

基于非仿射非线性模型的 AC/DC 系统 H_∞ 鲁棒控制器设计

汤洪海¹ 李春文¹

摘要 讨论了交直流联合输电系统的 H_∞ 鲁棒控制问题. 首先对交直流输电系统提出一种五阶非仿射非线性不确定控制模型, 该模型能综合反映交直流系统的动态特性. 基于该模型采用分层控制思想设计了系统的 H_∞ 鲁棒控制器, 通过对直流系统换流器触发角的控制实现系统内部稳定和鲁棒性能的提高. 仿真结果验证了控制策略的有效性.

关键词 交直流输电系统, 非仿射非线性系统, 反馈线性化, H_∞ 鲁棒控制

中图分类号 TM72

H_∞ Robust Control of AC/DC Systems with Non-affine Nonlinear Model

TANG Hong-Hai¹ LI Chun-Wen¹

Abstract The H_∞ robust controller design of AC/DC power system is investigated in this paper. Firstly, a novel fifth-order uncertain non-affine nonlinear model is put forward. The proposed model can describe both the dynamics of DC and AC systems. Then, an H_∞ robust controller is constructed by employing the taxonomy design principle. It is shown that through the firing angle control of the DC system converters, the stability can be improved and the robust performance can be guaranteed. Simulation results illustrate the effectiveness of the proposed control strategy.

Key words AC/DC power system, non-affine nonlinear system, feedback linearization, H_∞ robust control

1 引言

直流输电系统具有调节迅速、运行灵活、能够快速改变电力系统有功潮流分布等特点, 因此在大容量远距离输电以及区域电力系统之间的互联等方面获得了广泛应用^[1,2], 如何利用直流系统调节快速的特点改善整个系统的稳定性及运行特性, 是交直流联合输电 (AC/DC) 系统的主要研究内容之一.

根据系统的运行状况和要求的不同, 利用直流系统快速改变电力系统有功潮流分布的特点则可以改善交直流系统的稳定性^[3,4]. 直流输电系统是典型的非线性系统, 通过在运行点邻域内对系统线性化难以保证系统在其他工况下具有良好的动态性能. 鉴于此, 很多非线性控制方法, 如微分几何^[3]、自适应控制^[5]、鲁棒控制^[6] 以及基于暂态能量函数的模糊阻尼控制^[7] 等在交直流联合输电系统中得到了应用, 并取得了较好的控制效果. 但是由于交直流联合输电系统的复杂性, 在这些文献中往往将直流系统考虑为调制功率的一阶惯性环节来设计控制律^[2~4], 导致所设计的控制器物理意义不明确, 不易实现.

本文综合考虑交直流输电系统直流和交流部分

的动态特性, 提出了一种新型非仿射非线性五阶不确定控制数学模型, 该模型以发电机功角和转速及直流系统的电流电压为状态量, 以直流系统整流和逆变触发角为控制量. 利用直流传输功率对交流系统稳定性的有效调制作用, 本文采用分层设计思想对该系统设计了鲁棒控制器, 反馈线性化时采用逆系统方法^[8], 避免了微分几何或其他较抽象的专门数学理论的引入, 便于工程技术人员理解和掌握.

2 基于交直流动态特性的控制模型设计

考虑图 1 所示 AC/DC 联合输电系统模型^[4], P_{e1} 和 P_{e2} 分别为两端系统 1 号和 2 号等值发电机的电磁功率, P_{ac} 为交流传输功率, P_{dc} 为直流传输功率, P_{L1} , P_{L2} 分别代表等值发电机 1 和 2 的地方负荷.

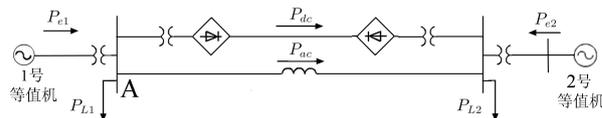


图 1 交直流联合输电系统结构图

Fig. 1 The structure of AC/DC system

AC/DC 系统中交流系统的动态方程可用 1, 2 号等值发电机的转子运动方程来描述

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \omega_i \\ \dot{\omega}_i = \frac{\omega_0}{H_i} \left(P_{mi} - \frac{D_i}{\omega_0} \omega_i - P_{ei} + P_{di} \right) \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期 2006-4-3 收修改稿日期 2006-9-4
Received April 3, 2006; in revised form September 4, 2006
国家重点基础研究专项基金 (G1998020307) 资助
Supported by National Key Project for Basic Research of P. R. China (G1998020307)
1. 清华大学自动化系 北京 100084
1. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084
DOI: 10.1360/aas-007-0709

