

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180891

基于 LMI 的交直流混合微网断面电压非脆弱鲁棒 H_∞ 控制

张虹¹, 侯宁¹, 葛得初², 孔冠荀¹

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 国网吉林省电力有限公司长春供电公司, 吉林 长春 130021)

摘要: 以交直流混合微网为研究背景, 对其中用于实现混合微网能量互济的交直流断面系统展开研究。考虑系统中存在的不确定性和脆弱性, 采用非脆弱鲁棒 H_∞ 控制方法以稳定交直流母线电压。同时为兼顾系统的动态响应特性, 结合 LMI(Linear Matrix Inequalities)区域极点配置, 设计交直流断面系统非脆弱鲁棒 $H_\infty - \gamma D$ - 稳定控制器。仿真研究表明, 所设计的控制器在参数不确定、存在外界干扰和控制器增益摄动情况下具有较好的控制性能, 满足混合微网交直流断面系统对稳定性、鲁棒性和高精度控制的要求。

关键词: 交直流断面; 控制器增益摄动; 非脆弱鲁棒 H_∞ 控制; LMI; 区域极点配置

Non-fragile robust H_∞ voltage control of AC-DC interface based on linear matrix inequalities in AC-DC hybrid microgrid

ZHANG Hong¹, HOU Ning¹, GE Dechu², KONG Guanxun¹

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China; 2. State Grid Changchun Power Supply Company, Changchun 130021, China)

Abstract: In this paper, the AC-DC interface system is studied to realize energy mutual aid in hybrid microgrid. Considering the uncertainties and fragilities of the system, the non-fragile robust H-infinity control is adopted to stabilize the AC-DC bus voltages. At the same time, taking the dynamic response characteristics into account, combined with the Linear Matrix Inequalities (LMI) regional pole placement method, and the non-fragile robust $H_\infty - \gamma D$ - stability controller is proposed for the AC-DC interface system. Simulation results show that the designed controller has better control performances with respect to uncertain parameters, external disturbances and controller gain perturbations, which satisfy the requirements of stability, robustness and high precision control of AC-DC interface system in hybrid microgrid.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777027) and Key Research and Development of Technology Plan of Jilin Province (No. 20180201010GX).

Key words: AC-DC interface system; controller gain perturbations; non-fragile robust H_∞ control; linear matrix inequalities (LMI); regional pole placement

0 引言

能源环境问题的凸显、电力负荷的增长和电网技术的不断革新, 促使微网技术向更高效、可持续和智能的方向快速发展^[1]。其中, 融合了交流微网和直流微网优势的交直流混合微网成为关注热点, 其充分考虑了分布式电源和储能装置的输出特性以及各类负荷的供电需求, 减少电力电子变换环节,

降低能量损耗, 是微网技术未来发展的新趋势^[2-3]。混合微网系统中连接交流区域和直流区域的双向 AC-DC 变换器作为能量通道构成交直流断面, 用于实现多区域间的功率转移, 对平衡系统能量、稳定母线电压和提高电网弹性具有重要作用。

交直流区域间的能量互济依赖于断面有效的调控策略, 而有效的控制方法是保证交直流断面充分发挥其优势的关键技术之一^[4-6]。文献[7-8]针对混合微网并网和离网模式提出适用于不同模式间电压和功率关系的断面变换器控制策略, 以解决不同模式下的功率流动问题, 维持母线电压平衡。文献

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51777027); 吉林省科技计划重点研发项目资助(20180201010GX)

[9]提出一种模块化变换器的双向运行控制方法,采用正向和负向电压调节器,实现各并联模块在整流与逆变状态分别以不同的直流母线电压运行。文献[10-11]围绕不平衡电网电压引起的断面系统谐波问题,采用比例积分重复控制策略抑制谐波影响,优化电能质量。文献[12]整合了分层控制与集中控制,避免断面系统在不同控制模式间的切换,提高系统运行可靠性。

上述研究对平衡系统功率和稳定母线电压都有一定效果,但缺乏对混合微网中不确定性的考虑,面对大量波动性很强的微源、工作点需要大范围突变的断面换流系统,其中存在的不确定因素会使电压偏差不可避免,甚至影响系统安全稳定运行。因此为了更好地维护系统性能,采用在抗干扰性能方面具有优势的鲁棒控制方法成为众多学者的研究热点^[13]。文献[14]基于电压、电流双环设计提出改进鲁棒下垂控制方法,但该方法只适用于线路阻抗呈阻性的情况。文献[15]采用非线性鲁棒控制方法处理光伏并网系统中存在的模型结构不确定问题。文献[16]提出重复 H_∞ 方法净化并网逆变器中的谐波电流。文献[17-18]考虑了分布式电源间歇式出力引发的系统不确定性,但未涉及控制器在实现时因自身参数偏离原设计值发生扰动而引起的脆弱性问题。

鉴于直流微网不存在频率、相位跟踪和无功调节,所以母线电压是反映系统稳定运行及能量平衡的关键指标^[19-20]。考虑到分布式电源出力随机性会引起母线电压波动,且系统建模中存在参数不确定性,此外控制器的频繁动作等使控制系统呈现脆弱性。故本文构建包含电压扰动和参数摄动的不确定系统模型,考虑控制器增益发生加性有界摄动,设计状态反馈非脆弱 H_∞ 控制律。为改善系统瞬态响应特性,结合LMI区域极点配置使系统闭环极点落在期望区域内。所设计的控制器同时满足非脆弱 H_∞ 和极点约束条件多性能指标,并通过LMI凸优化问题进一步求得控制器参数,在Matlab/Simulink平台中验证所提方法的有效性。

