC 阻尼控制器的主要任务是提高系统的阻尼特性, 这可以通过极点配置约束来实现, 式 (2) 中的 100 个线性化模型的机电振荡模态的开环极点分布如图 4 所示, 由图中可见, 在大多数运行条件下, 无控制时的系统阻尼太弱 (极点实部 > -0.1), 甚至是不稳定的。

控制器的目标是对于式 (2) 所列出的所有模型, 系统的闭环极点实部小于 -0.7 , 并且阻尼率大于 0.1 。其 LMI 极点区域约束如图 5 所示, 其中 $\sigma_p = -0.7$, $\zeta_p = 6^\circ$ 。

按第三节所述方法表达系统模型的不确定性。首先, 对 M_1 、 M_2 进行奇异值分解可得:

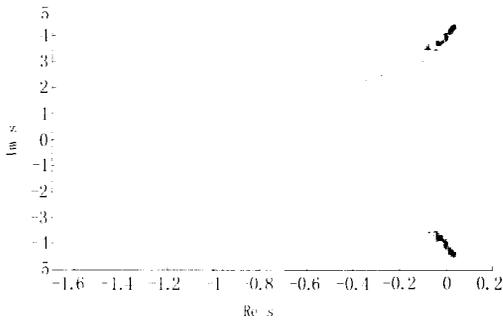


图4 所有运行条件下的机电振荡模式的开环极点

Fig.4 Open-loop poles for electromechanical mode on all operating conditions

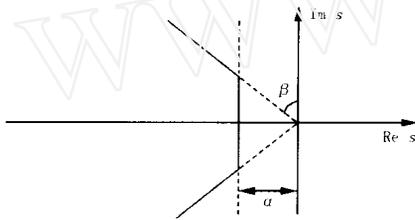


图5 LMI 区域

Fig.5 LMI region

$$\Sigma B = \text{diag}(1163.3, 575.7, 0.4, 0.02)$$

$$\Sigma B = \text{diag}(1162.8, 508.8, 7.4, 3.1, 0.4)$$

由于 M_1 、 M_2 的奇异值衰减极快,与前两个奇异值相比,后几个奇异值极小。从工程数值计算的角度来说,可以认为 $r_B = 2$, $r_C = 2$ 。按照第 3 节所述步骤计算,最终可得:

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.0004 & 0.0125 \\ -0.0112 & -0.0042 \\ 0 & 0 \\ 20.1118 & -2.5990 \\ 4.2425 & 0.8874 \end{bmatrix}$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 13.6562 & 6.9376 & 0.1876 & 0.0724 & -0.0093 & -0.3144 \\ 17.7845 & 10.6631 & 0.1935 & 0.0262 & -0.0131 & -0.0724 \end{bmatrix}$$

式(4)的 z_2 表达了系统的 H_2 性能要求,选择 C_2, D_2 如下:

$$C_2 = \begin{bmatrix} C \\ 0 \end{bmatrix}, \quad D_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ r^{1/2} \end{bmatrix}$$

其中: C 是式(4)的输出矩阵, r 是标量,表示对输入 u 的约束。其 H_2 性能指标等价于使得如下的代价函数 J 最小:

$$J = \int_0^{\infty} (y^2(t) + ru^2(t)) dt \quad (8)$$

本文中选取 $r = 1$,综合以上的极点约束条件,可得该控制器 $K(s)$ 如下式:

$$K(s) = 98.87 = \frac{(s+78.93)(s+1.021)(s+0.875)}{(s+794.1)(s+9.965)} \cdot \frac{s^2+1.224s+3.792}{(s^2+6.081s+21.85)(s^2+87.88s+7360)} \quad (9)$$

所设计的控制器阶数较高,宜用微机实现。

4 特征值计算及时域仿真

在式(9)所示的控制器作用下,式(2)所示的系统的闭环机电振荡模式的特征根分布如图6所示。

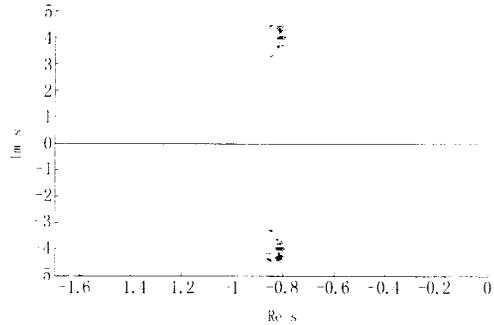


图6 机电振荡模式的闭环极点

Fig.6 Close-loop poles for electromechanical mode

从图6可见,对于式(2)所列出的所有系统模型,机电振荡模式阻尼得到了较大的提高,并且满足了我们的设计要求。同时,对图1所示系统在不同运行方式进行了非线性仿真,部分仿真结果见图7,图7中的扰动为发电机机械输入功率在1.0s突然下降20%,0.5s后恢复。从图7可见,所设计的控制器在各种运行条件下都能提供充分的阻尼,平息系统振荡。