其中 $\delta_i, \omega_i, D_i, H_i, P_{mi}$ ($i = 1, 2$) 分别为第 i 个等值发电机的功角、转速、阻尼系数、转子转动惯量及原动机输出的机械功率, P_{di} 为发电机的功率扰动.

电磁功率 P_{e1}, P_{e2} 与地方负荷以及交流功率和直流功率之间满足如下方程

$$P_{e1} = P_{L1} + P_{dc} + P_{ac} \quad (2)$$

$$P_{e2} = P_{L2} - P_{dc} - P_{ac} \quad (3)$$

其中交流传输功率 $P_{ac} = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta_{12}$, 则 $\dot{P}_{ac} = \frac{V_1 V_2}{X} \cos \delta_{12} \cdot \omega_{12}$, V_1 和 V_2 分别为两端交流系统的电压, X 为交流输电线的线路电抗. 综合 (1)~(3) 有

$$\begin{cases} \dot{\delta}_{12} = \omega_{12} \\ \dot{\omega}_{12} = \left(\frac{\omega_0}{H_1} P_{m1} - \frac{\omega_0}{H_2} P_{m2} \right) - \left(\frac{D_1}{H_1} \omega_1 - \frac{D_2}{H_2} \omega_2 \right) - \\ \left(\frac{\omega_0}{H_1} P_{L1} - \frac{\omega_0}{H_2} P_{L2} \right) - \\ \left(\frac{\omega_0}{H_1} + \frac{\omega_0}{H_2} \right) \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta_{12} - \\ \left(\frac{\omega_0}{H_1} + \frac{\omega_0}{H_2} \right) P_{dc} + \left(\frac{\omega_0}{H_1} P_{d1} - \frac{\omega_0}{H_2} P_{d2} \right) \end{cases} \quad (4)$$

由于 P_{dc} 不能直接用于系统控制, 因此还需要考虑直流系统的动态特性. 直流系统的动态模型一般根据仿真精确程度来分类, 文献 [9] 据此将稳定性研究中的 HVDC 模型分为简单模型、响应模型和详细模型三类. 目前对直流系统建模多以简单模型为主, 少数采用改进的响应模型. 本文采用改进的响应模型, 在该模型中, 直流系统主要包括换流变压器、换流器、直流输电线路、平波电抗器以及交流侧与直流侧滤波器, 其等值电路如图 2 所示. 其中 V_{dr} 和 V_{di} 表示整流器和逆变器的直流电压, L_{dr} 和 L_{di} 表示整流侧和逆变侧平波电抗器的电感值, L_d 和 R_d 为二分之一的直流线路电感值和电阻值, C_{dc} 为直流输电线路总的对地电容值, I_{dr} 和 I_{di} 表示整流侧和逆变侧的直流电流, V_c 为电容上的电压值.

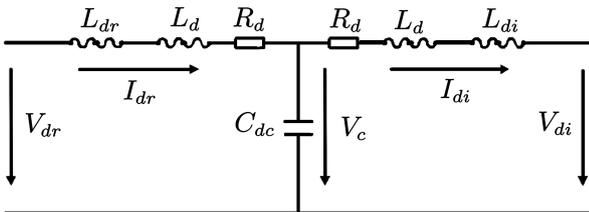


图 2 直流输电线路的等值电路

Fig. 2 The equivalent circuit of DC transfer system

由图 2, 直流输电部分动态特性方程可表示为

$$\begin{cases} L_{dr\Sigma} \frac{dI_{dr}}{dt} = -R_d I_{dr} + \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{ar} \cos \alpha - \\ \frac{3}{\pi} x_r I_{dr} - V_c \\ L_{di\Sigma} \frac{dI_{di}}{dt} = -R_d I_{di} - \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{ai} \cos \beta - \\ \frac{3}{\pi} x_i I_{di} + V_c \\ C_{dc} \frac{dV_c}{dt} = I_{dr} - I_{di} \end{cases} \quad (5)$$

其中 $L_{dr\Sigma} = L_{dr} + L_d$, $L_{di\Sigma} = L_{di} + L_d$, V_{ar} 和 V_{ai} 分别为整流器、逆变器交流侧线电压, α 为整流器的触发滞后角, β 为逆变器的触发超前角, x_r 和 x_i 分别为整流器和逆变器的换流电抗. 直流传输功率 $P_{dc} = V_{dr} I_{dr}$.