1 交直流断面系统及断面不确定模型

1.1 交直流混合微网断面系统

交直流混合微网是分布式电源、储能、交直流负荷及断面换流区域的有机整体,通过公共连接点断路器并入主网。图1为常见交直流混合微网的组成拓扑,由多台并联AC-DC变换器构成的断面区域形成连接交、直流子网的桥梁,实现功率交互可控。子网中各类分布式电源及储能装置通过AC-DC整流器或DC-DC变流器接入交直流母线,向多类

负荷梯级供电。

交直流混合微网中,交流子网一方面与主网协作运行,另一方面又有很强的自主性,而直流子网则通过断面区域与交流区互联。根据分布式电源及负荷供需要求,由断面区域灵活控制系统潮流,避免功率偏差引起的电压不稳,在保证电能质量的前提下实现负荷的持续供电。

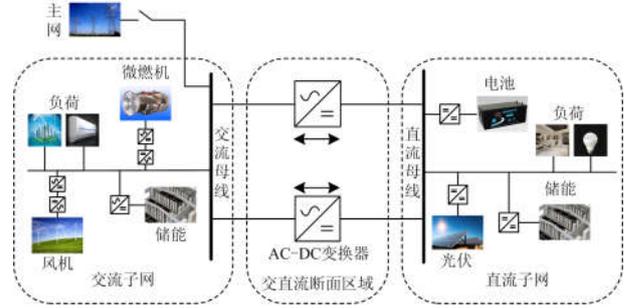


图1 交直流混合微网结构

Fig. 1 Structure of AC-DC hybrid microgrid

1.2 交直流断面系统不确定模型

交直流混合微网断面电路结构如图2所示。

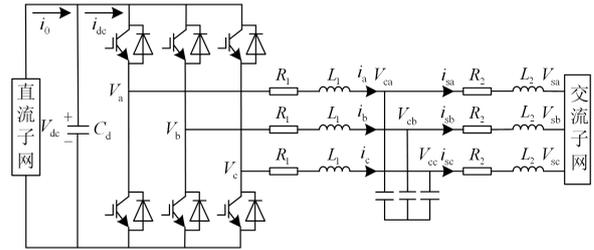


图2 交直流混合微网断面结构

Fig. 2 Structure of AC-DC interface system in hybrid microgrid

根据基尔霍夫定律,得到断面系统微分方程如式(1)所示。

$$\begin{cases} L_1 \frac{d\mathbf{i}_{abc}}{dt} = \mathbf{V}_{abc} - R_1 \mathbf{i}_{abc} - \mathbf{V}_{cabc} \\ L_2 \frac{d\mathbf{i}_{sabc}}{dt} = \mathbf{V}_{cabc} - R_2 \mathbf{i}_{sabc} - \mathbf{V}_{sabc} \\ C \frac{d\mathbf{V}_{cabc}}{dt} = \mathbf{i}_{abc} - \mathbf{i}_{sabc} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{i}_{abc} = [i_a \ i_b \ i_c]^T$ 和 $\mathbf{V}_{abc} = [V_a \ V_b \ V_c]^T$ 为变换器输出电流和输出电压; $\mathbf{i}_{sabc} = [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}]^T$ 和 $\mathbf{V}_{sabc} = [V_{sa} \ V_{sb} \ V_{sc}]^T$ 为交流侧电流和电压; $\mathbf{V}_{cabc} = [V_{ca} \ V_{cb} \ V_{cc}]^T$ 为交流滤波电容电压; L_1 和 L_2 为交流滤波电感; C 为交流滤波电容; R_1 和 R_2 为变换器和线路损耗等效电阻。

将式(1)改写为状态空间表达式,如式(2)。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}_1\mathbf{w} + \mathbf{B}_2\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}_1\mathbf{w} + \mathbf{D}_2\mathbf{u} \end{cases} \quad (2)$$

式中: 状态量 $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$, $x_1 = i_{abc}$, $x_2 = i_{sabc}$, $x_3 = V_{cabc}$; 控制输入 $u = V_{abc}$; 扰动输入 $w = V_{sabc}$; 控制输出 $y = V_{cabc}$ 。系数矩阵 \mathbf{A} 、 \mathbf{B}_1 、 \mathbf{B}_2 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{D}_1 和 \mathbf{D}_2 分别为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R_1}{L_1} & 0 & -\frac{1}{L_1} \\ 0 & -\frac{R_2}{L_2} & -\frac{1}{L_2} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{L_2} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = [0 \ 0 \ 1], \quad \mathbf{D}_1 = 0, \quad \mathbf{D}_2 = 0.$$

混合微网中分布式电源如光伏、风机等受气候条件影响输出功率具有随机性, 使得网络中的功率难以实时、动态平衡, 进而造成交直流母线电压偏差增大。基于表达式(2), V_{sabc} 相当于变化主动源, 表征电压瞬态变化, 作为外部扰动。同时, 考虑到系统元件老化、受损等导致模型参数摄动, 其摄动模型可以描述为参数 R_1 、 R_2 、 L_1 和 L_2 改变的动态模型。由于电容 C 主要起滤波作用, 故假定参数 C 固定。则考虑电压扰动和参数摄动问题的表达式为