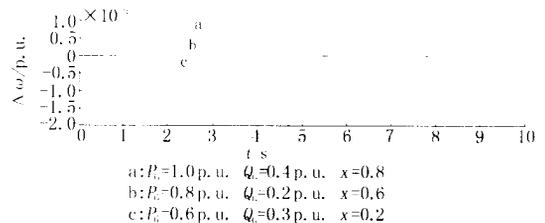


图7 系统在不同运行条件下的时域仿真

Fig.7 Time simulation on different operating conditions

5 结论

本文应用线性矩阵不等式(LMI)方法,并从多目标角度设计了HVDC鲁棒阻尼控制器,特征根分析与仿真结果均表明该控制器可以在较大范围内为系统提供足够的阻尼。需要进一步指出的是,所设计的控制器为全阶控制器,因此,当系统模型阶数较高时,需要考虑降阶控制器的设计,而降阶控制器的

(下转第 27 页 continued on page 27)

- 术 (Theory and Technology of Relay Protection of HV Transmission System) [M]. 北京:中国电力出版社 (Beijing:China Electric Power Press), 1995.
- [3] 沈国荣 (SHEN Guo-rong). 工频变化量距离继电器的研究 (Study of Power Frequency Variation Distance Relay) [A]. 中国电机工程学会第四次继电保护及安全自动装置学术会议 (Proceedings of the 4th Relay and Auto Installation Academic Institute of the CSEE). 1986.
- [4] 戴学安 (DAI Xue-an). 综论工频变化量距离继电器 (Summarization of Power Frequency Variation Distance Relay) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power

- Systems), 1995, 19(5): 41-47.
- [5] 刘万顺 (LIU Wan-shun). 电力系统故障分析 (Fault Analysis of Power System) [M]. 北京:中国电力出版社 (Beijing:China Electric Power Press), 1986.

收稿日期: 2003-12-09; 修回日期: 2004-04-15

作者简介:

张廷 (1979 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: zt1979.student@sina.com

李晓明 (1956 -), 男, 本科, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护、计算机在电力系统中的应用。

Research on steady-state overreach of power frequency variation distance relay

ZHANG Ting, LI Xiaoming

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: To penetrate into the characteristics of power frequency variation distance relay, this paper employs fault components to analyse exactly the operating characteristics of power frequency variation distance relay applied in transmission line of single terminal power supply. It shows that there is a steady state overreach with the distance relay in the surpassed phase when two phase short circuit ground fault with small transition resistance occurs outside the orientated region of transmission line. At the same time, two methods to defend the steady state overreach are presented.

Key words: power frequency variation; steady-state overreach; resistance relay; distance relay

(上接第 22 页 continued from page 22)

求解是非凸的, 这给 LMI 的求解带来了一定的困难, 同时也是 LMI 研究的热点, 因此, 低阶控制器的设计是下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] 田立军, 郭雷, 陈衍 (TIAN Li-jun, GUO Lei, CHEN Yan). H 电力系统稳定器的设计 (Design of H Power System Stabilizer) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 1999, 319(3): 59-62.
- [2] Chung C Y, Tse C T, Chui W T. Robust Control Design in AC/DC System [A]. Proceeding of the 5th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management. Hong Kong: 2000.
- [3] Boyd S P, Elghaoui L, Feron E. Linear Matrix Inequalities in Systems and Control theory [A]. Studies in Applied Mathematics. Philadelphia: 1994.

- [4] Chilali M, Gahinet P. H_∞-design with Pole Placement Constraints: A LMI Approach [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1996, 3(3): 358-367.
- [5] Gahinet P, Nemirovski A. LMI Control Toolbox for Use with Matlab [M]. The Mathworks Inc, 1995.
- [6] Werner H, Korba H, Yang T C. Robust Tuning of Power System Stabilizers Using LMI technique [J]. IEEE Trans on Control System Technology, 2003, 1(1): 147-152.

收稿日期: 2003-12-12; 修回日期: 2004-01-17

作者简介:

杨秀 (1972 -), 男, 博士研究生, 主要研究方向为 HVDC 的小信号分析与控制; E-mail: yangxiu72@263.net

陈陈 (1938 -), 女, 电力系统及其自动化专业教授, 主要从事电力系统稳定与控制研究;

王西田 (1972 -), 男, 博士, 研究方向为电力系统鲁棒控制。

Robust control design in AC/DC system based on LMI technique

YANG Xiu, CHEN Chen, WANG Xi-tian

(Electrical Engineering Department, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Linear Matrix Inequality (LMI) technique provides a new approach for the synthesis of multiojective controller. Based on the LMI for mixed H_2/H_∞ design under pole region constraints, this paper develops a HVDC damping controller for increasing the electromechanical damping. The eigenvalue analysis and simulation show that the controller can provide enough damping in a wide operating condition.

Key words: damping controller; HVDC; LMI