方程 (4) 和 (5) 共同构成 AC/DC 系统的动态方程. 为保持交流系统中发电机能同步稳定运行以及直流侧电压稳定^[2], 选择输出量为

$$y_1(t) = \delta_{12}(t) - \delta_{120} \quad (6)$$

$$y_2(t) = V_{di} - V_{dis} \quad (7)$$

假设发电机具有均匀阻尼为 $\frac{D_1}{H_1} = \frac{D_2}{H_2} =$

$\frac{D}{H}$ ^[3,4], 则整个 AC/DC 系统的动态方程为

$$\begin{cases} \dot{\delta}_{12} = \omega_{12} \\ \dot{\omega}_{12} = \left(\frac{\omega_0}{H_1} P_{m1} - \frac{\omega_0}{H_2} P_{m2} \right) - \frac{D}{H} \omega_{12} - \\ \left(\frac{\omega_0}{H_1} P_{L1} - \frac{\omega_0}{H_2} P_{L2} \right) - \left(\frac{\omega_0}{H_1} + \frac{\omega_0}{H_2} \right) \cdot \\ \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta_{12} - \left(\frac{\omega_0}{H_1} + \frac{\omega_0}{H_2} \right) P_{dc} + w \\ \dot{I}_{dr} = \frac{1}{L_{dr\Sigma}} \left(-R_d I_{dr} + \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{ar} \cos \alpha - \frac{3}{\pi} x_r I_{dr} - V_c \right) \\ \dot{I}_{di} = \frac{1}{L_{di\Sigma}} \left(-R_d I_{di} - \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{ai} \cos \beta - \frac{3}{\pi} x_i I_{di} + V_c \right) \\ \dot{V}_c = \frac{1}{C_{dc}} (I_{dr} - I_{di}) \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} y_1(t) = \delta_{12}(t) - \delta_{120} \\ y_2(t) = V_{di} - V_{dis} \end{cases}$$

其中 $w = \frac{\omega_0}{H_1} P_{d1} - \frac{\omega_0}{H_2} P_{d2}$ 为系统的外部干扰.

3 非线性 H_∞ 鲁棒控制器设计

针对式 (8) 所示的五阶非仿射非线性不确定数学模型, 本节采用分层控制思想对 AC/DC 系统设

计鲁棒控制器: 首先采用逆系统方法对不含扰动量的交直流联合输电系统进行反馈线性化, 然后应用线性 H_∞ 控制理论设计鲁棒控制器.

暂不考虑外扰, 对式 (6) 两边求三阶导数得

$$y_1^{(3)} = -\frac{D}{H}\dot{\omega}_{12} - F\frac{V_1V_2}{X}\cos\delta_{12}\cdot\omega_{12} - F\frac{V_{dr}}{L_{dr\Sigma}}(-R_dI_{dr} + \frac{3\sqrt{2}}{\pi}V_{ar}\cos\alpha - \frac{3}{\pi}x_rI_{dr} - V_c) \quad (9)$$

其中 $F = \frac{\omega_0}{H_1} + \frac{\omega_0}{H_2}$, V_{dr} 为常值 (直流电压). 由式 (7) 得

$$y_2 = V_{di} - V_{dis} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi}V_{ai}\cos\beta + \frac{3}{\pi}x_iI_{di} - V_{dis} \quad (10)$$