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} -\frac{R_1+r_1}{L_1+l_1} & 0 & -\frac{1}{L_1+l_1} \\ 0 & -\frac{R_2+r_2}{L_2+l_2} & -\frac{1}{L_2+l_2} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{L_2+l_2} \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{w} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1+l_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{u} \quad (3)$$

式中: r_1 、 r_2 、 l_1 和 l_2 分别为参数 R_1 、 R_2 、 L_1 和 L_2 的摄动量, 考虑系统参数摄动范围为 20%, 则摄动量可分别表示为 $r_i = R_i(1+0.2\delta_{r_i})$ 和 $l_i = L_i(1+0.2\delta_{l_i})$ ($i=1,2$), 其中, δ_{r_1} 、 δ_{r_2} 、 δ_{l_1} 和 δ_{l_2} 为对应参数的摄动变量, 变化范围为 $[-1,1]$ 。

根据式(3), 将考虑不确定性的被控对象状态空间表达式改写为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{A} + \Delta\mathbf{A})\mathbf{x} + (\mathbf{B}_1 + \Delta\mathbf{B}_1)\mathbf{w} + (\mathbf{B}_2 + \Delta\mathbf{B}_2)\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}_1\mathbf{w} + \mathbf{D}_2\mathbf{u} \end{cases} \quad (4)$$

式中: \mathbf{A} 、 \mathbf{B}_1 、 \mathbf{B}_2 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{D}_1 和 \mathbf{D}_2 均为已知矩阵; $\Delta\mathbf{A}$ 、 $\Delta\mathbf{B}_1$ 和 $\Delta\mathbf{B}_2$ 为参数摄动矩阵且满足式(5)。

$$[\Delta\mathbf{A} \ \Delta\mathbf{B}_1 \ \Delta\mathbf{B}_2] = \mathbf{E}\Sigma[\mathbf{F}_a \ \mathbf{F}_b \ \mathbf{F}_c]^T \quad (5)$$

式中: \mathbf{E} 、 \mathbf{F}_a 、 \mathbf{F}_b 和 \mathbf{F}_c 为具有适当维数的实常数矩阵; Σ 为具有 Lebesgue 可测元素的矩阵且满足 $\Sigma^T\Sigma \leq \mathbf{I}$ 。

$$\Delta\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{R_1l_1 - L_1r_1}{L_1(L_1+l_1)} & 0 & \frac{l_1}{L_1(L_1+l_1)} \\ 0 & \frac{R_2l_2 - L_2r_2}{L_2(L_2+l_2)} & \frac{l_2}{L_2(L_2+l_2)} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\Delta\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{l_2}{L_2(L_2+l_2)} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \Delta\mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} -\frac{l_1}{L_1(L_1+l_1)} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{F}_b = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{R_2l_2}{L_2(L_2R_2 - r_2L_2)} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_a = \begin{bmatrix} \frac{R_1}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_2}{L_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_1L_2} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{F}_c = \begin{bmatrix} -\frac{R_1l_1}{L_1(l_1R_1 - L_1r_1)} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

2 非脆弱 H_∞-γD-稳定控制器设计

2.1 控制律设计

实际运行中, 控制器的实现由于元件老化、转换精度和频繁切换等原因, 经常出现参数摄动的情况, 而现有的鲁棒控制方法对控制参数的微小变化非常敏感, 相对较小的摄动则可能使闭环系统的性能下降或破坏稳定性, 即表现为高度的脆弱性。本文控制器的设计目标就是为不确定系统(4)设计非脆弱鲁棒控制器使其对自身增益变化具有补偿作用, 平衡参数摄动引起的控制系统脆弱性。图 3 所示为非脆弱鲁棒控制结构, 其中, G 为受控对象, K 为非脆弱鲁棒控制器, w 为扰动输入, u 为控制输入, y 为测量输出。

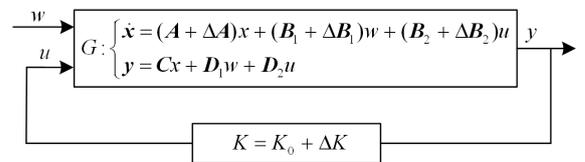


图 3 非脆弱鲁棒 H_∞控制器图

Fig. 3 Diagram of non-fragile robust H_∞ controller

设计状态反馈非脆弱鲁棒 H_∞ 控制律为

$$u = Kx = (K_0 + \Delta K)x \quad (6)$$

式中: K_0 为控制器名义增益; ΔK 为控制器增益摄动, 并具有加性范数有界形式如式(7)。

$$\Delta K = M \Sigma_K N \quad (7)$$

式中: M 和 N 为具有适当维数的常数实矩阵; Σ_K 为具有 Lebesgue 可测元素的矩阵且满足关系 $\Sigma_K^T \Sigma_K \leq I$ 。

由系统(4)和控制律(6)构成不确定闭环增广系统如式(8)。

$$\begin{cases} \dot{x} = A_0 x + B_0 w \\ y = C_0 x + D_0 w \end{cases} \quad (8)$$