将式 (9) 中 $y_1^{(3)}$ 替换为 φ_1 , 可得反馈控制律 α

$$\alpha = \arccos\left(-\frac{\pi DL_{dr\Sigma}}{3\sqrt{2}FHV_{dr}V_{ar}}\dot{\omega}_{12} - \frac{\pi L_{dr\Sigma}V_{ai}}{3\sqrt{2}XV_{dr}}\cos\delta_{12}\cdot\omega_{12} + \frac{\pi R_dI_{dr}}{3\sqrt{2}V_{ar}} - \frac{\pi L_{dr\Sigma}}{3\sqrt{2}FV_{dr}V_{ar}}\varphi_1 + \frac{x_rI_{dr}}{\sqrt{2}V_{ar}} + \frac{\pi}{3\sqrt{2}V_{ar}}V_c\right) \quad (11)$$

将式 (10) 中 y_2 替换为 φ_2 , 得反馈控制律 β

$$\beta = \arccos\left(\frac{\pi}{3\sqrt{2}V_{ai}}\varphi_2 - \frac{x_i}{\sqrt{2}V_{ai}}I_{di} + \frac{\pi V_{dis}}{3\sqrt{2}V_{ai}}\right) \quad (12)$$

在上述反馈律的作用下, 最后得到有功率干扰时伪线性系统的鲁棒控制模型为

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{\varphi} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} w \\ = \mathbf{Ax} + \mathbf{B}_1\boldsymbol{\varphi} + \mathbf{B}_2w \quad (13)$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \boldsymbol{\varphi} \\ = \mathbf{Cx} + \mathbf{D}\boldsymbol{\varphi} \quad (14)$$

其中 $\mathbf{x} = [y_1 \ \dot{y}_1 \ \ddot{y}_1]^T$ 为状态变量, $\mathbf{y} = [y_1 \ y_2]^T$ 为输出变量, $\boldsymbol{\varphi} = [\varphi_1 \ \varphi_2]^T$ 为输入变量.

由于系统包含有两阶零动态, 故还需要考虑伪线性系统的零动态稳定性. 取 $\boldsymbol{\xi} = [y_1 \ \dot{y}_1 \ \ddot{y}_1]^T$,

$\boldsymbol{\eta} = [I_{di} \ V_c]^T$. 对式 (8) 的标称系统进行坐标变换得

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = \xi_2 \\ \dot{\xi}_2 = \xi_3 \\ \dot{\xi}_3 = \varphi_1 \\ \dot{\eta}_1 = \frac{1}{L_{di\Sigma}} \left[-\left(R_d + \frac{3}{\pi}x_i\right)\eta_1 - \frac{3\sqrt{2}}{\pi}V_{ai}\cos\beta + \eta_2 \right] \\ \dot{\eta}_2 = \frac{1}{C_{dc}} \left[\frac{1}{V_{dr}} \left(\frac{\omega_0}{H_1}P_{m1} - \frac{\omega_0}{H_2}P_{m2} \right) - \frac{D}{V_{dr}H}\omega_{12} - \frac{1}{V_{dr}} \left(\frac{\omega_0}{H_1}P_{L1} - \frac{\omega_0}{H_2}P_{L2} \right) - \frac{FV_1V_2}{V_{dr}X}\sin\delta_{12} - \eta_1 \right] \end{cases} \quad (15)$$

当 $\mathbf{y}(t) = 0$ 时, (15) 为零动态方程, 这时有

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_{di\Sigma}}(R_d + \frac{3x_i}{\pi}) & \frac{1}{L_{di\Sigma}} \\ -\frac{1}{C_{dc}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{3\sqrt{2}}{L_{di\Sigma}}V_{ai}\cos\beta \\ \frac{1}{C_{dc}V_{dr}}E \end{bmatrix} \\ = \tilde{\mathbf{A}}\boldsymbol{\eta} + \mathbf{b}$$

其中 $E = [(\frac{\omega_0}{H_1}P_{m1} - \frac{\omega_0}{H_2}P_{m2}) - (\frac{\omega_0}{H_1}P_{L1} - \frac{\omega_0}{H_2}P_{L2})]$. 此零动态是线性的, 当且仅当 $\text{Re}(\lambda_i(\tilde{\mathbf{A}})) < 0$ ($i = 1, 2$) 时, 零动态渐近稳定在全局唯一平衡点 $\boldsymbol{\eta} = -\tilde{\mathbf{A}}^{-1}\mathbf{b}$ 处. 由于

$$|\lambda I - \tilde{\mathbf{A}}| = \lambda^2 + \frac{\lambda}{L_{di\Sigma}}(R_d + \frac{3x_i}{\pi}) + \frac{1}{L_{di\Sigma}C_{dc}}$$

根据 Routh 判据, 零动态是渐近稳定的.