式中: $A_0 = A_K + \Delta A_K$, $A_K = A + B_2(K_0 + \Delta K)$, $\Delta A_K = E \Sigma (F_a + F_c K_0 + F_c \Delta K)$; $B_0 = B_1 + \Delta B_1$; $C_0 = C + D_2(K_0 + \Delta K)$; $D_0 = D_1$ 。

2.2 LMI 区域极点配置

在补偿控制器对自身增益摄动的基础上, 采用 LMI 区域极点配置方法可有效避免系统中存在的不确定因素导致可能出现的单个主导极点配置不够准确的问题, 以达到改善系统动态性能的效果。采用该方法只需将闭环极点配置在复平面上一个适当的区域 D 内即可保证闭环系统的稳态和动态特性达到预期效果。文中使闭环极点落在如图 4 所示的预先选定的 LMI 区域 $D(\alpha, r, \theta)$ 内, 即可保证闭环系统的最小衰减度为 α 、最小阻尼比 $\zeta = \cos \theta$ 和最大自然频率 $\omega_n = r \sin \theta$ 。

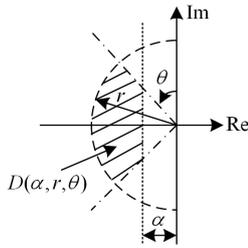


图 4 区域极点配置 D

Fig. 4 Region D for pole location

定义 复平面 C 中某一区域 D , 若存在已知实对称矩阵 L 和矩阵 M , 满足 $D = \{s \in C: L + sM + \bar{s}M^T < 0\}$, 则该区域为 LMI 区域。若矩阵 A 所有特征值全部落在 LMI 区域 D 中, 即 $\sigma(A) \subset D$, 则称矩阵 A 为 D -稳定^[21]。

定理 1 对于图 4 所示区域 D , D -稳定的充要条件是存在对称正定矩阵 W 满足矩阵不等式:

$$L \otimes W + M \otimes (AW) + M^T \otimes (AW)^T < 0 \quad (9)$$

式中, \otimes 为 Kronecker 乘积。

2.3 控制器性能指标及求解

在具有极点约束的状态反馈非脆弱 H_∞ 控制律作用下, 系统(8)满足以下性能指标:

1) 闭环系统渐进稳定

2) 扰动输入 w 到测量输出 y 的 H_∞ 范数为

$$\|T_{zw}(s)\|_\infty = \sup_{w \in L_2 \setminus \{0\}} \frac{\|z\|_2}{\|w\|_2}$$

, 对给定的常数 $\gamma > 0$, 保证 $\|T_{zw}(s)\|_\infty < \gamma$, 此时称 γ 为最小干扰抑制度。 γ 愈小, 由 w 引入的不确定因素受抑制程度愈高, 达到相应的鲁棒性能愈好。根据有界实引理可知^[22], 闭环系统(8)满足该性能要求的充要条件是存在对称正定矩阵 P , 使得:

$$\begin{bmatrix} A_0^T P + P A_0 & P B_0 & C_0^T \\ B_0^T P & -\gamma I & D_0^T \\ C_0 & D_0 & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \quad (10)$$

3) LMI 区域极点配置满足 D -稳定

同时满足上述 3 个性能指标的控制器设计问题即为断面控制系统的非脆弱鲁棒 $H_\infty - \gamma D$ -稳定化问题, 那么如何获得控制器的可行解则为设计问题的关键。

当系统(4)存在状态反馈控制器(6)时, 闭环系统虽然如式(8), 但此时 A_0 、 B_0 和 C_0 包含了非线性状态反馈矩阵 K , 不再是已知常数矩阵, 无法按照一般的线性分析数值方法处理。故为得到满足上述性能指标要求的 $H_\infty - \gamma D$ -稳定控制器, 将其转换为 LMI 凸优化问题, 有如下定理。

定理 2 对于不确定系统(4)和给定的常数 $\gamma > 0$, 采用满足式(7)的非脆弱状态反馈控制律(6), 满足闭环系统渐进稳定且具有 H_∞ 范数界 γ 的充分条件是存在正定对称矩阵 X 、矩阵 Y 及常数 $\lambda_1 > 0$ 、 $\lambda_2 > 0$, 使得:

$$\begin{bmatrix} \Xi & * & * & * & * & * & * \\ B_1^T & -\gamma I & * & * & * & * & * \\ CX + D_2 Y & D_1 & -\gamma I & * & * & * & * \\ \lambda_1 E^T & 0 & 0 & -\lambda_1 I & * & * & * \\ F_a X + F_c Y & F_b & 0 & 0 & -\lambda_1 I & * & * \\ \lambda_2 M^T B_2^T & 0 & \lambda_2 M^T D_2^T & 0 & \lambda_2 M^T F_c^T & -\lambda_2 I & * \\ NX & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_2 I \end{bmatrix} < 0 \quad (11)$$

式中: $\Xi = AX + B_2 Y + X A^T + Y^T B_2^T$; $*$ 为对称转置。

定理 3 状态反馈控制律(5)作用下, 闭环系统(3)极点在 LMI 区域 $D(\alpha, r, \theta)$ 内鲁棒可配置的条件是存在对称正定矩阵 Q , 使得:

$$\begin{aligned}
& A_0 Q + Q A_0^T + 2\alpha Q < 0 \\
& \begin{bmatrix} -rQ & A_0 Q \\ Q A_0^T & -rQ \end{bmatrix} < 0 \\
& \begin{bmatrix} \sin \theta (A_0 Q + Q A_0^T) & \cos \theta (A_0 Q - Q A_0^T) \\ \cos \theta (Q A_0^T - A_0 Q) & \sin \theta (A_0 Q + Q A_0^T) \end{bmatrix} < 0
\end{aligned} \quad (12)$$

根据定理 2 和定理 3, 对不确定系统(4)设计形如式(6)的状态反馈控制器, 使其同时满足极点约束条件和非脆弱鲁棒性要求, 需要求解含有非线性矩阵变量 X 、 Y 和 Q 的矩阵不等式(11)和式(12), 转化为凸优化问题如下:

$$\begin{aligned}
& \min \gamma \\
& \text{s.t.} \quad \begin{bmatrix} \Xi & * & * & * & * & * & * \\ B_1^T & -\gamma I & * & * & * & * & * \\ CX + D_2 Y & D_1 & -\gamma I & * & * & * & * \\ \lambda_1 E^T & 0 & 0 & -\lambda_1 I & * & * & * \\ F_a X + F_c Y & F_b & 0 & 0 & -\lambda_1 I & * & * \\ \lambda_2 M^T B_2^T & 0 & \lambda_2 M^T D_2^T & 0 & \lambda_2 M^T F_c^T & -\lambda_2 I & * \\ NX & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_2 I \end{bmatrix} < 0 \\
& A_0 Q + Q A_0^T + 2\alpha Q < 0 \\
& \begin{bmatrix} -rQ & A_0 Q \\ Q A_0^T & -rQ \end{bmatrix} < 0 \\
& \begin{bmatrix} \sin \theta (A_0 Q + Q A_0^T) & \cos \theta (A_0 Q - Q A_0^T) \\ \cos \theta (Q A_0^T - A_0 Q) & \sin \theta (A_0 Q + Q A_0^T) \end{bmatrix} < 0
\end{aligned} \quad (13)$$

通过 LMI 凸优化问题得到 $H_\infty - \gamma D$ - 稳定控制律 $u = (K_0 + M \Sigma_K N)x$, 控制器名义增益 $K_0 = YX^{-1}$ 。控制器的实现即可保证 H_∞ 范数界 γ 最小又将闭环极点配置在期望的 LMI 区域 D 内, 减少由于干扰引起的调节误差, 提高系统动态特性。

2.4 控制结构

为平抑交直流母线中输入有功功率和输出有功功率不平衡引起的母线电压波动, 控制系统采用双环控制结构, 如图 5 所示。直流电压外环采用 PI 控制, 主要作用是确定内环滤波电容电压的参考值 V_{cabc}^{ref} , 维持断面 AC-DC 变换器直流侧母线电压稳定。滤波电容电压内环应用 $H_\infty - \gamma D$ - 稳定控制器,

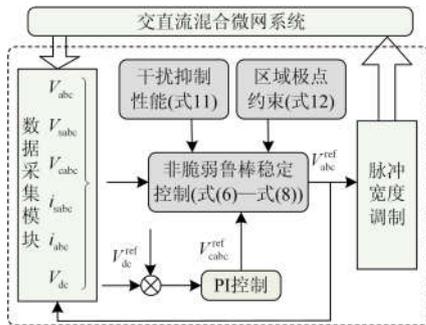


图 5 交直流断面控制框图

Fig. 5 Control diagram of AC-DC interface

控制内环输出为变换器输出电压参考值 V_{abc}^{ref} 。所得参考值一方面与数据采集模块中的实时电量信息进行反馈误差调节, 另一方面传输到断面系统, 结合脉冲宽度调制比 d 得到换流器触发信号, 灵活调控断面功率流动, 稳定交直流母线电压, 达到鲁棒稳定性和鲁棒性能要求。

3 系统仿真分析

为验证断面系统中基于 LMI 区域极点配置的非脆弱鲁棒 $H_\infty - \gamma D$ - 稳定控制器的可行性和有效性, 本文在 Matlab/Simulink 平台中搭建如图 2 所示的仿真模型。仿真参数: 直流母线电压为 680 V, 直流侧电容为 300 μF , 交流系统频率为 50 Hz, 交流侧相电压 220 V, 交流滤波参数 L_1 、 L_2 和 C 分别为 6 mH、3 mH 和 10 μF , 换流器和线路损耗等效电阻 R_1 和 R_2 分别为 0.5 Ω 和 0.2 Ω 。

$$\text{式(5)中取 } E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} 1 & & \\ & 1 & \\ & & 1 \end{bmatrix},$$

$$N = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad \text{取摄动形式的矩阵 } \Sigma_K = \text{diag}\{\delta_1(t),$$