为抑制干扰 w 对系统性能的影响, 引入干扰抑制水准标量 $\gamma > 0$, 定义评价函数为

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} c_1x_1 \\ c_2x_2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中 c_1, c_2 为权重系数. 定义 $\|T_{\mathbf{z}w}(s)\|_\infty = \sup_{w \neq 0} \frac{\|\mathbf{z}\|_2}{\|w\|_2}$, 表示由 w 至 \mathbf{z} 的闭环传递函数.

式 (13), (14), (16) 为基于 H_∞ 控制理论的增广被控对象状态空间实现. H_∞ 控制问题是寻求反馈控制律 K 使得闭环系统内部稳定且 $\|T_{\mathbf{z}w}(s)\|_\infty < \gamma$. 即

$$\boldsymbol{\varphi} = \mathbf{Kx} \quad (17)$$

反馈控制器 K 可利用 Matlab 中的 LMI 控制工具箱来求解 RICCATI 不等式得到. 将式 (17) 代入 (11) 和 (12) 便得到满足鲁棒性能指标 γ 的控制律 α 和 β .

4 仿真结果分析

为检验所设计的非线性控制器的控制效果, 对交直流联合输电系统进行仿真试验. 根据国际大电网会议 (CIGRE) 提供的 HVDC 仿真模型, 其中直流线路额定电压定为 500 kV, 交流系统的额定线电压为 220 kV, 两端等值发电机 1 的阻尼系数 $D_1 = 4.0$, 转动惯量 $H_1 = 8.0$, 发电机 2 的 $D_2 = 4.5$, $H_2 = 9.0$, 线路电抗 $X = 1.27$, 取功率扰动为随机函数, 选择 $c_1 = 1$, $c_2 = 1$ 和 $\gamma = 0.2$. 利用 Matlab 中 LMI 控制工具箱得到 H_∞ 鲁棒反馈控制器为

$$\varphi = \begin{bmatrix} 0.1765 & -0.3923 & -1.5979 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x}$$

为验证该控制器的控制效果, 我们将 H_∞ 控制律和线性二次最优控制律 (LQR) 进行比较, 取 LQR 性能指标为

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty (\mathbf{y}^T \mathbf{Q} \mathbf{y} + \varphi^T \mathbf{R} \varphi) dt$$

经求解 RICCATI 方程

$$P(A - BR^{-1}D^TQC) + (A - BR^{-1}D^TQC)^T P - PBR^{-1}B^T P + [C^TQC - (D^TQC)^T R^{-1}(D^TQC)] = 0 \quad (18)$$

得到线性最优反馈控制律

$$\tilde{\varphi} = -R^{-1}(B^T P + D^T QC) \mathbf{x} \quad (19)$$

将式 (19) 代入式 (11) 和 (12) 可得触发角 α 和 β 的 LQR 控制律. 取 LQR 性能指标的加权阵 Q 和 R 为单位阵 I , 经求解 RICCATI 方程 (??) 得到线性最优反馈控制器为

$$\tilde{\varphi} = \begin{bmatrix} 1.0000 & 2.4142 & 2.4142 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x}$$

下面在状态 ω_{12} 发生初始状态误差时对两种控制器的控制效果进行仿真比较, 以及在交流输电系统发生三相短路故障的情况下对两种控制器与文献 [2] 和 [4] 中控制器的控制效果进行仿真比较分析.

1) 在 $t = 0$ s 时, 系统状态变量 ω_{12} 初始值偏离平衡点 3%, 此时观察系统的动态响应如图 3 所示.