$\delta_2(t), \delta_3(t)\}$, $|\delta_i(t)| \leq 1 (i=1,2,3)$ 。通过 Matlab 中 LMI 工具箱求解, 得到 $\gamma=0.9834$, 控制器增益名义值为

$$K_0 = \begin{bmatrix} -1.1985 & -0.3254 & -1.7881 \\ 6.5598 & -7.8770 & 9.4384 \\ -7.3070 & -1.3069 & -9.0296 \end{bmatrix}, \quad \text{控制器增益摄}$$

$$\text{动为 } \Delta K = \begin{bmatrix} 1.7 & 0.8 & 0.9 \\ 1.5 & 1 & 1.5 \\ 2.2 & 1.3 & 1.7 \end{bmatrix}, \quad \text{非脆弱鲁棒控制器增益}$$

$$\text{为 } K = \begin{bmatrix} 0.4985 & 0.4683 & -0.8899 \\ 8.0658 & -6.8644 & 10.9241 \\ -5.1100 & -0.0131 & -7.3314 \end{bmatrix}.$$

为使断面系统获得较好的动态特性, 闭环系统的过渡过程指标如最大超调、衰减时间和上升时间等受到相应限制, 在 LMI 区域 $D(\alpha, r, \theta)$ 中取 $\alpha=500$, $r=6000$, $\theta=60^\circ$ 。闭环系统区域极点分布如图 6 所示。

在图 6 中, 主导极点未发生大范围的变动, 且所有极点均在虚轴左侧, 说明在 $H_\infty - \gamma D$ - 控制下系统是稳定的。下面分析 $H_\infty - \gamma D$ - 稳定控制器对系统参数摄动和电压偏差的控制作用。

算例 1: 考虑负荷参数变化 20%, 即 L_1 从 4.8 mH

到 7.2 mH, L_2 从 2.4 mH 到 3.6 mH, R_1 从 0.4 Ω 变换到 0.6 Ω , R_2 由 0.16 Ω 增长为 0.24 Ω , 研究 $H_\infty - \gamma D$ -稳定控制器对参数摄动的鲁棒性能, 如图 7 所示。

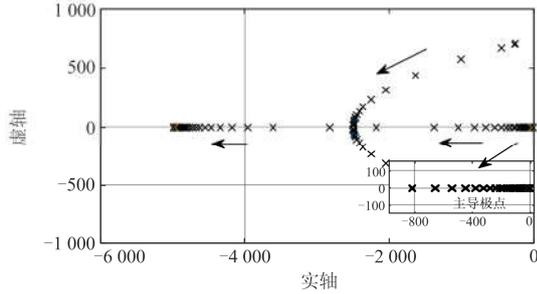


图 6 区域闭环极点分布

Fig. 6 Closed loop pole distribution

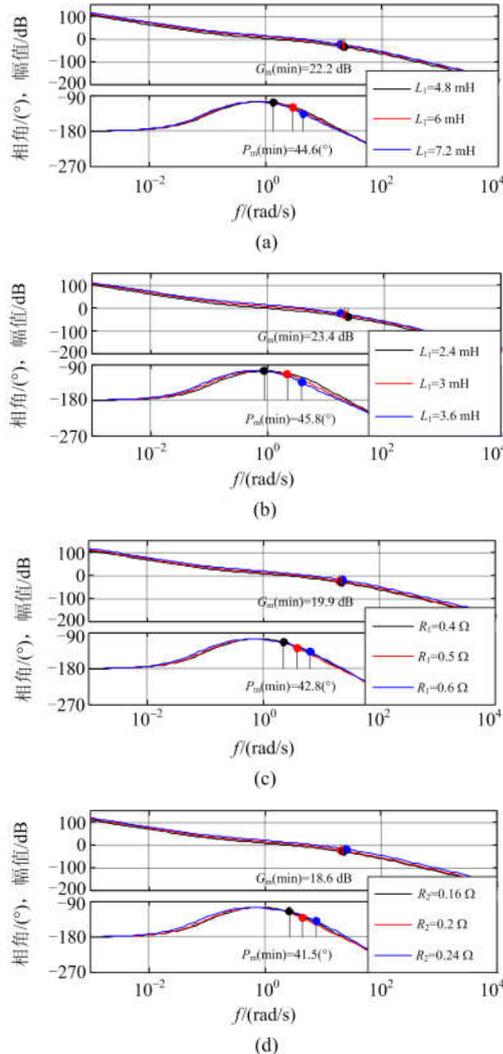


图 7 参数摄动时 $H_\infty - \gamma D$ -控制伯德图

Fig. 7 Bode diagram of $H_\infty - \gamma D$ -stability controller when parameters change

由图 7 可见, 在相位穿越点 -180° 处对应的幅值增益均低于 0 dB, 说明 $H_\infty - \gamma D$ -控制保证闭环系统在参数摄动情况下的稳定性。在幅频特性中, 当幅值裕度大于 10 dB, 相位裕度在 $30^\circ \sim 65^\circ$ 时, 对应系统才可保证具有良好的稳态和动态特性。图中, 4 个参量发生最大摄动情况下, 系统的幅频裕度和相频裕度分别最小为 18.6 dB 和 41.5° , 在合理的范围内仍留有较大的裕量, 说明控制器对系统参数变化不敏感, 而且其对应的阶跃响应超调量小和调节时间短, 有效提高系统对抗参数摄动的稳定度鲁棒性。