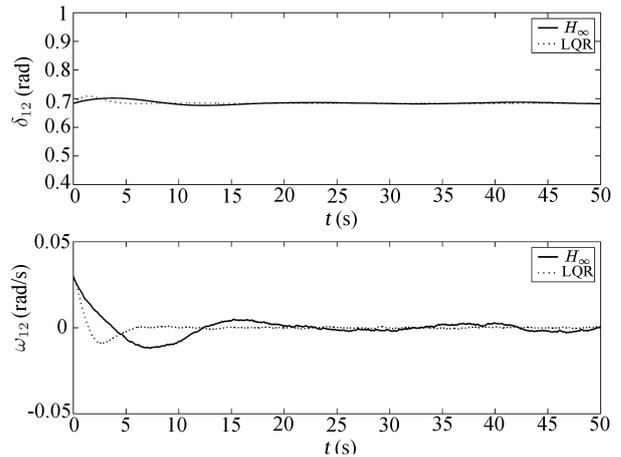


图 3 ω_{12} 有 3% 初始误差时的响应曲线

Fig. 3 System response to 3% initial error of ω_{12}

从图 3 中可以看出, 系统发生初值扰动时, 在 H_∞ 控制律和 LQR 控制律作用下等值发电机角均能回复到原平衡点.

2) 在 $t = 2$ s 时, 图 1 中 AC 系统中等值发电机 1 的出口处 A 点发生三相对地短路故障, $t = 2.5$ s 时故障消失. AC 系统和 DC 系统的动态响应分别如图 4 和图 5 所示.

从图 4 和图 5 中看到, 系统发生三相短路故障时, 交流传输功率急剧下降, 由此造成两端交流系统趋于失稳, 此时直流系统功率调制发生作用, 对两端系统进行功率补偿, 使交流系统的运行状态能够快速回到工作点并保持稳定. 在 [2] 和 [4] 中均将直流系统看作直流功率的一阶惯性环节, 在 [2] 中系统功角响应第一摆的峰值比无直流功率调制时下降了 22° , 但超调量依然高达 175%, [4] 中第一摆的超调量也达到了 150% 左右, 这对于发电机的性能和快速

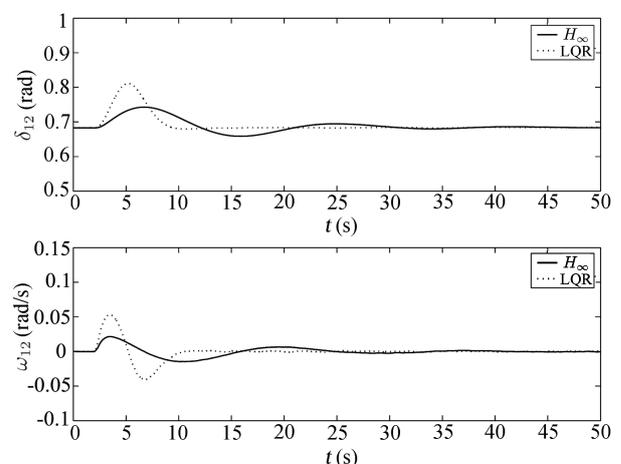


图 4 系统发生三相短路时 AC 系统的响应曲线

Fig. 4 AC system response to three-phase short circuit to ground fault

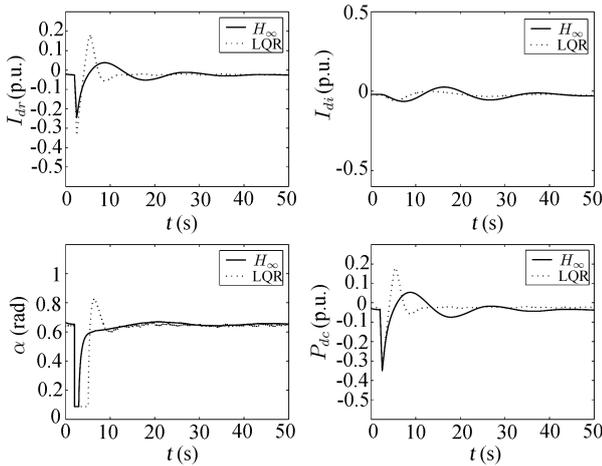


图5 系统发生三相短路时 DC 系统的响应曲线

Fig. 5 DC system response to three-phase short circuit to ground fault

恢复系统稳定都会带来不良的影响。本文设计的控制律基于三阶直流系统, 控制量为换流器的触发角, 具有明确的物理意义, 因此调节更直接, 响应更快, 从图中可看到功角在第一摆的超调量仅为 11.5% 左右。另由于系统存在不确定性, 而 LQR 控制器的控制量 α 角响应较慢造成交直流系统状态超调量均过大, 且控制量始终存在不规则抖动。本文设计的 H_∞ 控制器可以较好地抑制由干扰造成的系统动态响应, 控制律相对平滑, 且其状态超调量和振荡次数均小于 LQR 控制器。

5 结论

本文采用分层设计思想研究了交直流联合输电系统的鲁棒控制问题。首先在综合考虑交直流联合输电系统的交直流动态特性以及实际系统存在的外界干扰的条件下, 提出了一种新型非仿射非线性五阶不确定控制数学模型。该模型相对于以往简化的交直流联合输电系统模型更为详尽地描述了直流输电系统的动态性能, 使得基于该模型设计的系统 H_∞ 鲁棒控制器物理意义更加清晰, 通过对直流系统换流器触发角的控制可快速有效地实现系统稳定和提高系统鲁棒性能。本文所设计的控制器物理意义明确, 调节迅速, 效果明显, 易于实现。

References

- 1 Vancers I, Christofersen D J, Leirbukt A, Bennett M G. A survey of the reliability of HVDC systems throughout the world during 1997-1998. In: Proceedings of CIGRE Session. Paris, France, 2000. 14~102
- 2 Jing Yong, Yang Jin-Bai, Li Bai-Qing, Ma Shi-Ying. Research on improving transient stability of AC/DC hybrid

system by HVDC modulation. *Power System Technology*, 2005, **28**(10): 1~4

(荆勇, 杨晋柏, 李柏青, 马世英. 直流调制改善交直流混联系统暂态稳定性的研究. *电网技术*, 2004, **28**(10): 1~4)

- 3 Lu Qiang, Sun Yuan-Zhang. *Nonlinear Control Theory in Power Systems*. Beijing: Science Press, 1993
(卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制. 北京: 科学出版社, 1993)
- 4 Li Xing-Yuan, Chen Ling-Yun, Yan Quan, Wang Lu. Design of nonlinear complementary controllers for multi-infeed HVDC transmission systems. *Proceedings of the CSEE*, 2005, **25**(15): 16~19
(李兴源, 陈凌云, 颜泉, 王路. 多馈入高压直流输电系统非线性附加控制器的设计. *中国电机工程学报*, 2005, **25**(15): 16~19)
- 5 Rostamkolai N, Phadke A G, Long W F, Thorp J S. An adaptive optimal control strategy for dynamic stability enhancement of AC/DC power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1988, **3**(3): 1139~1145
- 6 Tang Jian-Hua, Liu Yu-Sheng, Li Xing-Yuan. Robust self-adaptive output-feedback control for HVDC converters. *Automation of Electric Power Systems*, 2004, **28**(17): 32~36
(汤建华, 刘玉生, 李兴源. 高压直流输电系统换流站鲁棒自适应输出反馈控制. *电力系统自动化*, 2004, **28**(17): 32~36)
- 7 Xu Guang-Hu, Sun Qu, Chen Chen. Design of HVDC fuzzy coordinated damping controller. *Automation of Electric Power Systems*, 2004, **28**(12): 18~23
(徐光虎, 孙衢, 陈陈. HVDC 模糊协调阻尼控制器的设计. *电力系统自动化*, 2004, **28**(12): 18~23)
- 8 Li Chun-Wen, Feng Yuan-Kun. *Inverse System Method for Multivariable Control System*. Beijing: Tsinghua University Press, 1991
(李春文, 冯元琨. 多变量非线性控制的逆系统方法. 北京: 清华大学出版社, 1991)
- 9 Denis L H A, Andersson G. Nonlinear dynamics in HVDC systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1999, **14**(4): 1417~1426



汤洪海 清华大学自动化系博士研究生, 主要研究方向为电力电子, 电能质量, 电力系统非线性控制。本文通信作者。Email: shh01@mails.tsinghua.edu.cn
(TANG Hong-Hai Ph.D. candidate at Department of Automation, Tsinghua University. His research interest covers power electronics, power quality, and power system nonlinear control. Corresponding author of this paper.)



李春文 清华大学自动化系教授, 主要研究方向为非线性系统分析与控制, 电力系统控制, 网络控制。
(LI Chun-Wen Professor at Department of Automation, Tsinghua University. His research interest covers nonlinear system stability analysis, power system nonlinear control, and network control.)