算例 2: 交直流断面工作于能量转换模式下, 需调整输出功率以维持系统实时能量平衡和电压稳定。0.4 s 前断面区域输出功率为 27 kW, 0.4 s 时向直流微网输出有功 16 kW, 0.5 s 时向交流微网输出功率 55 kW, 0.6 s 时输出有功功率阶跃 12 kW。图 8 为 $H_\infty - \gamma D$ -控制和传统 PI 控制下的系统动态特性仿真图, 图 8(a)为 $H_\infty - \gamma D$ -控制时断面输出有功功率(正值为整流模式, 负值为逆变模式)、交流母线电压及直流母线电压, 图 8(b)为采用传统 PI 控制方法的上述电气量的动态特性。

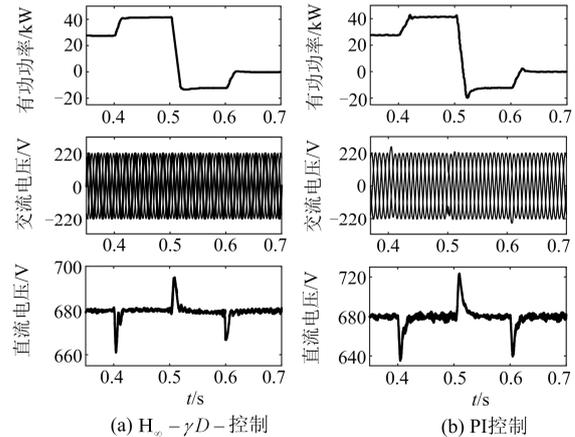


图 8 不同控制方式下系统动态特性

Fig. 8 System dynamics under different control modes

分析图 8(a)、8(b)可知, 相比于传统 PI 控制, $H_\infty - \gamma D$ -控制快速且平滑切换于整流与逆变模式, 减少功率变化对交直流母线的冲击。0.4 s 时在 $H_\infty - \gamma D$ -控制下, 直流母线电压降至由 663 V, 比 PI 控制减小 25 V 的跌落; 0.5 s 直流母线电压在 $H_\infty - \gamma D$ -控制下为 695 V, 而 PI 控制下为 724 V; 0.6 s 时 $H_\infty - \gamma D$ -控制下直流母线电压小幅变化后快速收敛, 电压质量得以保证。 $H_\infty - \gamma D$ -控制下交流电压维持稳定, 采用 PI 控制交流侧电压发生瞬时畸变。综合可见采用 $H_\infty - \gamma D$ -控制能够使电压偏差保持在一个较小的范围内, 提高控制精度, 有

效改善系统的抗扰动能力。

算例 3: 电压 V_{sabc} 在本文中是扰动量, 为观察 V_{sabc} 变化对交流侧和直流侧电压造成的影响, 基于图 1 所示混合微网结构图, 模拟风机接入和退出微网时, 对比采用 $H_\infty - \gamma D$ 控制和 PI 控制方法对交直流电压的稳定作用, 如图 9 所示。设置仿真时长为 20 s。7 s 时风机接入系统, 在电网稳定运行下, 10 s 时风机退出运行。

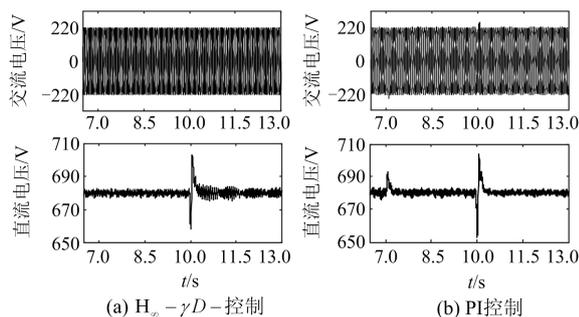


图 9 风机接入和退出交直流母线电压

Fig. 9 AC and DC bus voltage during wind power generators access and exit

由图 9 可知, 风机并网时 $H_\infty - \gamma D$ 控制下交流区和直流区电压几乎不产生任何影响, 具有良好的适应性; 在 PI 控制下交直流母线电压出现微小波动。在风机退出时会使交直流母线电压出现小幅波动, $H_\infty - \gamma D$ 控制下最低降至 672 V, 在 PI 控制下最低降至 658 V。由此可见, $H_\infty - \gamma D$ 控制可以减小风机并离网带来的冲击, 达到柔性控制的效果。

4 结论

本文以交直流混合微网断面系统为研究对象, 综合考虑了外界干扰、系统参数及控制器增益摄动的情况, 将非脆弱鲁棒 H_∞ 控制方法引入至断面控制系统中。所采用的方法不仅提高了控制器的稳定裕度, 还增强了其对复杂多变的实际运行操作的自适应性, 且结合 LMI 区域极点配置方法, 有效避免了因系统的不确定性导致单个主导极点配置不够准确的问题, 从而保证闭环系统具有优良的稳态和动态性能。通过仿真结果表明, 设计的 $H_\infty - \gamma D$ 稳定控制器兼顾稳定度鲁棒性和性能鲁棒性, 相比于传统 PI 控制, 有效提高混合微网系统交直流母线电压的稳定性, 实现高精度控制。

参考文献

[1] HATZIARGYRIOU N, ASANO H, IRAVANI R, et al. Microgrids[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2007, 5(4): 78-94.

[2] LOH P C, LI Ding, CHAI Yikang, et al. Autonomous operation of hybrid microgrid with AC and DC subgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2214-2223.

[3] 于芑, 张用, 孙辉, 等. 一种新型模块化交直流混合微电网拓扑优化设计及研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 26-34.

YU Peng, ZHANG Yong, SUN Hui, et al. Optimum design on the new pattern AC-DC mixed modular microgrid topology[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 26-34.

[4] LIU Xiong, WANG Peng, LOH P C. A hybrid AC/DC microgrid and its coordination control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2): 278-286.

[5] 范其丽, 郑晓茜, 王璞, 等. 基于混合储能动态调节的独立混合微电网分布式协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 105-114.

FAN Qili, ZHENG Xiaoxi, WANG Pu, et al. Decentralized control for autonomous hybrid microgrid with hybrid storage system dynamical regulating[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 105-114.

[6] 丁明, 田龙刚, 潘浩, 等. 交直流混合微电网运行控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 1-8.

DING Ming, TIAN Longgang, PAN Hao, et al. Research on control strategy of hybrid AC/DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 1-8.

[7] 贾利虎, 朱永强, 杜少飞, 等. 交直流微电网互联变流器控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(24): 98-104.

JIA Lihu, ZHU Yongqiang, DU Shaofei, et al. Control strategy of interlinked converter for AC/DC microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(24): 98-104.

[8] 唐磊, 曾成碧, 苗虹, 等. 交直流混合微电网中 AC/DC 双向功率变流器的新控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 13-18.

TANG Lei, ZENG Chengbi, MIAO Hong, et al. One novel control strategy of the AC/DC bidirectional power converter in microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 13-18.

[9] 张犁, 吴田进, 冯兰兰, 等. 模块化双向 AC/DC 变换器并联系统无缝切换控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(6): 90-96.

ZHANG Li, WU Tianjin, FENG Lanlan, et al. Seamless switching control for modular bidirectional AC/DC converter parallel systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(6): 90-96.

[10] 杨刚, 杨奇逊, 张涛, 等. 微网中双向 DC-AC 变流器的性能优化控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(7): 81-91.

- YANG Gang, YANG Qixun, ZHANG Tao, et al. Improvement control of dual-direction DC-AC converters for microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(7): 81-91.
- [11] SUN Kai, WANG Xiaosheng, LI Yunwei, et al. Parallel operation of bidirectional interfacing converters in a hybrid AC/DC microgrid under unbalanced grid voltage conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(3): 1872-1884.
- [12] WANG Junjun, JIN Chi, WANG Peng. A uniform control strategy for the interlinking converter in hierarchical controlled hybrid AC/DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(8): 6188-6197.
- [13] 方红伟, 陶月, 肖朝霞, 等. 并网逆变器并联系统的鲁棒控制与环流分析[J]. 电工技术学报, 2017, 32(18): 248-258.
- FANG Hongwei, TAO Yue, XIAO Zhaoxia, et al. Robust control and circulating current analysis for grid-connected parallel inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(18): 248-258.
- [14] 王逸超, 罗安, 金国彬. 微网逆变器的改进鲁棒下垂多环控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 116-123.
- WANG Yichao, LUO An, JIN Guobin. Improved robust droop multiple loop control for parallel inverters in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 116-123.
- [15] MAHMUD M A, HOSSAIN M J, POTA H R, et al. Robust nonlinear controller design for three-phase grid-connected photovoltaic systems under structured uncertainties[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(3): 1221-1230.
- [16] HORNIK T, ZHONG Qingchang. A current-control strategy for voltage-source inverters in microgrids based on H_∞ and repetitive control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3): 943-952.
- [17] 苏小玲, 韩民晓, 孙海. 基于自适应全局滑模控制的微电网稳定控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5534-5541.
- SU Xiaoling, HAN Minxiao, SUN Hai. Stability control strategy for microgrid based on adaptive total sliding-mode control[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5534-5541.
- [18] MOHAMED A R I, ZEINELDIN H H, SALAMA M M A, et al. Seamless formation and robust control of distributed generation microgrids via direct voltage control and optimized dynamic power sharing[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(3): 1283-1294.
- [19] 王琛, 孟建辉, 王毅, 等. 含多种分布式电源的直流微电网硬件在环仿真系统设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 146-154.
- WANG Chen, MENG Jianhui, WANG Yi, et al. Design and implementation of hardware in-the-loop simulation system for DC microgrid with multiple DG units[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 146-154.
- [20] 李响, 郝瑞祥, 游小杰, 等. 一种级联电力电子变压器直流电压平衡控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(2): 238-245.
- LI Xiang, HAO Ruixiang, YOU Xiaojie, et al. A DC voltage balance control strategy for the cascaded power electronic transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(2): 238-245.
- [21] CHILALI M, GAHINET P. H_∞ design with pole placement constraints: an LMI approach[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1996, 41(3): 358-367.
- [22] 吴敏, 何勇, 余锦华. 鲁棒控制理论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.

收稿日期: 2018-07-17; 修回日期: 2018-10-03

作者简介:

张虹(1973—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统稳定与控制、电力系统优化运行; E-mail: jdlzh2000@126.com

侯宁(1994—), 女, 硕士, 研究方向为电力系统分析与稳定控制。E-mail: hnccwssy@163.com

(编辑 葛艳娜)